

FORUM HOLZBAU

BAUPHYSIK &
GEBÄUDETECHNIK

**6. Internationale Fachtagung
Bauphysik & Gebäudetechnik (BGT)
Rosenheim, Deutschland
28./29. April 2022**

Holzbau | Trockenbau | Innenausbau

BFH BIEL
TH ROSENHEIM
AALTO HELSINKI
TU MUNCHEN
PRINCE GEORGE
TU WIEN

Inhalt

AUFTAKT

Bauen Morgen – was uns treiben könnte

Nachhaltig Bauen – hilft uns die Technik? 10

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen, Ingenieurbüro Hausladen, Kirchheim bei München, Deutschland

Einfach Bauen 13

Anne Niemann, Technische Universität München, München, Deutschland

A1

Schallschutzplanung – Werkzeuge

Planungstools aus der Schweiz 20

Dr. Stefan Schoenwald, Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, Dübendorf, Schweiz

Der Holzbau in der DIN 4109 29

Martin Schneider, Hochschule für Technik Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Schallschutzplanung und BIM im Holzbau – ein Zwischenstand 38

Camille Châteauevieux-Hellwig, Technische Hochschule Rosenheim, Rosenheim, Deutschland

A2

Aussenlärm – Hintergründe und viel Neues

ÖNORM B 8115-2: Methodik zur Erstellung von Anforderungen 48

Clemens Häusler, bauphysik.at, Pfaffstätten, Österreich

Christoph Lechner, Amt der Tiroler Landesregierung, Innsbruck, Österreich

Schalltechnische Aspekte bei NawaRo-Dämmstoffen – Details aus dem Inneren 59

Prof. Dr. Andreas Rabold, Technische Hochschule Rosenheim und ift Rosenheim, Rosenheim, Deutschland

Simon Mecking, Kurz und Fischer, Feldkirchen-Westerham, Deutschland

Anton Huber, PMI, Unterhaching, Deutschland

Holzbau im Spiegel des Außenlärms: Zusammenhänge und aktuelle Erkenntnisse 69

Dr. Andreas Meier, Müller-BBM, Planegg, Deutschland

A3

Hören wir, was wir planen?

Verbesserung des Schalldämm-Maßes durch Vorsatzschalen im Holzmassivbau 81

Simon Mecking, Kurz und Fischer, Feldkirchen-Westerham, Deutschland

Tobias Mutter, Kurz und Fischer, Feldkirchen-Westerham, Deutschland

Prof. Dr. Andreas Rabold, Technische Hochschule Rosenheim und ift Rosenheim, Rosenheim, Deutschland

Tiefe Frequenzen – ja, Sie sind wichtig! 89

Prof. Dr. Berndt Zeitler, Hochschule für Technik Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Dr. Markus Müller-Trapet, National Research Council, Ottawa, Canada

Tiefe (Hör-)Einblicke in die tieffrequente Trittschallübertragung 103

Dr. Schöpfer Fabian und Prof. Dr. Schanda Ulrich, Technische Hochschule Rosenheim, Rosenheim, Deutschland

B1

Wärme & Feuchte

Feuchte Monitoring mit verschiedenen Messmethoden – Fallbeispiel: Apartmenthaus 115

Assoz. Prof. Dr. Anton Kraller, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich

PCM-Kühldecken im Energy Efficiency Center – ein Praxisbericht	129
<i>Dr. Helmut Weinläder, ZAE Bayern, Würzburg, Deutschland</i>	

Prebound, Rebound, Performance Gap – Was stimmt nicht zwischen dem Energiebedarf und dem Energieverbrauch von Wohngebäuden?	140
<i>Dr. Caroline Hoffmann, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz, Schweiz</i>	

B2

Energiebedarfsoptimierung durch Automation und intelligente Systeme

Potenzial KI-basierter Verfahren hinsichtlich Optimierung des Raum bzw. Gebäudeenergiebedarfs	154
<i>Prof. Dr. Michael Krödel, Technische Hochschule Rosenheim, Rosenheim, Deutschland</i>	

Durch intelligente Heizungsregelung realisierbare Energie-Einsparpotentiale	161
<i>Dr. Matthias Kersken, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen, Deutschland</i>	

Low-Cost Gebäudemonitoring zum Selbermachen	169
<i>Prof. Dr. Olivier Steiger, Hochschule Luzern, Horw, Schweiz</i>	

B3

Gebäudetechnik im Kontext des nachhaltigen Bauens

Einfach Lüften	177
<i>Prof. Heinrich Huber, Hochschule Luzern, Horw, Schweiz</i>	

Passivhaus und regenerative Energiequellen als Lösungsansatz für den klimaneutralen Gebäudebestand	186
<i>Prof. Dr. Harald Krause, Technische Hochschule Rosenheim, Rosenheim, Deutschland</i>	

Robustheit im Spannungsfeld von Gebäudetechnik und Energieeffizienz	197
<i>Prof. Elisabeth Endres, Technische Universität Braunschweig / Ingenieurbüro Hausladen, Braunschweig, Deutschland</i>	

A4

Brandschutzforschung für die Verwendung von Holzkonstruktionen im Mehrgeschossigen Wohnbau

Rechnerische Brandschutzbemessung von Holzbauteilen. Berechnungsmethoden bis 90 Minuten Feuerwiderstand: Projekt «FREI 90»	200
<i>Michael Rauch und Norman Werther, Technische Universität München, München, Deutschland</i>	

Brandbeanspruchung durch Naturbrandmodelle nach Eurocode anstatt ETK – Erleichterung für den Holz-Wohnungsbau?	212
<i>Prof. Dr. Jochen Zehfuß und Sven Brunkhorst, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Deutschland</i>	

TIMPuls: Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen in Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus	228
<i>Thomas Engel, Technische Universität München, München, Deutschland</i>	

A5

Plandaten und Planungssicherheit

Gebäudetechnische Installationen an und durch Bauteile in Holz	248
<i>Ivan Brühwiler, B3 Kolb AG, Romanshorn, Schweiz</i>	

Die neue Generation der Eurocodes – Entwicklungen bei EN 1995-1-2	258
<i>Prof. Dr. Andrea Frangi, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zürich, Schweiz</i>	
<i>Dr. Joachim Schmid, IGNIS Fire-Design-Consulting, Zürich & ETH Zürich, Zürich, Schweiz</i>	
<i>Dr. Norman Werther, Technische Universität München, München, Deutschland</i>	

A6

Best Practice: So wird es schon umgesetzt

- Umsetzung von Brandschutzkonzepten bei Fertigung und Montage von Modulgebäuden** 268
Urs Ickler, Timber Homes, Dorfen, Deutschland
- Produktivitätssteigerung durch geprüfte Brandschutzlösungen für die Gebäudetechnik im Geschossbau** 282
Henning Artmann, Hilti Deutschland, Kaufering, Deutschland
- Nachweis der Rauchdichtigkeit von Bauteilanschlüssen im Holzbau** 297
Prof. Dr. Björn Kampmeier und Patrick Sudhoff, Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, Deutschland

B4

Bauphysikalische Anforderungen bei Aufstockungen und Modulbauweise – Praxisbeispiele

- Besonderheiten der Holzmodulbauweise – Praxisbeispiele zum Brandschutz** 311
Hendrik Reichelt, Kaufmann Bausysteme, Reuthe, Österreich
- Bauphysik im Holzmodulbau – Planung und Umsetzung** 316
Jesse Zimmermanns, W. u. J. Derix, Niederkrüchten, Deutschland

B5

Bauphysikalisch-energetische Aspekte der Gebäudehülle

- Grüne Fassaden – Auswirkung auf U-Wert, Oberflächentemperaturen und Wärmebrücken** 329
Florian Teichmann und Azra Korjenic, Technische Universität Wien, Wien, Österreich
- Bauwerkintegrierte Photovoltaik in Fassaden – energetische Bilanzierung** 343
Christian Popp mit Dorothea Koallick und Bernhard Weller, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland
- Sommerlicher Wärmeschutz und Holzbau – Vorurteile und Tatsachen** 359
Michael Eichenberger, PIRMIN JUNG Schweiz, Thun, Schweiz

B6

Behaglichkeit und Wohngesundheit

- Behaglichkeit – Wechselwirkung oder Zusammenspiel bauphysikalischer Phänomene?** 367
Prof. Dr. Schew-Ram Mehra, Universität Stuttgart, Deutschland
- Tageslichtplanung – Motivation / Chancen / Kosten** 380
Prof. Mathias Wambsganß, Technische Hochschule Rosenheim, Rosenheim, Deutschland
- Raumluftqualität – Stand der Mess- und Sensorüberwachung** 385
Karl-Heinz Weinisch, IQUH, Institut für Qualitätsmanagement und Umfeldhygiene, Weikersheim, Deutschland

EPILOG

Bauen Morgen – woran wir denken sollten

- Ganzheitliche und kostenoptimierte Gebäudekonzepte - Die Evolution als Optimierungswerkzeug** 400
Alexander Schröter, Müller-BBM, Planegg, Deutschland
- Circular Economy – Prinzipien für ressourcen- und klimagerechte Architektur** 411
Jörg Finkbeiner, Partner und Partner Architekten, Berlin, Deutschland

Moderatoren

Prof. Dr. Beck Andreas

Hochschule für Technik Stuttgart
Schellingstrasse 24
70174 Stuttgart, Deutschland

Tel.: +49 7118 926 26 77
E-Mail: andreas.beck@hft-stuttgart.de

Prof. Engels Isabel

Berner Fachhochschule
Solothurnstrasse 102
2504 Biel/Bienne, Schweiz

Tel.: +41 32 344 17 66
E-Mail: isabel.engels@bfh.ch

Prof. Germerott Uwe

Berner Fachhochschule
Solothurnstrasse 102
2504 Biel/Bienne, Schweiz

Tel.: +41 32 344 03 50
E-Mail: uwe.germerott@bfh.ch

Kohaus Maren

Technische Universität München
Arcisstrasse 21
80333 München, Deutschland

Tel.: +49 8928 925 496
E-Mail: maren.kohaus@tum.de

Prof. Kolb Hanspeter

Berner Fachhochschule
Solothurnstrasse 102
2504 Biel/Bienne, Schweiz

Tel.: +41 32 344 02 11
E-Mail: hanspeter.kolb@bfh.ch

Prof. Dr. h.c. Köster Heinrich

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 120
E-Mail: heinrich.koester@th-rosenheim.de

Dr. Mayr Andreas

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 25 32
E-Mail: andreas.mayr@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Nemeth Isabell

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

E-Mail: isabell.nemeth@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Schanda Ulrich

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 24 07
E-Mail: ulrich.schanda@th-rosenheim.de

Schuster Sandra

Technische Universität München
Arcisstrasse 21
80333 München, Deutschland

Tel.: +49 892 892 54 93
E-Mail: sandra.schuster@tum.de

Prof. Spindler Uli

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 23 30
E-Mail: uli.spindler@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Stopper Jochen

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 25 63
E-Mail: jochen.stopper@th-rosenheim.de

Werning Hanno

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 23 35
E-Mail: hanno.werning@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Zeitler Berndt

Hochschule für Technik Stuttgart
Schellingstrasse 24
70174 Stuttgart, Deutschland

Tel.: +49 7118 926 25 07
E-Mail: berndt.zeitler@hft-stuttgart.de

Referenten

Artmann Henning

Hilti Deutschland AG
Hiltistrasse 2
86916 Kaufering, Deutschland

Tel.: +49 170 853 03 17
E-Mail: hanshenning.artmann@hilti.com

Brühwiler Ivan

B3 Kolb AG
Hafenstrasse 62
8590 Romanshorn, Schweiz

Tel.: +41 71 466 72 24
E-Mail: ivan.bruehwiler@b-3.ch

Châteauvieux-Hellwig Camille

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
OH 44111 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 24 79
E-Mail: camille.chateauvieux-hellwig@th-rosenheim.de

Eichenberger Michael

PIRMIN JUNG Schweiz AG
Frutigenstrasse 2
3600 Thun, Schweiz

Tel.: +41 33 227 72 47
E-Mail: michael.eichenberger@pirminjung.ch

Prof. Endres Elisabeth

Technische Universität Braunschweig
Mühlenpfordtstrasse 23
38106 Braunschweig, Deutschland

Tel.: +49 5313 913 555
E-Mail: e.endres@tu-braunschweig.de

Engel Thomas

Technische Universität München
Arcisstrasse 21
80333 München, Deutschland

Tel.: +49 8928 928 679
E-Mail: engel@tum.de

Finkbeiner Jörg

Partner und Partner Architekten
Reichenberger Strasse 124a
10999 Berlin, Deutschland

Tel.: +49 3054 494 377
E-Mail: jf@partnerundpartner.com

Prof. Dr Frangi Andrea

ETH Zürich / IBK
Stefano-Francini-Platz 5
8093 Zürich, Schweiz

Tel.: +41 44 633 26 40
E-Mail: frangi@ibk.baug.ethz.ch

Prof. Dr. Hausladen Gerhard

Ingenieurbüro Hausladen GmbH
Feldkirchener Strasse 7a
85551 Kirchheim b. München, Deutschland

Tel.: +49 8999 152 523
E-Mail: gerhard.hausladen@ibhausladen.de

Häusler Clemens

bauphysik.at
Josef Stadlmann-G. 1
2511 Pfaffstätten, Österreich

Tel.: +49 2252 206 069
E-Mail: info@bauphysik.at

Dr. Hoffmann Caroline

Fachhochschule Nordwestschweiz
Hofackerstrasse 30
4132 Muttenz, Schweiz

Tel.: +41 61 228 54 59
E-Mail: caroline.hoffmann@fhnw.ch

Prof. Huber Heinrich

Hochschule Luzern
Technikumstrasse 21
6048 Horw, Schweiz

Tel.: +41 41 349 32 75
E-Mail: heinrich.huber@hslu.ch

Ickler Urs

Timber Homes GmbH & Co. KG
Orlfing 1
84405 Dorfen, Deutschland

Tel.: +49 8081 953 831 00
E-Mail: uickler@timber-homes.de

Jussel Richard

Blumer-Lehmann AG
Erlenhof
9200 Gossau, Schweiz

Tel.: +41 71 388 58 61
E-Mail: richard.jussel@blumer-lehmann.ch

Prof. Dr. Kampmeier Björn

Hochschule Magdeburg-Stendal
Breitscheidstrasse 2
39114 Magdeburg, Deutschland

Tel.: +49 3918 864 967
E-Mail: bjoern.kampmeier@hs-magdeburg.de

Dr. Kersken Matthias

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Fraunhoferstrasse 10
83626 Valley, Deutschland

Tel.: +49 8024 643 204
E-Mail: matthias.kersken@ibp.fraunhofer.de

Assoz. Prof. Dr. Kraler Anton

Universität Innsbruck
Technikerstrasse 13
6020 Innsbruck, Österreich

Tel.: +43 51 250 763 206
E-Mail: anton.kraler@uibk.ac.at

Prof. Dr. Krause Harald

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 24 15
E-Mail: harald.krause@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Krödel Michael

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 24 18
E-Mail: michael.kroedel@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Kruse Dirk

Dehne, Kruse Brandschutzingenieure
GmbH & Co. KG
Gustav-Schwannecke-Strasse 13
38518 Gifhorn, Deutschland

Tel.: +49 531 26157904
E-Mail: kruse@kd-brandschutz.de

Mecking Simon

Kurz und Fischer GmbH, Beratende Ingenieure
Miesbacher Strasse 23
83620 Feldkirchen-Westerham, Deutschland

Tel.: +49 8063 20784 06
E-Mail: simon.mecking@kurz-fischer.de

Prof. Dr. Mehra Schew-Ram

IABP Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart, Deutschland

Tel.: +49 7116 856 62 32
E-Mail: mehra@iabp.uni-stuttgart.de

Dr. Meier Andreas

Müller-BBM GmbH
Helmut-A.-Müller-Strasse 1-5
82152 Planegg, Deutschland

Tel.: +49 8985 602 325
E-Mail: Andreas.Meier@mbbm.com

Niemann Anne

Technische Universität München
Arcisstrasse 21
80333 München, Deutschland

Tel.: +49 8928 923 881
E-Mail: anne.niemann@tum.de

Popp Christian

Technische Universität Dresden
Institut für Baukonstruktion
August-Bebel-Strasse 30
01219 Dresden, Deutschland

Tel.: +49 3514 633 23 06
E-Mail: christian.popp1@tu-dresden.de

Prof. Dr. Rabold Andreas

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland

Tel.: +49 8031 805 25 33
E-Mail: andreas.rabold@th-rosenheim.de

Rauch Michael

Technische Universität München
Arcisstrasse 21
80333 München, Deutschland

Tel.: +49 8928 923 922
E-Mail: m.rauch@tum.de

Reichelt Hendrik

Kaufmann Bausysteme GmbH
Baieri 115
6870 Reuthe, Österreich

Tel.: +43 55 143 144 014
E-Mail: h.reichelt@kaufmannbausysteme.at

Prof. Dr. Schanda Ulrich

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland
Tel.: +49 8031 805 24 07
E-Mail: ulrich.schanda@th-rosenheim.de

Schneider Martin

Hochschule für Technik Stuttgart
Schellingstrasse 24
70174 Stuttgart, Deutschland
Tel.: +49 7118 926 28 36
E-Mail: martin.schneider@hft-stuttgart.de

Dr. Schoenwald Stefan

Eidgenössische Material und Prüfanstalt (EMPA)
Ueberlandstrasse 129
8600 Dübendorf, Schweiz
Tel.: +41 58 765 65 79
E-Mail: stefan.schoenwald@empa.ch

Dr. Schöpfer Fabian

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland
Tel.: +49 8031 805 25 89
E-Mail: fabian.schoepfer@th-rosenheim.de

Schröter Alexander

Müller-BBM GmbH
Robert-Koch-Strasse 11
82152 Planegg, Deutschland
Tel.: +49 8985 602 138
E-Mail: Alexander.Schroeter@mbbm.com

Prof. Dr. Steiger Olivier

Hochschule Luzern
Technikumstrasse 21
6048 Horw, Schweiz
Tel.: +41 41 349 34 26
E-Mail: olivier.steiger@hslu.ch

Teichmann Florian

Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/207-03
1040 Wien, Österreich
Tel.: +43 1 58801 207335
E-Mail: florian.teichmann@tuwien.ac.at

Prof. Wambsganß Mathias

Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstrasse 1
83024 Rosenheim, Deutschland
Tel.: +49 803 180 525 70
E-Mail: mathias.wambsganss@th-rosenheim.de

Weinisch Karl-Heinz

IQUH GmbH
Deutschordenstrasse 4/3
97990 Weikersheim, Deutschland
Tel.: +49 7934 912 111
E-Mail: weinisch@iquh.de

Dr. Weinläder Helmut

Bayerisches Zentrum für Angewandte
Energieforschung e.V.
Magdalene-Schoch-Strasse 3
97074 Würzburg, Deutschland
Tel.: +49 9317 056 43 48
E-Mail: Helmut.Weinlaeder@zae-bayern.de

Prof. Dr. Zehfuß Jochen

Technische Universität Braunschweig
Beethovenstrasse 52
38106 Braunschweig, Deutschland
Tel.: +49 5313 915 441
E-Mail: j.zehfuss@ibmb.tu-bs.de

Prof. Dr. Zeitler Berndt

Hochschule für Technik Stuttgart
Schellingstrasse 24
70174 Stuttgart, Deutschland
Tel.: +49 7118 926 25 07
E-Mail: berndt.zeitler@hft-stuttgart.de

Zimmermanns Jesse

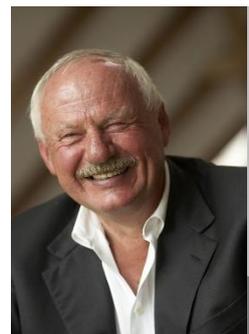
W. u. J. Derix GmbH & Co.
Dam 63
41372 Niederkrüchten, Deutschland
Tel.: +49 2163 898 828
E-Mail: j.zimmermanns@derix.de

AUFTAKT

Bauen Morgen – was uns treiben könnte

Nachhaltig Bauen – hilft uns die Technik?

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen
Ingenieurbüro Hausladen
Kirchheim bei München, Deutschland



Nachhaltig Bauen – hilft uns die Technik?

1. Mit weniger Komplexität nachhaltiger Bauen

In den vergangenen Jahren ist infolge einer steigenden Zahl von Naturkatastrophen, angesichts von Klimaerwärmung und wachsender Müllprobleme das Bewusstsein für einen ressourcenschonenden, nachhaltigen Umgang mit der Umwelt in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft stetig gewachsen. Diese Entwicklung mündete 2015 im Pariser Klimaschutzabkommen, das von 195 Nationen unterzeichnet wurde. Im Bauwesen begann die Diskussion um einen nachhaltigen Gebäudebetrieb bereits in den 1980er Jahren parallel zur Debatte um den Atomausstieg. Schon 1991 entstand das erste Passivhaus in Deutschland – vor der Einführung der Wärmeschutzverordnung 1995 und deren Fortschreibungen über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (EnEV).

Die Anforderungen an den effizienten Betrieb der Gebäude haben sich inzwischen signifikant weiterentwickelt und neben den gesetzlich geltenden Anforderungen der EnEV wird eine Vielzahl an Energiestandards diskutiert. Erklärtes Ziel ist die Minimierung des Betriebsenergiebedarfs bis zum annähernd klimaneutralen Gebäudebestand 2050. Um sich diesem Ziel zu nähern, werden Gebäude, die diese Standards erreichen, intensiv gefördert.

2. Parameter und Bilanzen

Diese Vorgaben und Förderungen führen aktuell dazu, dass der prognostizierte Energiebedarf der Gebäude im Betrieb als wichtigste Benchmark gilt. Der Einsatz grauer Energie in der Materialität der Erstellung der Gebäude und der technische Aufwand zur theoretischen Senkung der Bedarfswerte sind nicht Teil der Betrachtungen. Gerade diese Parameter beeinflussen jedoch den Energiebedarf der Gebäude massiv. Der Materialaufwand und die in den Baustoffen gebundene graue Energie sind je nach Bauweise größer als die Energieeinsparung über die angestrebte Nutzungsdauer der Gebäude.

Neben Dämmstoffen auf fossiler Basis wirkt sich insbesondere die Baumasse, in der Regel Stahlbeton, negativ auf die CO₂-Bilanz von Neubauten aus. Beispielsweise werden gerade im innerstädtischen Bereich für die Bereitstellung unterirdischer Parkflächen weiterhin enorme Mengen an CO₂-intensiven Materialien auf Jahrzehnte hin verbaut. Angesichts der aktuellen Diskussionen zur notwendigen Transformation des Verkehrssektors, insbesondere im städtischen Individualverkehr, lässt sich hier keine kohärente Strategie im Hinblick auf die von der Bundesregierung beschlossene Energiewende erkennen. Während auf der einen Seite neue Meilensteine in der zumindest planerisch prognostizierten Effizienz von Gebäuden im Betrieb erreicht werden, bleiben Errichtung und Verwertung nach dem Ende der Nutzungsdauer systemisch unberücksichtigt.

Hinzu kommt der mit den gestiegenen Effizienzanforderungen massiv gewachsene Anteil an Hightech-Konzepten zur Minimierung des Betriebsenergiebedarfs. Neben Lüftungsanlagen in Passiv- und Plusenergiehäusern sowie Gebäuden mit KfW-40-Effizienzhaus-Standard werden automatisierte Verschattungssysteme, Einzelraumregelungen und vielfältige Elektrotechnik zur Regelung der Anlagentechnik in abgehängten Decken oder aufgeständerten Fußböden installiert. Schwerwiegender als die Tatsache, dass dadurch die Speichermassen des Gebäudes nicht mehr freiliegen und energetisch sinnvoll genutzt werden können, ist jedoch, dass der spätere Nutzer als unsichere Randbedingung keine Berücksichtigung in der Planung findet. Technisches Versagen, das Potenzial dafür wächst mit der Vielzahl technischer Komponenten und der damit verbundenen Komplexität, oder Fehlbedienungen durch die Nutzer führen häufig zu einem deutlichen Performance Gap im Betrieb. Die Erfahrung aus Verbrauchsauswertungen und Monitorings zeigt, dass selbst optimierte Hightech-Konzepte große Unsicherheiten aufweisen, da die Anwendung der technischen Systeme zu komplex für die tägliche Nutzung ist. In Summe führt dies dazu, dass neben der Komplexität die monetären und energetischen Gesamtkosten im Bauwesen massiv zunehmen.

3. Weniger ist mehr

Ausbleibende Erfolge in der Praxis in Bezug auf die Reduzierung der Energieverbräuche führen seit einigen Jahren zu einem Paradigmenwechsel von Hightech-Konzepten hin zu einem minimierten Einsatz technischer Komponenten und robusteren Betriebsweisen. Eine entscheidende Stellschraube dieser zukunftsweisenden Lowtech-Gesamtkonzepte stellt die Einbindung von Energieversorgungsstrategien dar. Bei dieser ganzheitlichen Betrachtungsweise werden Lastgänge technischer Infrastrukturen und lokal vorhandener Energieressourcen mit den Bedarfslastgängen der Gebäude abgestimmt, um so Strukturen zu entwickeln, die einen Mehrwert für Umwelt und Nutzer generieren sowie Baukultur im Bestand erhalten.

Einfach Bauen

Anne Niemann
Technische Universität München
München, Deutschland



Einfach Bauen

1. Hintergrund

Die Komplexität der Konstruktionen und Gebäudetechnik steigt seit Jahrzehnten stetig. Dies betrifft die Anforderungen an Standsicherheit, Wärme-, Feuchte-, Brand- und Schallschutz, Hygiene und Gesundheit wie auch den allgemeinen Nutzerkomfort. Das äußert sich in einer fast unüberblickbaren und weiter steigenden Zahl an Normen und Baugesetzen. Das damit anvisierte Ziel der Qualitätssicherung wird oft nicht erreicht: Die Folge der Komplexität ist eine hohe Fehlerquote in Planung und Ausführung sowie eine Überforderung von Bauherren und Nutzern. Daher stellt sich die Frage: «Geht das nicht auch einfacher?»



Abbildung 1: Technikzentrale im Schulgebäude in Diedorf (ARGE Nagler & Kaufmann Architekten)

2. Das Forschungsprojekt Einfach Bauen

Seit 2017 untersucht im Forschungszentrum Einfach Bauen der Technischen Universität München ein interdisziplinäres Team unter der Leitung von Prof. Florian Nagler, wie man die Komplexität im Bauen reduzieren kann. Der Anspruch ist, Strategien für einfach gebaute Gebäude zu entwickeln, die – über einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet – gedämmten Konstruktionen und sogar Niedrigenergiehäusern sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich überlegen sind. Gefördert wird das mehrstufige Forschungsvorhaben durch das Programm «Zukunft Bau» [1] des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).

2.1. Grundlagenforschung

Ziel im ersten Schritt war es festzustellen, welche baulichen Maßnahmen einen entscheidenden Einfluss auf das Innenraumklima haben [2]. Wie kann die Architektur so optimiert werden, dass es auch ohne den Einsatz von viel Technik im Winter angenehm warm und im Sommer nicht zu heiß wird?

Ausgehend von einem 18 m² großen Basis-Raummodell wurden in einer Computersimulation Parameter wie Geometrie, Fenstergröße, Glasart und Außenwanddicke verändert. Die Raumhöhe variierte von 2,40 m wie von der Musterbauordnung (MBO) vorgeschriebenen, bis zu komfortablen 3,40 m. Auch der minimale Fensterflächenanteil wurde mit 1/8 der Nettogrundfläche des Raumes durch die MBO vorgegeben. Die Brüstung- und Sturzhöhe, welche ein Fensterband aufspannen, bestimmten die maximal mögliche Fensterfläche. Als Glasvarianten standen Sonnen- und Wärmeschutzglas jeweils mit Zwei- oder Drei-Scheibenverglasung zur Auswahl. Die monolithisch ausgeführten Außenwände bestanden wahlweise aus Leichtbeton, hochwärmedämmendem Mauerwerk oder Massivholz. Die Kombination von 81 verschiedenen Geometrien, vier Himmelsrichtungen, drei Bauweisen und drei Glasarten ergab knapp 3000 Varianten. In der Auswertung zeigte sich, dass Raumvarianten mit reduziertem Hüllflächenanteil, thermischen Speichermassen, großen Raumhöhen und optimierten

Fensterflächen sich als optimal bezüglich geringem Heizwärmebedarf und reduzierter Überhitzung im Sommer erwiesen. Das entspricht in vielen Aspekten den sogenannten Altbauten, Gebäuden aus der Gründerzeit, die wegen ihrer flexibel nutzbaren und langlebigen Strukturen auch heute noch beliebt sind und ein akzeptables Raumklima auch ohne haustechnische Systeme herstellen konnten.

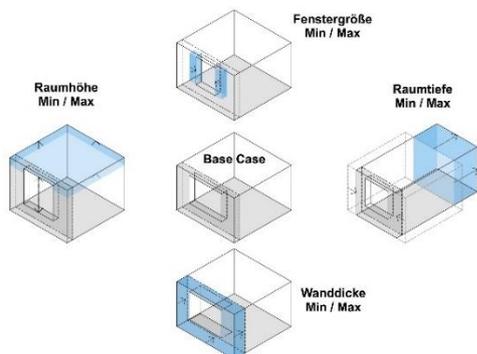


Abbildung 2: Jeweils ein Parameter der Grundvariante wurde schrittweise verändert

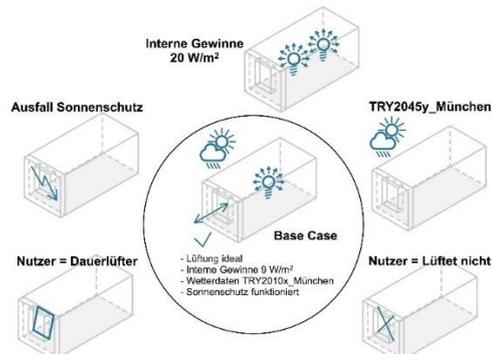


Abbildung 3: Untersuchung der Robustheit durch die Veränderung der Randbedingungen

Diese rein auf die baulichen Faktoren ausgerichtete Untersuchung lieferte klare Ergebnisse. Doch was passiert, wenn sich die bislang konstant gehaltenen Randbedingungen, wie beispielsweise das Wetter oder das Nutzerverhalten, ändern? In Zeiten von Klimawandel und dem Arbeiten im homeoffice sind das keine Zukunftsszenarien mehr. Bisherige Planungsprozesse haben zum Ziel, für die jeweilige Aufgabe das Optimum zu finden. So erreicht beispielsweise ein Niedrighaus bestmögliche Werte in Bezug auf den Heizwärmebedarf. Dabei bleibt oft unberücksichtigt, dass sich die als ideal angenommenen Umgebungsparameter in der Realität dramatisch ändern können. Ein System wird als robust definiert, wenn es unter Idealbedingungen nicht unbedingt das bestmögliche Ergebnis erreicht, dafür aber unempfindlich auf sich verändernde Eingangsgrößen reagiert.

In der Robustheitsuntersuchung hat sich gezeigt, dass das Lüftungsverhalten des Nutzers den größten Einfluss auf den Heizwärmebedarf im Negativen wie im Positiven hat. Im Sommer bestimmen das Wetter und die internen Gewinne vorrangig die Überhitzung. Insgesamt zeigen sich die einfachen Bauweisen robuster gegenüber Einflussnahme durch den Nutzer als die parallel untersuchten Raummodelle mit Standard- und Niedrigenergiekonzept. Die Kosten verhalten sich analog dazu. Die anfangs aufgestellte Hypothese hat sich damit bestätigt.

2.2. Anwendung in den Forschungshäusern



Abbildung 4: Straßenansicht der drei Forschungshäuser. Die unterschiedlichen Fensterformen entsprechen dem Außenwandmaterial. Foto: Sebastian Schels

Die erforschten Grundprinzipien des einfachen Bauens wurden in einem Leitfaden [3] zusammengefasst und kamen beim Bau von drei Forschungshäuser durch Florian Nagler Architekten in Bad Aibling zur Anwendung. Einfach Bauen bedeutet, ein Gebäude bereits in den ersten Planungsschritten durch eine Vielzahl von Entscheidungen robust und lang-lebig zu gestalten:

- Einschichtige Wand- und Deckenkonstruktionen
- Klimatisch träge Bauteile durch Speichermasse
- Angemessene Fensterflächen - kein Sonnenschutz - Nutzerlüftung
- Wenig Aufwand für den Betrieb durch geringe Komplexität des Gebäudes
- Handwerkliche Fügung der Bauteile
- Verzicht auf Hilfsstoffe und materialfremde Sonderbauteile
- Konsequente Trennung von Gebäude und Techniksystemen

Lebensdauer

Einrichtung: ±5 Jahre

Raumnutzung: ±10 Jahre

Technische Systeme: ±20 Jahre

Hülle: ±50 Jahre

Konstruktion: ±100 Jahre

Bauplatz: ∞ ±2 Milliarden Jahre

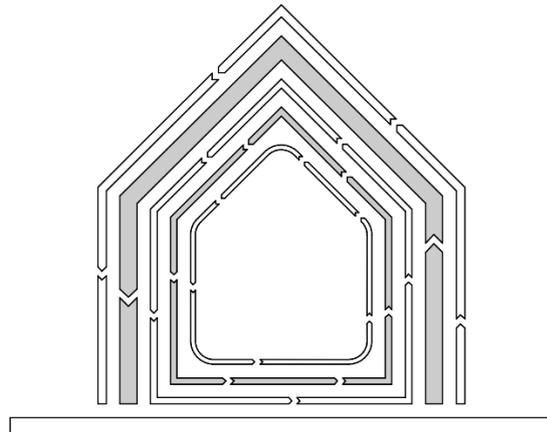


Abbildung 5: Lebensdauer von Bauteilschichten (Quelle: [3])

Entstanden sind drei material- und klimagerecht konstruierte dreigeschossige Wohngebäude in den Bauweisen Massivholz, Leichtbeton und wärmedämmendem Mauerwerk. Um Stürze und damit Materialwechsel und aufwändige Details zu vermeiden, leiten sich die Fensterformen von den Eigenschaften des Außenwandmaterials ab. Die Entscheidung für monolithische Wand- und Deckenkonstruktionen wurde bereits in der Antragsphase gefällt. Grund hierfür war der Wunsch, durch eine einschichtige Bauweise die Komplexität der Gebäude in der Planungs- und Bauphase, aber auch während der Instandsetzung und dem Rückbau zu reduzieren.



Abbildung 6: Die drei verwendeten Außenwandmaterialien: Massivholz und Ziegel – jeweils mit Luftkammern, sowie Infralichtbeton.
Foto: Tilmann Jarmer

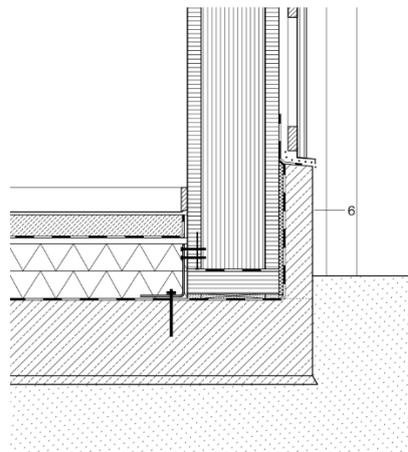


Abbildung 7: Sockeldetail Holzmassivhaus (Florian Nagler Architekten)

Für den Holzbau bedeutete dies die Wahl eines Vollholzwandbauteils, das die Anforderungen an die deutsche Energiesparverordnung (EnEV) erfüllen musste, und zwar mit möglichst wenig Ressourceneinsatz. Es gibt bereits ein zugelassenes Produkt auf dem Markt, das durch schmale, vertikale Schlitze in den vertikalen Mittellagen des Holzquerschnitts – einem Hohlkammerziegel ähnlich – Lufteinschlüsse ins Bauteil integriert.

Durch diese Luftkammern im Querschnitt ist eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda = 0,07 \text{ W/mK}$ möglich, womit ein U-Wert von $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ bereits bei Wandelementen von einer Dicke von 23 cm erreicht wird. Allerdings zeigte sich in den Simulationen, dass nur ein Holz-Hybridbau robust genug ist, um in Bezug auf Speichermasse und Wirtschaftlichkeit mit Bauten aus Beton oder Mauerwerk mithalten zu können. Um die Anzahl der Übertemperaturgradstunden zu senken, wurde für den Holzbau daher eine Betondecke eingeplant.



Abbildung 8: Innenaufnahme des Holzhauses. Foto: Sebastian Schels

Durch die Optimierung von Raumgeometrie, Fensterfläche und Speichermasse konnte das Haustechniksystem sehr einfach gehalten werden: Die Wärmeerzeugung erfolgt über ein vor Ort vorhandenes Biogas-Blockheizkraftwerk mit einer Wärmeübergabe an den Raum über Heizkörper. Fensterfalzlüfter sorgen in Kombination mit Ablüftern in den Badbereichen für eine kontrollierte Grundlüftung zum Feuchteschutz. Fensterlüftung je nach Laune des Nutzers bleibt jederzeit möglich. Die Häuser funktionieren ohne einen außen liegenden, variablen Sonnenschutz.

2.3. Überprüfung der Strategie

Das Konzept Einfach Bauen hat sich unter „Laborbedingungen« als erfolgreich herausgestellt. Doch wie gut funktioniert es im Praxistest? Schaffen die einfach gebauten Forschungshäuser das ganze Jahr über eine thermisch komfortable Aufenthaltsqualität und ist die dafür benötigte Energie verhältnismäßig? Um diese Fragen zu beantworten, erfasst das Forschungsteam im Zeitraum von 2021 bis Anfang 2023 eine Reihe von Daten [4]. Um das bauklimatische Verhalten der drei Bauweisen bewerten und vergleichen zu können, wird der thermische Komfort in den Innenräumen gemessen. In den Wohnungen im 2. Obergeschoss angebrachte Sensoren zeichnen die Komfortparameter Lufttemperatur, Luftfeuchte,

Strahlungstemperatur, CO₂-Gehalt, und Beleuchtungsstärke auf. Die Verbrauchsmessung untersucht die jeweiligen Verbräuche an Energie bzw. Energieträgern. Mit der Erfassung und Auswertung der Daten lässt sich überprüfen, ob der zuvor berechnete Energiebedarf in der Praxis erreicht wird. Eine Wetterstation auf dem Dach des Betonhauses liefert zuverlässig Echtzeitdaten zu Temperatur, Feuchte und Wind. Und zu guter Letzt interessiert uns der Mensch: Fühlen sich die Bewohner der Häuser wohl, entspricht ihr subjektives Komfortempfinden den gemessenen Werten? Wie sehr nehmen sie durch Heizen und Lüften Einfluss auf den Wärmeverbrauch? Welche Rückschlüsse lassen sich vom Nutzerverhalten auf die gemessenen Daten ziehen?

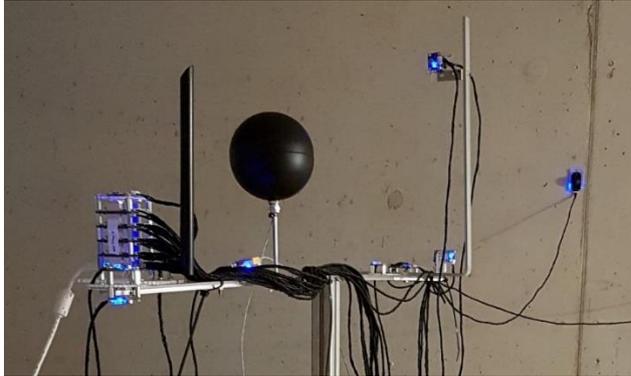


Abbildung 9: Sensoren in der 1-Zimmer-Wohnung im 2. OG des Leichtbetonhauses in Bad Aibling; Foto: TUM

3. Fazit

Viele Gebäude bleiben lange erhalten, auch wenn dies selten bei der Planung bedacht wird. Um sie langfristig nutzen zu können, sollten Veränderungen möglich und daher bereits im Planungsprozess angedacht sein. Flexible Grundrissstrukturen ermöglichen Wechsel in der Nutzung. Alterungsfähige Oberflächen garantieren die Langlebigkeit der Gebäude. Durch die Trennung von Haustechnik und Baukonstruktion können veraltete Techniksysteme leichter ersetzt werden. Technische Systeme sollten verständlich und auch bei einem abweichenden Verhalten des Nutzers noch ausreichend robust sein, um die angestrebten Ergebnisse zu erzielen. Auch ein handwerklich begabter Nutzer kann selber Schäden reparieren und Bauteil austauschen – Einfach mal Bauen!

[1] www.zukunftbau.de

[2] Nagler, F., et. al. (2018): Einfach Bauen - Abschlussbericht, TU München

[3] Einfach Bauen – ein Leitfaden, F. Nagler (Hrsg.), Birkhäuser 2021

[4] aktuelle Einblicke in die Forschung auf www.einfach-bauen.net

AKUSTIK
Schallschutzplanung – Werkzeuge

Planungstools aus der Schweiz

Stefan Schoenwald
Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung
Dübendorf, Schweiz



Planungstools aus der Schweiz

1. Einleitung

Das von der Lignum Holzwirtschaft Schweiz geleitete Projekt «Schallschutz im Holzbau» ist ein Kooperationsprojekt mit dem Ziel Schallschutzdaten für in der Schweiz übliche Holzbaukonstruktionen zu ermitteln, schalltechnisch optimierte Bauteile darzulegen und diese Daten und Erkenntnisse einem breiten Zielpublikum, also Architekten, Planern, Ingenieuren, Bauherren und Herstellern zur Verfügung zu stellen.

In der ersten Projektphase, welche massgeblich vom Aktionsplan Holz des Bundesamts für Umwelt und Industriepartnern finanziell unterstützt wurde und 2020 abgeschlossen war, wurde in Kooperation mit der Empa Abteilung Akustik und der Berner Fachhochschule in Laboruntersuchungen die Luft- und Trittschalldämmung von zahlreichen Decken und Wandsystemen, sowie die Nebenwegübertragung an einer Anzahl von Bauteilverbindungen untersucht. Der Wissenstransfer zu dieser Projektphase erfolgte über verschiedene Kanäle wie Fortbildungskurse, klassische technische Dokumentationen, aber auch über digitale Planungstools, wie zum Beispiel der Bauteilkatalog Lignumdata.ch [1], welcher bereits in der Fachwelt sehr gut etabliert ist. Andere Planungswerkzeuge sind jedoch noch in Arbeit und werden in der derzeitigen Projektphase weiterentwickelt und in Zukunft veröffentlicht. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die vorhandenen und in Arbeit befindlichen Planungstools, deren Inhalt und deren Zielgruppen. Diese Aspekte wurden zum Teil bereits detailliert in einem Fortbildungskurs des Swiss Wood Innovation Networks (S-WIN), welcher ursprünglich zum Abschluss der Projektphase 2020 geplant war und auf Grund der allgemeinen Lage jedoch erst im Oktober 2021 stattgefunden hat, behandelt. Die Tagungsunterlagen zu diesem Kurs sind wesentlich umfangreicher als dieser Beitrag und öffentlich verfügbar [2]. Daher empfehlen wir diese zur Vertiefung der Inhalte des Beitrags.

2. Wissenstransfer und Planungsleitfaden

Moderne und insbesondere digitale Planungstools stellen heutzutage eine Fülle an Daten dem Anwender zur Verfügung. Auf den ersten Blick erscheint auch die Anwendung dieser Tools sehr intuitiv. Die inzwischen vorhandenen Möglichkeiten beherbergen jedoch auch die Gefahr, dass der Anwender den Überblick verliert und die Planung in eine Sackgasse läuft oder vermeintlich schalltechnisch günstige Konstruktionen sich später bei der Umsetzung als eher nicht optimal erweisen.

Ein gewisses Grundverständnis für die technischen Zusammenhänge und mögliche Konfliktpunkte ist daher immer noch eine Grundvoraussetzung für die effiziente und zielführende Anwendung dieser Planungstools.

2.1. S-WIN Fortbildungskurs Weinfelden 2020

Der erste Schritt bei dem Wissenstransfer ist die Schulung der Anwender sowie die Vermittlung eines Mindestmasses an Verständnis hinsichtlich des Schallschutzes. Dies erfolgt in speziellen Fortbildungskursen, wie zum Beispiel dem letztjährigen «Bau- und Raumakustik im Holzbau» in Weinfelden. Diese Weiterbildungskurse finden natürlich nur punktuell statt. Die Kursunterlagen sind dann zwar noch weiterhin verfügbar [2], diese sind oft aber sehr umfangreich und die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Fachbeiträgen auf Grund der verschiedenen Autoren nicht optimal flussend.

Das Bedürfnis für solche Veranstaltungen zur Weiterbildung zum Thema Schallschutz ist in der Holzbaubranche sehr gross. Dies belegt die gute Teilnehmerzahl an dem Kurs, als auch die Fragen und intensiven Diskussionen in den Diskussionsrunden als auch der rege fachliche Austausch während des Rahmenprogramms (s. Abbildung 1).



Abbildung 1: Wissenstransfer - S-WIN Fortbildungskurs «Bau- und Raumakustik im Holzbau» Weinfelden 2021 (Quelle: www.s-win.ch www.lignumdata.ch)

2.2. Lignum Dokumentation Schallschutz

Ein Planungsleitfaden «Lignum Dokumentation Schallschutz – Decken in Holzbauweise», der in der Reihe der Lignum Dokumentationen [3] erscheinen wird, ist gerade in Arbeit. In dieser Dokumentation werden die Grundlagen, die Planung und die schalltechnische Ausführung von Trenndecken erörtert. Die Dokumentation umfasst im Wesentlichen die Beiträge des oben genannten Fortbildungskurses, welche sich mit dem Thema befassen.

2.2.1. Grundlagen

Die Wahrnehmung von Schall ist hierbei ein zentrales Thema bei den Grundlagen, da die Wahrnehmung des übertragenen Luft- und Trittschalls bzw. die Störwirkung bei den Bewohnern darüber entscheidet, ob eine Deckenkonstruktion und somit ein Gebäude als schalltechnisch gut oder schlecht empfunden wird. In der Dokumentation werden deshalb die grundlegenden Mechanismen für das menschlich Gehörempfinden und insbesondere den Trittschall betreffende objektive Bewertungsgrössen, dessen subjektive Wahrnehmung sowie davon abgeleitete Zielgrössen zur Bewertung des Trittschalls unter Berücksichtigung der tieffrequenten Schallanteile dargelegt. Die tieffrequente Trittschallübertragung wird bei entweder schlecht konstruierten oder schlecht ausgeführten Trenndecken als besonders störend wahrgenommen. Holzdeckensysteme sind in dieser Hinsicht oft leider weniger robust und anfälliger für Fehler beim Trittschall als Betondecken.

Diese Aspekte werden direkt im zweiten Kapitel, welches die notwendigen Prozesse bei der Planung des Schallschutzkonzeptes für Holzgebäude und Festlegung von sinnvollen Anforderungswerten beschreibt. Sinnvolle Anforderungswerte gehen hier insbesondere beim Trittschallschutz über die baurechtlichen Regelungen hinaus, welche in der Schweiz in der SIA 181 »Schallschutz im Hochbau« [4] festgelegt sind. Es hat sich bewährt, wenn bei Festlegung von erweiterten Anforderungen an den Trittschallschutz auch der Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz berücksichtigt wird.

Die physikalischen Phänomene und technischen Grundlagen, welche das schalltechnische Verhalten von Trenndecken bestimmen, werden ebenfalls in dieser Dokumentation kurz aufgezeigt.

2.2.2. Planung

Für die Planung von Gebäuden werden konstruktive Massnahmen an den Trenndecken, deren Ausführung, sowie deren schalltechnische Wirkung, wie zum Beispiel die Beschwerung der Rohdecke, für die verschiedenen Deckensysteme geeignete zusätzliche Fussbodenaufbauten, inklusive Terrassenkonstruktionen für Balkone und Dachterrassen, und zusätzliche Unterdecken beschrieben.

Besonderes Augenmerk wird auch auf die Flankenübertragung und deren Relevanz für verschiedene Anregung und Übertragungswege gelegt. Es werden für die Qualitätssicherung wichtige Prozesse und Abläufe bei der Planung und Identifikation von Schwachstellen aufgezeigt, sowie für die Kombination der verschiedenen Decken und Wandsystemen geeignete konstruktive Massnahmen an den Verbindungen und flankierenden Wänden, sowie deren korrekte Ausführung und akustische Wirkungsweise dargestellt.

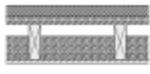
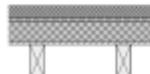
Neben der konstruktiven Ausführung wird jeweils die korrekte bautechnische Umsetzung der Massnahmen beschrieben, sowie in der Praxis häufig anzutreffenden Fehler und Gegenmassnahmen zu deren Vermeidung werden aufgezeigt.

Deckenkonstruktionen mit Massnahmen, welche sich in der Praxis sehr gut bewährt haben und die rechtlichen Anforderungen erfüllen also auch die weitergehenden schalltechnischen Zielwerte erreichen, werden dargestellt. Neben der direkten Luft- und Trittschalldämmung werden auch Angaben zu dem Aufbau und Verbindung mit bewährten flankierenden Wänden gemacht. Diese geben ein sehr gutes Bild von schalltechnisch geeigneten Kombinationen von Decken und Wänden, sowie von den zusätzlichen konstruktiven Massnahmen, welche normalerweise für die jeweilige Situation erforderlich sind um einen guten Schallschutz zu erreichen. Für die Überprüfung des Schallschutzes in der jeweiligen Einzelsituation muss jedoch zwingend ein Schallschutznachweis geführt werden um die Qualität sicherzustellen, Planungsfehler zu verhindern und allenfalls in schalltechnisch weniger kritischen Bausituation Massnahmen zu verringern und somit Kosten einsparen zu können.

Methoden zur Führung des Schallschutznachweises nach SIA 181 werden aufgezeigt. Diese basieren in erster Linie auf dem Rechenmodell der EN ISO 12354 [5], dessen Grundlagen und bestehende Umsetzungen aufgezeigt werden. Dieser Teil der Dokumentation dient aber in erster Linie als Anleitung zur Verwendung der digitalen Planungstools, welche in dem Abschnitt 3 beschrieben sind.

2.2.3. Bautechnische Umsetzung

Der Planungsleitfaden endet mit einer Dokumentation bereits realisierter Objekte im Holzbau. Hier werden neben den teils beeindruckenden wichtigen Kenndaten der Gebäude und deren Architektur, auch die konstruktive Umsetzung und gemessene Schallschutzwerte dargestellt. Dieser Teil unterstreicht damit die noch einmal abschliessend die Leistungsfähigkeit und Attraktivität von Holzgebäuden.

Konstruktion	Aufbau	erhöhte Anforderungen $D_{f,T,W} + C \geq 56$ dB $L'_{f,T,W} + C_i \leq 49$ dB $L'_{f,T,W} + C_{i,0,0,0,0} \leq 49$ dB	Mindest-Anforderung $D_{f,T,W} + C \geq 52$ dB $L'_{f,T,W} + C_i \leq 53$ dB $L'_{f,T,W} + C_{i,0,0,0,0} \leq 53$ dB
Balken-Rippen- decke mit Unterdecke 	Estrich Trittschalldämmung Beschwerung Tragschicht Balken/Rippe ¹⁾ Hohlraumbedämpfung Entkopplung ¹⁾ Bekleidung	25 mm Gipsfaser-Trockenestrich; $m' \geq 27$ kg/m ² 22 mm Holzweichfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 30$ MN/m ³ 40 mm Splitt; $m' \geq 56$ kg/m ² 25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m ² 240 mm Vollholz Faserdämmstoff 160 mm mit $5 \leq r \leq 35$ kPa ² /m ² 60 mm Schwingabhänger gummigelagert 2 x 15 mm Gipsfaser- oder Hartgipsplatte; $m' \geq 2 \times 16$ kg/m ²	25 mm Gipsfaser-Trockenestrich; $m' \geq 27$ kg/m ² 22 mm Holzweichfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 30$ MN/m ³ 40 mm Splitt; $m' \geq 56$ kg/m ² 25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m ² 240 mm Vollholz Faserdämmstoff 160 mm mit $5 \leq r \leq 35$ kPa ² /m ² 60 mm Schwingabhänger gummigelagert 2 x 15 mm Gipskartonplatte; $m' \geq 2 \times 11$ kg/m ²
Hohlkastendecke mit Beschwerung 	Estrich Trittschalldämmung ³⁾ Tragschicht Balken/Rippe Beschwerung ³⁾ Bekleidung	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m ² 30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m ³ 25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m ² 240 mm Vollholz 160 mm Splitt; $m' \geq 195$ kg/m ² 25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m ²	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m ² 30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m ³ 25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m ² 240 mm Vollholz 120 mm Splitt; $m' \geq 146$ kg/m ² 25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m ²
Massivholzdecke ⁴⁾ mit Beschwerung 	Estrich Trittschalldämmung Beschwerung ⁵⁾ Tragkonstruktion ⁵⁾	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m ² 30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m ³ 90 mm Splitt; $m' \geq 125$ kg/m ² 200 mm Vollholz; $m' \geq 90$ kg/m ²	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m ² 30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m ³ 60 mm Splitt; $m' \geq 84$ kg/m ² 200 mm Vollholz; $m' \geq 90$ kg/m ²
Holz-Beton-Verbund- Massivholzdecke 	Estrich Trittschalldämmung Beschwerung/ Tragkonstruktion ⁵⁾	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m ² 30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m ³ 120 mm Beton; $m' \geq 288$ kg/m ² 120 mm Massivholz; $m' \geq 54$ kg/m ²	60 mm Nassestrich; $m' \geq 120$ kg/m ² 30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m ³ 120 mm Beton; $m' \geq 288$ kg/m ² 120 mm Massivholz; $m' \geq 54$ kg/m ²
Holz-Beton-Verbund- Rippendecke 	Estrich Trittschalldämmung Beschwerung/ Tragschicht Balken/Rippe	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m ² 30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m ³ 140 mm Beton; $m' \geq 336$ kg/m ² 25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m ² 240 mm Vollholz	60 mm Nassestrich; $m' \geq 120$ kg/m ² 30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m ³ 140 mm Beton; $m' \geq 336$ kg/m ² 25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m ² 240 mm Vollholz

1) Die Gesamthöhe zwischen Tragschicht und Bekleidung ist massgebend.
2) Bei Leitungsführungen ist zwischen der Rohdecke und der Trittschalldämmung eine Installationsebene auszuführen (siehe Kap. 9.1).
3) Die Beschwerung bzw. ein Teil davon kann auf der Tragschicht angebracht werden.
4) Massivholzdecke aus Brettstapel, Brettschichtholz oder Brettsperholz.
5) Die Summe der flächenbezogenen Masse der Tragkonstruktion und Beschwerung ist massgebend (siehe Kap. 9.2).

Abbildung 2: Planungsleitfaden «Lignum Dokumentation Schallschutz – Decken in Holzbauweise» (Entwurf)
Übersicht und Aufbau von Deckenkonstruktionen

3. Digitale Planungstools

Eine Schlüsselrolle in der modernen Planung von Gebäuden spielen digitale Planungstools. Im Folgenden werden zwei Planungstools aus der Schweiz vorgestellt.

3.1. Bauteilkatalog Lignumdata

Der online Bauteilkatalog «Lignumdata» (lignumdata.ch) ist bereits seit einigen Jahren verfügbar und in der Planungslandschaft bereits sehr etabliert. Er wurde bereits in einem Beitrag am 8. HolzBauSpezial Bauphysik im Jahr 2017 [6] ausführlich vorgestellt. Daher ist dieses Tool im Folgenden nur kurz erläutert.

Der Bauteilkatalog enthält zur Zeit Konstruktionsdetails und Daten von verschiedenen Bauelementen aus Holz, das heisst von Deckensystemen, Trennwänden, Aussenwänden sowie Steil- und Flachdachkonstruktionen. Neben den schalltechnischen Kenngrössen zum Luft- und Trittschallschutz sind in dem Bauteilkatalog weitere Leistungsdaten zur thermischen Bauphysik (U-Wert), zur Nachhaltigkeit (zum Beispiel Umweltbelastungspunkte, Primärenergie, Treibhausgasemission) als auch Referenzen zu den Bauteildaten in der entsprechenden Lignum Dokumentation Brandschutz gegeben.

Der Vorteil dieses Bauteilkatalogs sind die vielfältigen Such- und Filtermöglichkeiten der Konstruktionsmerkmale, verwendeten Produkte oder Leistungsdaten, um so sehr gezielt und effizient eine Übersicht an möglichen Bauteilen zu erhalten, welche diese Vorgaben erfüllen.

Neben den Leistungsdaten gibt es für Planer und Ausführende auch Hinweise zu den Herstellern und deren Produkte, die für sich für die Herstellung des Bauteils eignen. Ein weiteres Highlight des Bauteilkatalogs ist die Kompatibilität mit modernen Planungswerkzeugen. Alle Konstruktions- und Leistungsdaten, sowie eine 3D-Darstellung können als sogenannte «IFC4»-Datei direkt in Building-Information-Models (BIM) übernommen werden.

The screenshot shows the Lignumdata website interface. At the top, there are navigation links for Home, Bauteile, Produkte, Erläuterungen, and Impressum. Below this is a filter section for 'KATALOG DECKE'. The main content area displays a list of ceiling components (A0090, A0092, A0094, A0105, A0107) with their respective technical specifications and acoustic performance data.

Lignum ID-Nº Grafik	Grundkonstruktion Bekleidung Herkunft Schalldämmwerte	Aufbauhöhe Gewicht U-Wert	Luft-Schalldämmwerte	Tritt-Schalldämmwerte
A0090 	Rippen / Balken mit Bodenaufbau Verifizierte Berechnung	417 mm 221 kg/m ² ≈0.391 W/m ² K	R _w 53 dB C -3 dB C ₅₀₋₃₁₅₀ -3 dB	L _w 62 dB C _T 0 dB C _{T50-2500} 1 dB
A0092 	Rippen / Balken mit Bodenaufbau Verifizierte Berechnung	392 mm 155 kg/m ² ≈0.392 W/m ² K	R _w 50 dB C -3 dB C ₅₀₋₃₁₅₀ -4 dB	L _w 65 dB C _T 1 dB C _{T50-2500} 1 dB
A0094 	Rippen / Balken mit Bodenaufbau Verifizierte Berechnung	354 mm 73 kg/m ² ≈0.425 W/m ² K	R _w 42 dB C -1 dB C ₅₀₋₃₁₅₀ -1 dB	L _w 73 dB C _T 0 dB C _{T50-2500} 0 dB
A0105 	Rippen / Balken mit Bodenaufbau und Bekleidung Verifizierte Berechnung	470 mm 244 kg/m ² ≈0.329 W/m ² K	R _w 62 dB C -4 dB C ₅₀₋₃₁₅₀ -6 dB	L _w 53 dB C _T 1 dB C _{T50-2500} 4 dB
A0107 	Rippen / Balken mit Bodenaufbau und Bekleidung Verifizierte Berechnung	445 mm 178 kg/m ² ≈0.330 W/m ² K	R _w 58 dB C -3 dB C ₅₀₋₃₁₅₀ -5 dB	L _w 57 dB C _T 0 dB C _{T50-2500} 3 dB

At the bottom of the page, there is contact information for LIGNUM - Holzwirtschaft Schweiz, including address, phone, fax, and email.

Abbildung 3: Online Bauteilkatalog «Lignumdata» (www.lignumdata.ch), Übersicht der ausgewählten Bauteile

3.2. Online Prognose Tool - Flankenübertragung

Als Erweiterung zu dem Online Bauteilkatalog «Lignumdata» ist derzeit immer noch ein Online Planungstool zur Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung in Gebäuden in Holzbauweise in Arbeit. Ein erstes Konzept des auf datenbankbasierenden Tools, welches den Grundlagen der EN ISO 12354 [5] Prognoserechnung folgt, wurde bereits in einem Beitrag am 10. HolzBauSpezial Bauphysik im Jahr 2019 [7] aufgezeigt. Seither ging die Entwicklung der notwendigen Datenbank-Strukturen an der Empa zur Bereitstellung strukturierter Bauteil- und Verbindungsdaten weiter und wird bald abgeschlossen. Einen Überblick über den Stand im Herbst wurde an dem S-WIN Fortbildungskurs [8] gegeben.

In einem Teil der Datenbank sind detaillierte strukturierte Aufbaubeschreibungen und Materialangaben der Decken- und Wandbauteile, der zusätzlichen Aufbauten, wie Fussbodenaufbauten, Unterdecken und Wandvorsatzschalen, sowie Angaben zu der Verbindung der Bauteile miteinander erfasst.

Ein zweiter Teil der Datenbank enthält die frequenzabhängigen akustischen Kennwerte, die jeweils mit den Bauteildaten in dem anderen Teil der Datenbank verknüpft sind. Diese Daten sind die Luftschalldämm-Masse und Norm-Trittschallpegel der einzelnen Übertragungswege, das heisst für die direkte Übertragung und alle relevanten Nebenwege, für die Verbindung der sogenannten «Grundbauteile», also ohne weitere zusätzliche Aufbauten an den Bauteilen. Diese Verbesserung der Luft- und Trittschalldämmung durch Fussbodenaufbauten, Unterdecken und Wandvorsatzschalen sind abhängig von dem jeweiligen Grundbauteil und zum

Teil von der Orientierung des Tragwerks, zum Beispiel ob die Bauteilverbindung in einer Wand parallel oder senkrecht zum Ständerwerk angeordnet ist. Es wird aber vereinfachend angenommen, dass sie unabhängig von der Verbindung der Bauteile an dem Bauteilknoten sind, und somit können die Verbesserungen für den jeweiligen Übertragungsweg einfach zu der spektralen Schallschutzwerten der Grundbauteile dazu addiert werden. Anschliessend werden die Wege auf bilanziert und die Einzulangaben ermittelt.

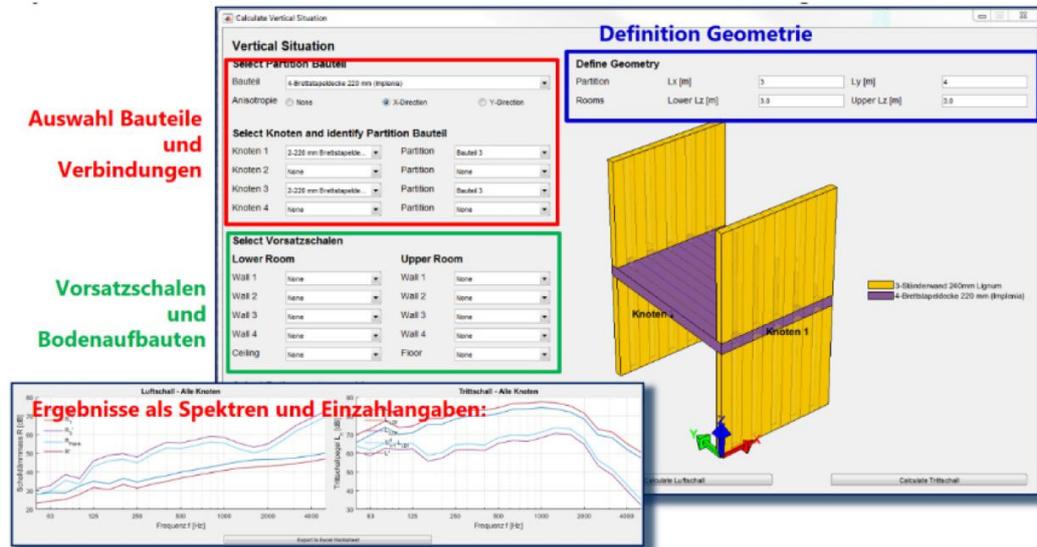


Abbildung 4: Visualisierung der Prototyp-Nutzeroberfläche beim Prognosetool für Flankenübertragung

Online-Tool – Auswahl der Datensätze

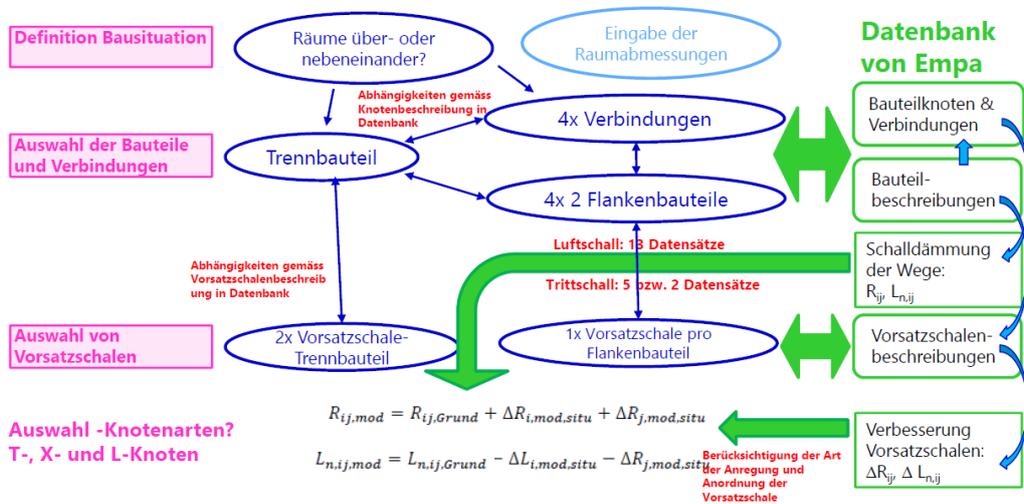


Abbildung 5: Skizze des Arbeitsablaufs und der damit verbundenen Datenbankabfragen bei der Prognose; links (magenta) Arbeitsschritte; Mitte (blau) Auswahl auf Bauteilebene; rechts (grün) Datenbankabfragen und Datenverknüpfung

Der Anwender des Prognosetools arbeitet mit einer grafischen Benutzeroberfläche, wie in Abbildung 4 prototypenhaft dargestellt ist. Dort folgt er den Arbeitsschritten die in der Prinzipskizze in Abbildung 5 auf der linken Seite in Magenta angegeben sind. Hierbei gibt der Anwender die Geometrie ein, und wählt anschliessend die Bauteile, deren Verbindungen und zusätzliche Massnahmen in verschiedenen Menüs aus (blauer Bereich in Abbildung 5). Die jeweilige getroffene Auswahl startet eine Datenbankabfrage, die entsprechend den verfügbaren Schallschutzdaten in der relationalen Datenbank die Auswahlmöglichkeiten in den übrigen Eingabefeldern generiert (grüner Bereich in Abbildung 5). Der Anwender arbeitet somit auf der Geometrie-, Bauteil- und Materialebene und die Berechnungen erfolgen, abhängig von den gewählten Kombinationen im Hintergrund. Damit soll das Prognosetool

auch für weniger akustisch versierte Anwender geeignet sein, um aber effizient zum Planungsziel zu kommen, werden Anwendungshinweise und Verfahren in den Planungslaufpfaden gegeben.

Die bisherigen akustischen Kennwerte stammen aus experimentellen Untersuchungen, welche in den Empa Laboren durchgeführt wurden. Die experimentellen Untersuchungsmethoden wurden bereits in einem Beitrag am 8. HolzBauSpezial Bauphysik HBS 2017 [8] bereits detailliert aufgezeigt. Die Experimente sind jedoch wegen der Grösse und des Umfangs der erforderlichen Versuchsobjekte sehr material-, zeit- und somit kostenaufwendig. Deshalb können diese mit einem vertretbaren Aufwand nur einzelne beispielhafte Situationen abbilden und die Datenbank füllt sich mit den so verfügbaren Verbindungsdaten nur sehr langsam. Auch oft entstehen Fragen zu der Übertragbarkeit der gemessenen Schallschutzdaten auf ähnliche Situationen, wenn zum Beispiel, die Art der gewählten Verbindungsmittel oder deren Anzahl oder Abstand von den in den experimentellen Untersuchungen abweicht. Einzelne Teilaspekte wurden bereits in Parameterstudien, zum Beispiel für Massivholzdecken und Massivholzwände im Rahmen des Forschungsprojekts untersucht [9]. Die Fülle der Anzahl an Möglichkeiten lässt aber selbst aus diesen Studien zum Teil nur vage Schlüsse zu.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die ersten Phasen des Projekts «Schallschutz im Holzbau» der Lignum in Zusammenarbeit mit der Empa Abteilung Akustik/Lärminderung und der Berner Fachhochschule in Biel sind nun abgeschlossen. Neben den Laboruntersuchungen und Untersuchungen zur Wahrnehmung insbesondere des tieffrequenten Trittschalls wurden bereits Planungstools erarbeitet. Der veröffentlichte Bauteilkatalog Lignumdata.ch ist in der Planungswelt bereits sehr etabliert. Erste Veranstaltungen zum Wissenstransfer wurden ebenfalls bereits durchgeführt. Einige weitere Planungstools, die Lignum Dokumentation «Schallschutz – Decken in Holzbauweise» und das Onlineprognosetool zur Berücksichtigung der Flankenübertragung ist gerade in Arbeit.

In einer Ende 2021 neu begonnenen Projektphase, die von dem Aktionsplan Holz des Bundesamts für Umwelt finanziell unterstützt wird, werden diese Planungswerkzeuge fertiggestellt und es sind weitere Massnahmen zur Ausbildung und dem Wissenstransfer geplant. Daneben sind im Umfang beschränkte weitere Laboruntersuchung zur Erweiterung der Datengrundlage für die Datenbanken geplant. Weitere Laboruntersuchung können mit der Unterstützung von Industriepartnern durchgeführt werden. Ein neuer Schwerpunkt der Untersuchungen an der Empa liegt in der Berechnung der Körperschallübertragung an Bauteilverbindungen mit effizienten numerischen Berechnungsmodellen, welche für Massivholzelemente entwickelt wurden. Es ist geplant mit diesen Modellen den Einfluss von verschiedenen Verbindungsmitteln und deren Anordnungen auf die Flankenübertragung detailliert zu untersuchen und damit die Datengrundlage für Prognosetools mit relativ geringem Aufwand enorm zu vergrössern.

5. Literatur und Referenzen

- [1] lignumdata.ch, <https://lignumdata.ch/>
- [2] Tagungsband 52. Fortbildungskurs Weinfelden «Bau- und Raumakustik im Holzbau» 2021, https://www.s-win.ch/wp-content/uploads/2021/10/S-WIN_Fortbildungskurs_Weinfelden_2021_Bau-Raumakustik_Tagungsband_web-2.pdf
- [3] https://www.lignum.ch/shop/lignum_dokumentationen/
- [4] SIA 181:2020, «Schallschutz im Hochbau»
- [5] EN ISO 12354-1/-2:2017 «Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen/Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen», 2017
- [6] H. Schmid «Schallschutz als integrierte BIM-Lösung», Tagungsband der 8. HolzBauSpezial Bauphysik HBS 2017, 22./23. März 2017, Bad Wörrihofen
- [6] S. Schoenwald «Flankenübertragung an Holzbetonverbund-Decken – Eingangsdaten für ein Designtool», Tagungsband der 10. HolzBauSpezial Bauphysik & Gebäudetechnik 2019, 12./13. März 2019, Bad Wörrihofen
- [7] K. Gebhardt «Prognosesoftware als Planungshilfe für den Schallschutz», Tagungsband 52. Fortbildungskurs Weinfelden «Bau- und Raumakustik im Holzbau» 2021, https://www.s-win.ch/wp-content/uploads/2021/10/S-WIN_Fortbildungskurs_Weinfelden_2021_Bau-Raumakustik_Tagungsband_web-2.pdf
- [8] S. Schoenwald «Ermittlung von schalltechnischen Planungsdaten», Tagungsband der 8. HolzBauSpezial Bauphysik HBS 2017, 22./23. März 2017, Bad Wörrihofen
- [9] S. Schoenwald, et al. «Neue Ergebnisse zum Schallschutz im Holzbau, Teil 2», https://www.sga-ssa.ch/docs/events//3_schoenwald.pdf, Herbsttagung der Schweizerischen Gesellschaft für Akustik (SGA-SSA), Sursee, 2018

Der Holzbau in der DIN 4109

Martin Schneider
Hochschule für Technik Stuttgart
Stuttgart, Deutschland



Der Holzbau in der DIN 4109

1. Einführung

Der Schallschutz in und an Gebäuden wird angesichts der Lärmbelastigung durch Außenlärm (z.B. Verkehrslärm), Nachbarschaftslärm (Luft- und Trittschall) sowie durch Lärm von gebäudetechnischen Anlagen (z.B. Aufzüge) immer wichtiger. Die DIN 4109 «Schallschutz im Hochbau» mit Ihrer fast 80jährigen Tradition beschäftigt sich mit dem Schallschutz in Bezug auf Anforderungen und mit den rechnerischen und messtechnischen Nachweisverfahren an den Schallschutz innerhalb des Gebäudes und dem Schallschutz gegenüber dem Außenlärm.

Speziell für den Holzbau sind dabei der Teil 2 mit den Rechenverfahren sowie der Teil 33 mit dem Bauteilkatalog für den Holz-, Leicht- und Trockenbau hervorzuheben. Ausgehend von den Berechnungsverfahren für den Massivbau wurden und werden diese sukzessiv für den Leichtbau und den Holzmassivbau ergänzt, korrigiert oder verändert. Bei der Berechnung der Luftschalldämmung, aber besonders bei der Berechnung der Trittschalldämmung ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen dem klassischen Massivbau und dem Leichtbau. Bei allen Typen von Hybridbauten sind dann die Rechenansätze aus beiden Bauweisen entweder passend zu wählen, zu mischen oder auch anzupassen.

Im nachfolgenden Beitrag werden die bestehenden normativen Vorgaben zur Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung für den Massiv- und Leichtbau angesprochen und die Ansätze für verschiedene Hybridbauten aufgezeigt.

2. Struktur und Inhalte der DIN 4109

Bei der letzten Überarbeitung der Normenreihe zu DIN 4109 wurden mit der Veröffentlichung von 7 Normteilen im Jahr 2016 die Vorgaben zur europäischen Harmonisierung des Schallschutzes umgesetzt. Dabei wurde die Normreihe auch völlig neu strukturiert. In DIN 4109-1 «Schallschutz im Hochbau – Mindestanforderungen» [1] finden sich Anforderungswerte, die bauaufsichtlich verbindlich einzuhalten sind. Im Teil 2 der DIN 4109 [2] sind die Rechenverfahren zur Berechnung des Schallschutzes beschrieben. Dabei werden aus Bauteildaten (z.B. Schalldämm-Maß, Stoßstellendämm-Maß, ...) die den Schallschutz des Gebäudes beschreibenden Größen (z.B. Bau-Schalldämm-Maß, Norm-Trittschallpegel, ...) berechnet. Die Rechenalgorithmen sind dabei der Normenreihe DIN EN ISO 12354 entnommen und teilweise auf die Bauweise in Deutschland angepasst. Die Normteile 31 bis 36 der DIN 4109 bilden den sogenannten «Bauteilkatalog». Hier sind die schalltechnisch relevanten Bauteildaten gelistet. Für den Massivbau ist das der Teil 32 [3] und für den Leichtbau der Teil 33: Schallschutz im Hochbau – Teil 33: «Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Holz-, Leicht- und Trockenbau» [4]. Im Teil 4 zu DIN 4109 werden dann noch die messtechnischen Nachweise behandelt.

Im August 2020 ist dann noch der Teil 5 zu DIN 4109: «Schallschutz im Hochbau – Teil 5: Erhöhte Anforderungen» hinzugekommen. Dieser in der Regel zusätzlich privatrechtlich zu vereinbarende Normenteil beschreibt, wie im Namen ausgedrückt, gegenüber den Mindestanforderungen erhöhte Anforderungen. Diese erhöhten Anforderungen werden im üblichen Geschosswohnungsbau allerdings von vielen Baubeteiligten bereits als Standard betrachtet und werden vielfach planerisch umgesetzt. Weitere über diese «erhöhte Anforderungen» der DIN 4109-5 hinausgehende Stufen zur Beschreibung eines erhöhten Schallschutzes finden sich z.B. in VDI 4100 oder im DEGA-Schallschutzausweis.

Die Erarbeitung und die Weiterbearbeitung der Normenreihe DIN 4109 erfolgt in drei parallel arbeitenden Normenausschüssen (NA) innerhalb des DIN im NA-Bau. Der NA 005-55-74 «Anforderungen an den Schallschutz» bearbeitet den Teil 1 mit den Mindestanforderungen und den Teil 5 mit den erhöhten Anforderungen. Der NA 005-55-75 «Nachweisverfahren, Bauteilkatalog, Sicherheitskonzept» bearbeitet den Teil 2 mit den Rechenverfahren und den Bauteilkatalog mit den Teilen 31 bis 36. Der NA 005-55-76 «Messtechnische Nachweise» regelt im Teil 4, wie messtechnischen Nachweise erbracht werden können.

Der Nachweis des geforderten Schallschutzes erfolgt in Deutschland in der Regel rechnerisch in der Planungsphase und nicht, wie im europäischen Ausland durchaus üblich, durch eine messtechnische Überprüfung nach der Erstellung des Gebäudes. Während für den bauordnungsrechtlichen Nachweis nur in Ausnahmefällen zusätzlich ein messtechnischer Nachweis zu erbringen ist, wird privatrechtlich ein meist erhöhter Schallschutz deutlich häufiger messtechnisch überprüft.

Die Anforderungen an den Schallschutz werden in DIN 4109 an die bewerteten Einzahlangaben: das bewertete Bau-Schalldämm-Maß R'_{w} , die bewertete Norm-Schallpegeldifferenz $L'_{n,w}$ und an den maximalen bewerteten Norm-Schalldruckpegel $L_{AF,max}$ von gebäudetechnischen Anlagen gestellt. Dabei wird bislang nur der Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz bewertet. Eine Erweiterung des Frequenzbereichs zu tiefen Frequenzen (z.B. bis 50 Hz) besonders bei der Bewertung des Trittschalls wird zwar diskutiert, eine normative Umsetzung bei den Anforderungen in DIN 4109-1 ist aber bislang nicht in Sicht.

Die Berechnung des Schallschutzes in DIN 4109-2 erfolgt ebenfalls mit Einzahlangaben. Die entsprechenden Eingangsdaten hierzu finden sich als Einzahlwerte im Bauteilkatalog der DIN 4109.

Es ist vorgesehen, die DIN 4109 in allen Teilen inhaltlich und redaktionell zu überprüfen und zu überarbeiten. Bis Ende dieses Jahres sollen hierzu Arbeitsdokumente erarbeitet werden. Besonders im Hinblick auf die Anforderungen im Bereich des Außenlärms sowie bei den Berechnungsverfahren zur flankierenden Übertragung beim Trittschall werden sich voraussichtlich Änderungen ergeben, aber auch in dem Bauteilkatalog zum Leichtbau sind dann umfangreiche Ergänzungen vorgesehen.

3. Rechenverfahren für Massiv- und Leichtbau

3.1. Rechenverfahren Stand 2018

In DIN 4109-2 erfolgt die Berechnung von Luft- und Trittschallschutz für Massivbau und für Leichtbau unterschiedlich. Wesentlicher Unterschied dabei ist die prinzipielle Betrachtung von Vorsatzkonstruktionen und die Berechnung der flankierenden Übertragung.

Beim **Massivbau** wird eine Vorsatzkonstruktionen (z.B. schwimmender Estrich, Unterdecke, Wärmedämm-Verbundsystem, Vorsatzschale, ...) als separates Bauteil mit entsprechender Einzahlangabe betrachtet: z.B. bewertete Luftschallverbesserung ΔR_w , bewertete Trittschallminderung ΔL_w , Diese Bauteildaten können in DIN 4109-34 aus der Resonanzfrequenz des Systems berechnet werden. Sie werden dann zu den Eingangswerten der massiven Trennbauteile (bewertetes Schalldämm-Maß R_w , bewerteter äquivalenter Normtrittschallpegel $L_{n,0,eq,w}, \dots$) addiert bzw. bei der Berechnung der Flankenübertragung entsprechend berücksichtigt.

Beim **Leichtbau** sind die Vorsatzkonstruktionen Teil des betrachteten Bauteils. Beispielsweise besteht die Leichtbaudecke aus Tragkonstruktion, der Beplankung und dem Fußbodenaufbau mit schwimmendem Estrich. Diesem Gesamtbauteil werden dann Bauteileigenschaften wie das bewertete Schalldämm-Maß R_w oder der bewerteter Normtrittschallpegel $L_{n,w}$ zugeordnet.

Weiterhin unterscheiden sich Massiv- und Leichtbau in Bezug auf die Berechnung der flankierenden Übertragung.

Im **Luftschall** werden für die flankierenden Bauteile die bewerteten Flankenschalldämm-Maße $R_{ij,w}$ auf den möglichen Schallübertragungswegen ermittelt, energetisch aufsummiert und zum Schalldämm-Maß des trennenden Bauteils addiert. Beim **Massivbau** wird an der betrachteten Stoßstelle das bewertete Flanken-Schalldämm-Maß $R_{ij,w}$ für jeden Übertragungsweg ij über das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} berechnet.

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w}}{2} + \frac{R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \lg \frac{S_S}{l_0 l_f} \quad (1)$$

Im **Leichtbau** sind für die Stoßstellen Norm-Flankenschallpegeldifferenzen $D_{n,f,w}$ für unterschiedliche Stöße in DIN 4109-33 tabelliert. Diese Norm-Flankenschallpegeldifferenz umfassen pauschal alle möglichen Übertragungswege des betrachteten Flankenbauteils.

Beim **Trittschall** wird bislang der Einfluss der flankierenden Übertragung sehr pauschal über Korrekturwerte berücksichtigt. Beim **Massivbau** ergibt sich ein Korrekturwert K aus dem Verhältnis der flächenbezogenen Massen des trennenden Bauteils zur mittleren flächenbezogenen Masse der flankierenden Bauteile.

$$L'_{n,w} = L_{n,eq,0,w} + \Delta L_w + K \quad (2)$$

Im **Leichtbau** wird die flankierende Trittschallübertragung über die beiden Korrekturwerte K_1 und K_2 berücksichtigt. Der Korrekturwert K_1 beschreibt dabei die direkte Übertragung zwischen Leichtbaudecke und Leichtbauwand, der Korrekturwert K_2 die Schallübertragung vom schwimmenden Estrich auf die flankierende obere Leichtbau-Wand in Abhängigkeit der Art des Estrichs (Fertigteilestrich, mineralisch gebundener Estrich, etc.).

3.2. Vorschläge Berechnungen Trittschall-Flankenübertragung

In DIN 4109-2 soll zukünftig die Berücksichtigung der flankierende Trittschallübertragung nicht mehr pauschal über die Korrekturwerte K_1 und K_2 erfolgen. Es ist geplant für jede Flanke getrennt den Norm-Flankentrittschallpegel $L_{n,ij,w}$ zu berechnen und die Gesamtübertragung durch energetische Summation der direkten und der flankierenden Anteile zu ermitteln [5].

Für den **Massivbau** kann der bewertete Norm-Trittschallpegel $L_{n,d,w}$ der Trenndecke und der bewertete Norm-Flankentrittschallpegel $L_{n,ij,w}$ der flankierenden Wände entsprechend nachfolgender Gleichungen berechnet werden:

$$L_{n,d,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w \quad (3)$$

$$L_{n,ij,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - \frac{(R_{i,w} - R_{j,w})}{2} - \Delta R_{j,w} - K_{ij} - 10 \lg \frac{S_i}{l_{ij}} \quad (4)$$

$L_{n,ij,w}$	bewertete Norm-Flankentrittschallpegel auf dem Weg ij (Decke - Flanke)
$L_{n,eq,0,w}$	bewerteter äquivalenter Norm-Trittschallpegel der Rohdecke
ΔL_w	bewertete Trittschallminderung der Deckenauflage
$R_{j,w}, R_{j,w}$	bewertetes Schalldämm-Maß des Bauteils i (Massivdecke) bzw. des massiven flankierenden Bauteils j im Empfangsraum
$\Delta R_{j,w}$	bewertete Verbesserung durch eine Vorsatzschale vor dem flankierenden Bauteil im Empfangsraum
K_{ij}	Stoßstellendämm-Maß an der Stoßstelle zwischen dem Bauteil i und dem Bauteil j
S_i	Deckenfläche
l_{ij}	gemeinsame Kantenlänge

Dabei werden vom bewerteten äquivalenten Normtrittschallpegel $L_{n,0,eq,w}$ der Rohdecke die gesamte bewertete Trittschallminderung ΔL_w , die halbe Differenz der bewerteten Schalldämm-Maße der Rohdecke und des massiven flankierenden Bauteils $0,5(R_{i,w} - R_{j,w})$, die bewertete Verbesserung durch eine Vorsatzschale vor dem flankierenden Bauteil j im Empfangsraum $\Delta R_{j,w}$, das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} sowie ein geometrischer Korrekturwert zur Berücksichtigung der Verhältnisse von Trennfläche zur gemeinsamen Kantenfläche subtrahiert.

Für den **Leichtbau** werden weiterhin entsprechend nachfolgender Abbildung 1 zwei flankierende Übertragungswege betrachtet, der Weg D_f und der Weg D_{ff} . Nun erfolgt diese Betrachtung allerdings für jede Flanke getrennt.

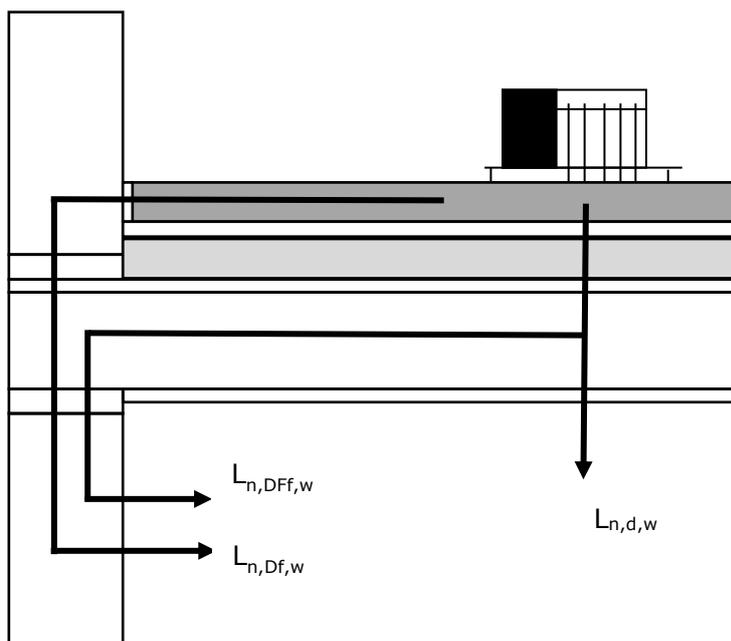


Abbildung 1: Trittschall-Übertragungswege im Leichtbau

Der bewertete Norm-Trittschallpegel im Bau ergibt sich aus der energetischen Summation der verschiedenen Übertragungswege. Sind Laborwerte für den bewerteten Norm-Flankentrittschallpegel der Decke mit Flankenbauteil vorhanden, können diese entsprechend der nachfolgenden Gleichungen auf die Bausituation übertragen werden.

$$L_{n,Df,w} = L_{n,Df,lab,w} - \Delta R_{j,w} - \Delta K_{ij} - 10 \lg \frac{S_i}{l_{ij}} \quad (5)$$

$$L_{n,DFf,w} = L_{n,DFf,lab,w} - \Delta R_{ij,w} - \Delta K_{ij} - 10 \lg \frac{S_i}{l_{ij}} \quad (6)$$

Dabei bedeuten:

$L_{n,Df,w}$	bewerteter Norm-Flankentrittschallpegel auf dem Weg Df (Decke - Flanke)
$L_{n,DFf,w}$	bewerteter Norm-Flankentrittschallpegel auf dem Weg DFF (Deckenauflage - Flanke - Flanke)
$L_{n,Df,lab,w}$	bewerteter Norm-Flankentrittschallpegel auf dem Weg Df (Decke - Flanke), ermittelt im Labor (bzw. nach Gleichung (7))
$L_{n,DFf,lab,w}$	bewerteter Norm-Flankentrittschallpegel auf dem Weg DFF (Deckenauflage Flanke - Flanke), ermittelt im Labor
$\Delta R_{j,w}$	bewertete Verbesserung durch eine Vorsatzschale vor dem flankierenden Bauteil j im Empfangsraum
ΔK_{ij}	Verbesserung des Stoßstellendämm-Maßes an der Stoßstelle zwischen dem Bauteil i und dem Bauteil j durch eine elastische Zwischenschicht im Deckenstoß einer Massivholzflanke
S_i	Fläche des Bauteils i (Trenndecke)
l_{ij}	gemeinsame Kantenlängenfläche zwischen dem Bauteil i (Trenndecke) und dem Bauteil j (Flankenbauteil im Empfangsraum)

Sind keine Laborwerte vorhanden, können die bewerteten Norm-Flankentrittschallpegel auf dem Weg Df mit Hilfe der Tabelle 3 der DIN 4109-2 aus dem Normtrittschallpegel der Decke $L_{n,d,w}$ und dem in Tabelle 3 gelisteten Wert K_1 berechnet werden:

$$L_{n,Df,lab,w} = 10 \lg(10^{0,1(L_{n,d,w} + K_1)} - 10^{0,1(L_{n,d,w})}) \quad (7)$$

Für den Weg DFF können die Werte für $L_{n,DFf,lab,w}$ direkt aus der rechten Spalte in Tabelle 4 der DIN 4109-2 für unterschiedliche flankierende Wandaufbauten entnommen werden.

3.3. Vorschläge Berechnungen Massivholzbau

Der Massivholzbau wird bislang in der DIN 4109 Reihe nur sehr sporadisch abgedeckt. Im aktuellen Teil 33 finden sich unter Abschnitt 4.1.3 nur zwei Datensätze zur Schalldämmung mehrschaliger Massivholzwände und unter 4.3.1.4.4 noch Daten zur Luft- und Trittschalldämmung von Brettstapeldeckenkonstruktion.

Zukünftig soll der Luft- und Trittschallschutz von Massivholzkonstruktionen wie im Massivbau üblich direkt aus der flächenbezogenen Masse m'_{ges} der Holzmassivkonstruktion mit nachfolgenden Formeln ermittelt werden:

$$R_w = 25 \lg \frac{m'_{ges}}{m'_0} - 7 \text{ dB} \quad (8)$$

m'_{ges} ist dabei die flächenbezogene Masse des Massivholzbauteils inklusive einer direkt aufgetragenen Beplankung und zusätzlich bei Decken von aufgetragenen Schüttungen. Die bewerteten Schalldämm-Maße von Wandkonstruktionen aus Massivholz mit Vorsatzschalen und Gebäudetrennwände in Massivholzbauweise sind weiterhin tabellarisch im Teil 33 zu finden. Eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Daten findet sich im Holzbauhandbuch [6].

Der Trittschallschutz von Massivholzdecken kann ebenfalls aus der flächenbezogenen Masse der Massivholzdecke (einschließlich einer aufgetragenen Schüttung und direkt angebrachter Beplankung) mit Hilfe nachfolgender Formeln ermittelt werden:

$$L_{n,eq,0,w} = 157 - 35 \lg \frac{m'_{ges}}{m'_0} \text{ dB} \quad (9)$$

Der Normtrittschallpegel $L_{n,w}$ der Deckenkonstruktion kann dann aus dem äquivalenten Norm-Trittschallpegel der Massivholzdecke und der Trittschallminderung durch den schwimmenden Estrich ΔL_w bestimmt werden.

$$L_{n,w} = L_{n,eq,0,w} + \Delta L_w \quad (10)$$

Die Trittschallminderung durch den schwimmenden Estrich kann wie im Massivbau in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz des Estrichaufbaus bestimmt werden.

Die flankierende Trittschallübertragung im Massivholzbau wird wie beim Trittschall im Leichtbau berechnet.

4. Hybridbauten

Unter Hybridbauten werden hier Bauwerke betrachtet, die aus Bauteilen des Leichtbaus und des Massivbaus bestehen. Hybride Bauteile wie Holzbetonverbunddecken werden nachfolgend nicht betrachtet.

In DIN 4109-2: 2018 werden bereits erste Ansätze zur Behandlung von Hybridbauten gemacht. Beispielsweise werden im Abschnitt 4.2.5 «Luftschalldämmung im Skelettbau und bei Mischbauweisen» Angaben zu Stoßstellendämm-Maßen für Stöße aus Massiv- und Leichtbauelementen gemacht. Grundsätzlich wird im Luftschall bei kombinierten Massiv- und Leichtbauteilen im Holz-, Leicht- und Trockenbau die flankierende Übertragung über Leichtbauteile durch die bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ berücksichtigt.

In DIN 4109-33:2016 sind für einige wenige Fälle von Mischkonstruktionen Norm-Flankenschallpegeldifferenzen für einzelne Konstruktionen angegeben. Beispielsweise kann für die Schallübertragung von Metallständerwänden oder Wänden in Holztafelbauweise über ein massives trennendes Bauteil ($m' \geq 350 \text{ kg/m}^2$) eine Norm-Flankenschallpegeldifferenz von $D_{n,f,w} = 76 \text{ dB}$ angesetzt werden. Für Dächer sind in Abhängigkeit des Anschlusses der Trennwand an das Dach in den Tabellen 31 bis 35 entsprechende Werte für Dächer mit Auf- oder/und Zwischensparrendämmung und unterschiedlichen Dämmstoffen angegeben.

Die Schallübertragung zwischen Massivbauteilen mit angeschlossenen Leichtbauteilen wird wie im Massivbau berechnet, wobei die geringe Stoßstellendämmung der angeschlossenen Leichtbaukonstruktionen über einen Mindestwert der Stoßstellendämmung $K_{ij,min}$ berücksichtigt wird.

Bei der Berechnung der Trittschalldämmung von Massivdecken sind flankierende Leichtbauteile und Bauteile mit Vorsatzkonstruktionen bislang nicht zu berücksichtigen.

Zur Berechnung der Trittschalldämmung von Leichtbaudecken und flankierenden Massivwänden gibt es bislang in den verschiedenen Normenteilen keine Regelungen.

4.1. Massivbauteile mit Massivholzwänden

Stahlbetondecken mit Massivholzwänden finden sich unter anderem aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades und einer damit verbundenen kurzen Bauzeit immer häufiger im Geschosswohnungsbau, häufig auch in Verbindung mit massiven Treppenhauswänden. Bei der vertikalen Schallübertragung bilden die Stahlbetondecken die trennenden Elemente, bei der horizontalen Übertragung sind es meist die Massivholzbauteile. Massivbauelemente und Holzmassivelemente treten als Trennbauteile und als flankierende Bauteile auf.

Der **Luftschallschutz** der Trenndecken und -wände ergibt sich dann aus Direkt- und Flankendämmung, wobei hier wie im reinen Massivbau mit der Gleichung (1) das Flankenschalldämm-Maß berechnet wird. Bislang nicht geregelt ist, wie das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} an der Bauteilverbindung Massivholzbauteil - Massivbauteil zu berechnen ist, da hier die konstruktive Ausbildung der Stoßstelle den Wert bestimmt. Als erste Abschätzung kann das Stoßstellendämm-Maß von durchlaufenden Massivbauteilen, an die Massivholzbauteile angeschlossen werden, mit $K_{ij} = 3\text{ dB}$ abgeschätzt werden. Für die Übertragung von Massivholz auf Massivholzbauteil über das Massivbauteil hinweg können Stoßstellendämm-Maße von $K_{ij} = 24\text{ dB}$, entsprechend Abbildung 2 für einen X-Stoß, bzw. von 21 dB für einen T-Stoß angesetzt werden. Für die Übertragung zwischen Massivholz und Massivbauteil sind es 14 dB , die angesetzt werden können [7]. Inwieweit allerdings in einer überarbeiteten DIN 4109 Stoßstellendämm-Maße für solche Hybridbauweisen gelistet werden, ist noch unklar. Angaben zu im Labor ermittelten Stoßstellendämm-Maßen finden sich auch in [8] und [9].

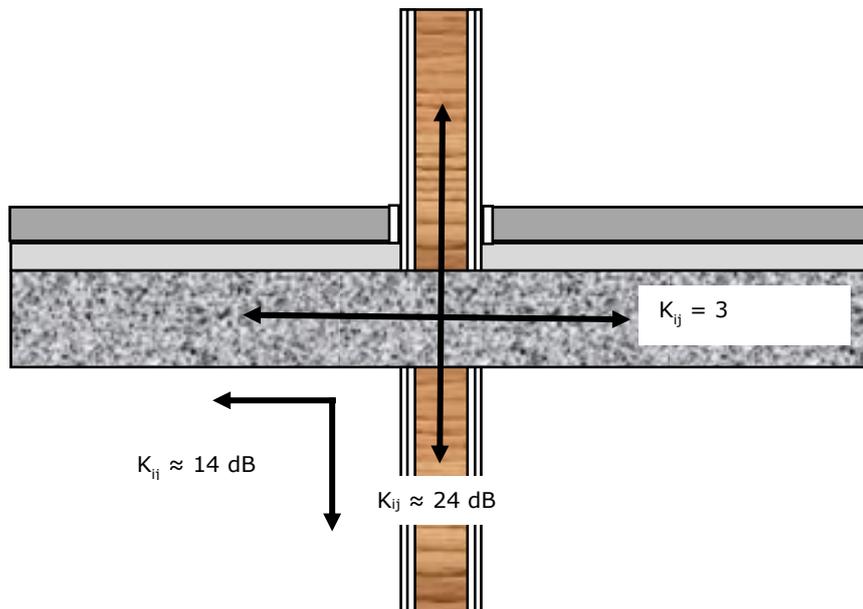


Abbildung 2: Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für einen Kreuzstoß aus Massivholzbauteil und Massivbauteil

Der bewertete Norm-Trittschallpegel im Bau wird ebenfalls wie im Massivbau berechnet. Für die direkte Übertragung über die Stahlbetondecke kann vom äquivalenten bewerteten Normtrittschallpegel der Rohdecke die bewertete Trittschallminderung des schwimmenden Estrichs abgezogen werden. Die bewerteten Norm-Flankentrittschallpegel werden ebenfalls, wie im Massivbau nach Gleichung 4 berechnet. In diesem Fall kann der Weg DFF entfallen, obwohl es sich um flankierende Holzbauwände handelt.

4.2. Trennende Massivbauteile mit flankierenden Leichtbauteilen

Beim **Luftschall** wird die flankierende Übertragung von Leichtbauteilen über deren bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ berechnet. Normativ finden sich nur wenige Werte hierfür, wobei die bislang genannten Werte sehr groß sind (z.B. $D_{n,f,w} = 76$ dB für Holzständer- und GK-Wände bei Trennbauteilen mit $m' \geq 350$ kg/m²). Häufig kann die flankierende Übertragung der Leichtbauteile bei dieser Bauweise deshalb vernachlässigt werden. Befindet sich allerdings vor dem trennende Massivbauteil empfangsraumseitig eine Vorsatzkonstruktion, so ist bei flankierenden Leichtbaukonstruktionen deren Flankendämmung zu berücksichtigen. Eine erste konservative Abschätzung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz von Leichtbauteilen, die an Massivbauteile angeschlossen sind, ist ein Wert, der 10 dB über dem Direktschalldämm-Maß des Trennbauteils liegt.

Beim **Trittschall** kann die flankierende Übertragung von Leichtbauteilen über deren bewertete Norm-Flankentrittschallpegeldifferenz $L_{n,ij,w}$ berechnet werden. Auch hierzu finden sich bislang normativ nur wenige Angaben. Die flankierende Trittschallübertragung von Leichtbauteile bei massiven Trenndecken wird normativ bislang allerdings gar nicht berücksichtigt. Hierzu wird derzeit eine konservative Berechnung durch einen Abminderung von 10 dB gegenüber der Direktübertragung als ein erster Ansatz diskutiert.

4.3. Trennende Leichtbauteile mit flankierenden Massivbauteile

Trennende Leichtbauteile, wie beispielsweise Holz- oder Gipskarton-Ständerwände, treten immer wieder mit massiven Außenwänden auf. Die Berechnung der flankierenden Übertragung erfolgt für den Weg Massivbauteil - Massivbauteil (in der Regel Weg Ff) über die bewerteten Schalldämm-Maße der massiven Bauteile und mit dem Mindestwert des Stoßstellendämm-Maßes $K_{ij,min}$. Die Schallübertragung über die gemischten Übertragungswege (vom Leichtbauteil auf das Massivbauteil und vom Massivbauteil auf das Leichtbauteil) werden hier nicht betrachtet. Aufgrund der geringen Stoßstellendämmung durch die leichte Trennwand ist besonders im Geschosswohnungsbau bei leichtem wärmedämmenden massiven Außenmauerwerk aus Lochsteinen oder aus Porenbeton Vorsicht angebracht [10,11].

Trennende leichte Decken in Verbindung mit massiven Wänden treten vor allem im Altbau als Holzbalkendecke auf. Beim Luftschall wird die flankierende Übertragung wie zuvor nur auf dem Weg Ff mittels bewertetem Schalldämm-Maß der Wand und Mindestwert des Stoßstellendämm-Maßes $K_{ij,min}$ ermittelt. Auch hier erfolgt keine Berücksichtigung der gemischten Übertragungswege. Bei der Berechnung der Trittschallübertragung der Holzbalkendecke kann die flankierende Schallübertragung über massive Wände durch entsprechende Korrekturwerte K_1 berücksichtigt werden.

5. Zusammenfassung

Mit einer Überarbeitung der Rechenverfahren in DIN 4109-2 bezüglich der Berechnung des Trittschallschutzes und der Überarbeitung der Bauteilkataloge hinsichtlich der Daten zur flankierenden Übertragung von Leichtbauteilen werden gegenüber der derzeitigen DIN 4109 wesentlich mehr hybride Bauweisen und Baukonstruktionen normativ nachweisbar sein. Die flankierende Übertragung rückt auch bei diesen Bauteilen in den Mittelpunkt des Normungsgeschehens. Mit dieser detaillierten Betrachtung der verschiedenen flankierenden Übertragungswege ergibt sich eine wesentlich genauere Prognose des zu erwartenden Schallschutzes.

6. Literaturverzeichnis

- [1] DIN 4109-1:2018-01 Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen
- [2] DIN 4109-2:2018-01 Schallschutz im Hochbau – Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen
- [3] DIN 4109-32:2016-07 Schallschutz im Hochbau – Teil 32: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Massivbau
- [4] DIN 4109-33:2016-07 Schallschutz im Hochbau – Teil 33: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Holz-, Leicht- und Trockenbau
- [5] Rabold, A.; Schneider, M.; Fischer, H.-M., Zeitler, B.: Neue Berechnungsverfahren zur Trittschallübertragung; Bauphysik 42 (2020), Heft 4; S. 160-172
- [6] Blödt, A., Rabold, A., Halstenberg, M., Ecker, T., Huber, A., Huissel, L., Löffler, S., Scheuerpflug, M., Schallschutz im Holzbau – Grundlagen und Vorbemessung, holzbau handbuch, REIHE 3, TEIL 3, FOLGE 1, Holzbau Deutschland-Institut e.V., 2019
- [7] Schneider, M., Zeitler, B., Blödt, A.: Schallschutz im Hybridbau am Beispiel eines MFH mit Massivholzwänden und Stahlbetondecken, Fortschritte der Akustik - DAGA 2021, Wien, S. 176 – 179
- [8] M. Schneider, A. Ruff, B. Zeitler und J. Weinhold: Horizontale Stoßstellendämmung von Brettsperrholzwänden, Tagungsband DAGA 2019 - 45. Jahrestagung für Akustik, 18.-21. März 2019, Rostock, ISBN 978-3-939296-14-0, S. 591-594
- [9] A. Ruff, M. Schneider, B. Zeitler und J. Weinhold: Laboruntersuchungen zur Stoßstellendämmung von Brettsperrholzwänden und Spannbeton-Fertigdecken, Tagungsband DAGA 2019 - 45. Jahrestagung für Akustik, 18.-21. März 2019, Rostock, ISBN 978-3-939296-14-0, S. 595-598
- [10] Schneider, M.; Naumann, K., Zeitler, B.: Flankenübertragung von Hochlochziegel-mauerwerk mit Leichtbau-Trennwänden; Bauphysik 43 (2021), Heft 4; S. 243-257
- [11] Naumann, K., Schneider, M., Zeitler, B.: Schallübertragung von Hochlochziegel-mauerwerk bei leichten mehrschaligen Trennwänden, Fortschritte der Akustik - DAGA 2021, Wien, S. 188-191

Schallschutzplanung und BIM im Holzbau – ein Zwischenstand

Camille Châteaueux-Hellwig
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Schallschutzplanung und BIM im Holzbau – ein Zwischenstand

1. Einleitung

Die Bauindustrie gehört zu den weltweit größten Verbrauchern von Material und Energie und trägt stark zur CO₂-Emission bei [1]. Die Holzbauweise bildet eine Möglichkeit nachhaltiger zu bauen. Dies betrifft nicht nur die Produktion sondern auch die Wiederverwertung beim Rückbau [2]. Diese Bauweise stellt jedoch Architekten und Planer vor vielen planerischen Herausforderungen, da sie sich in vielen Punkten vom klassischen Betonbau unterscheidet. Aber auch hier spielen die korrekten Planungsentscheidungen eine wichtige Rolle für den Erfolg des Projekts und die Zufriedenheit der späteren Nutzer.

Eine der schwierigsten konstruktiven Entscheidungen im Holzbau betrifft den Schallschutz. Während bei der Statik und dem Brandschutz die Einhaltung von Vorschriften der Sicherheit dient, betreffen Entscheidungen zum Schallschutz neben der Zufriedenheit der späteren Nutzer auch deren Gesundheit. Die WHO hat eine Verbindung zwischen Lärm und verschiedenen Krankheiten gefunden, wie kardiovaskuläre Erkrankungen, Schlafstörungen, kognitive Beeinträchtigung bei Kindern, Tinnitus und viele mehr [3].

Um die des Schallschutzes zu erleichtern mangelt es bisher an Planungswerkzeugen, die die Vielfältigkeit der Holzbauweise berücksichtigen.

Der Trend hin zu mehr Digitalisierung bietet hier eine Lösung: indem der Holzbau für die Planung des Schallschutzes auf Bauwerkinformationsmodelle zugreift und mit diesen Daten anhand der Konstruktionsdetails relevante Kennzahlen aus bewährten Berechnungen oder Datenbanken ausliest.

2. Open BIM mit IFC

Die Nutzung von Bauwerkinformationsmodellen ist in unterschiedlicher Weise möglich. Während closed BIM Ansätze mit unterschiedlicher Software eines einzelnen Anbieters arbeiten, beschäftigen sich open BIM Ansätze mit der herstellerübergreifenden Datenübergabe. Dazu werden herstellernerneutrale Datenformate gebraucht, die von allen Softwareprodukten geschrieben und gelesen werden können.

Das Format der Industry Foundation Classes (IFC) ist ein von buildingSMART entwickeltes und standardisiertes Datenschema zum herstellernerneutralen Austausch digitaler Gebäudemodelle in deren gesamten Lebenszyklus. Das Schema ist in der ISO 16739 [4] normiert und bietet die Möglichkeit neben der geometrischen Repräsentation des Bauobjektes auch semantische Informationen zu speichern. Diese sind zum Beispiel Informationen zu Raum- und Bauteilstrukturen, sowie zu Bauteilkomponenten und ihren Eigenschaften. Somit bildet IFC als herstellernerneutrales Schema die Grundlage vieler Big Open BIM Ansätze.

Abbildung 1 zeigt die Datenstruktur einer IFC-Datei in stark vereinfachter und verkürzter Form. Die einzelnen Bauelemente liegen im Gebäude in unterschiedlichen Geschossen (`IfcBuildingStoreys`). Die Zuordnung erfolgt mit den Relationen `IfcRelAggregates` und `IfcRelContainedInSpatialStructure`. Die Informationen zur Geometrie wird in Entitäten gespeichert, die dem `IfcProductDefinitionShape` untergeordnet sind. Die Position der Elemente ist mit jeweils lokalen Koordinatensystemen (`IfcLocalPlacement`) mit dem globalen Koordinatensystem des Gebäudes verknüpft. Angaben zum Material sind bei Bauteilen ebenfalls vorhanden. Dafür sind die einzelnen Materialien (`IfcMaterial`) in Schichten aufgeteilt (`IfcMaterialLayer`). Im `IfcMaterialLayerSet` werden die einzelnen Schichten der Reihe nach aufgelistet und beschreiben so z.B. den Bauteilaufbau einer Außenwand. Diese Liste an Materialschichten wird dann über die Relation `IfcRelAssociatesMaterial` an die Bauteile angeheftet.

Zusätzlich ordnet die Relation `IfcRelVoidsElement` Bauteilöffnungen für Fenster und Türen dem Bauteil zu und in diesen Öffnungen befinden sich dann die Tür- oder Fensterelemente (`IfcDoor`, `IfcWindow`).

Manche Bauteile haben besondere Eigenschaften, die anhand von Property Sets mit der Relation `ifcRelAssignsProperty` zugeordnet werden. In einem solchen Property Sets können dann verschiedene Eigenschaften wie der U-Wert oder die Brandschutzklasse des Bauteils angegeben werden. Es existiert eine ganze Reihe vordefinierter Property Sets. Zusätzlich können benutzerdefinierte Property Sets im Rahmen eines Projekts erstellt werden. Hier ist die Absprache zwischen den Planern und Gewerken essentiell, um einen einheitlichen Standard fest zu legen.

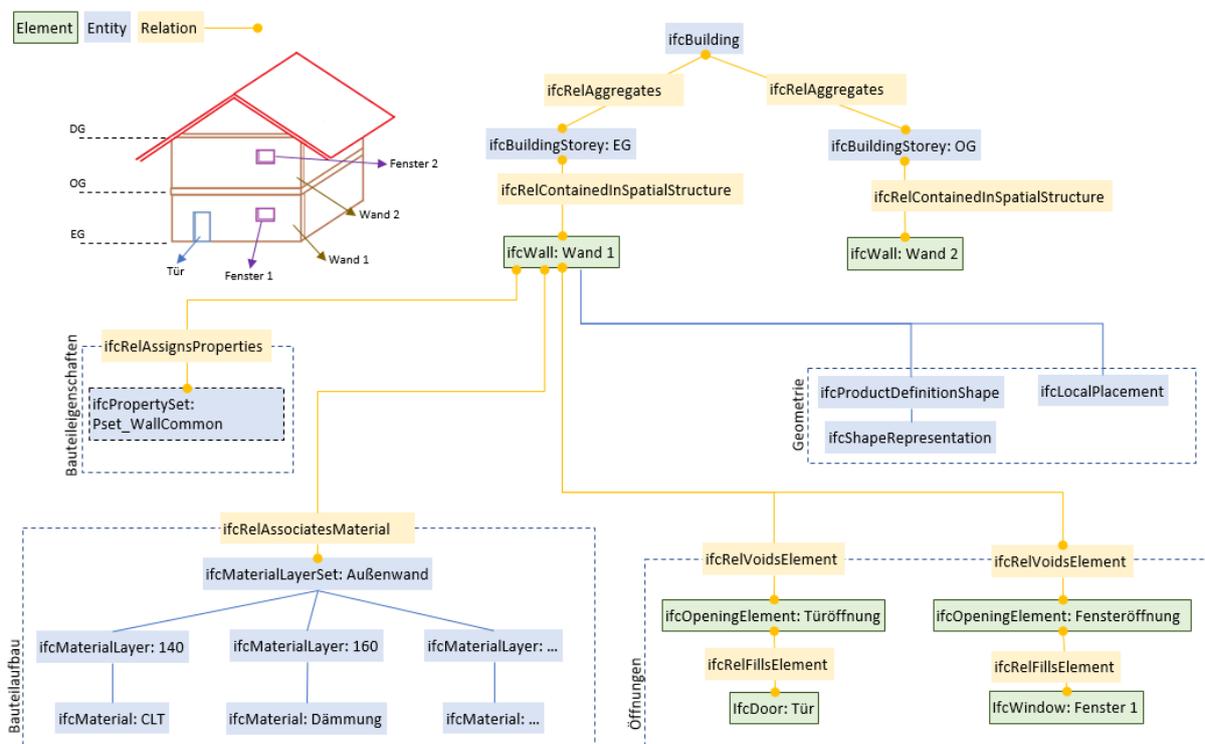


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer IFC-Datei (verkürzt und vereinfacht)

3. Bauphysikalische Planung im BIM-Planungsprozess

Die Einbettung bauphysikalischer Planung in einen BIM-Workflow bringt für alle Projektbeteiligten große Vorteile. Üblicherweise verwaltet auf der Seite der Architekten und Hauptplaner der BIM Koordinator das Koordinationsmodell, aus dem für die einzelnen Fachplaner Fachmodellen extrahiert werden, die auf die jeweilige Planungsaufgabe abgestimmt sind. Dadurch reduziert sich die Informationsmenge in den ausgetauschten Dateien. So werden Fachmodelle von der Planungssoftware effektiver gelesen und ausgewertet. Für die Planung fehlende Angaben können manuell oder mit Hilfe von Datenbankabfragen hinzugefügt werden. Die Planungsergebnisse werden dann dem BIM Koordinator zurück gemeldet, der sie nach Überprüfung in das Koordinationsmodell einpflegt. Auch hierzu gibt es bereits automatisierte Lösungen, z.B. über BIM Collaboration Format (BCF), auf die im Rahmen dieses Beitrags jedoch nicht näher eingegangen wird. Die Abbildung 2 zeigt den BIM-basierten Workflow am Beispiel der bauakustischen Planung.

Bei der Nutzung von offenen Datenmodellen wie IFC kann eine Bearbeitung notwendig sein. Beim Model Healing oder Semantic Enrichment wie beispielsweise in [5], [6] oder [7] wird das Modell auf mögliche Fehler überprüft und falls notwendig korrigiert. Nach der fachlichen Analyse können neue Informationen in das Modell hinzugefügt werden. Eine klare Abgrenzung zwischen Healing und Enrichment ist nicht definiert, da sie auch Prozessbedingt fließend ineinander übergehen können.

Sowohl im Koordinationsmodell als auch im Fachmodell sind alle Bauteile und Eigenschaften über IDs eindeutig identifizierbar. So muss bei Änderungen im Koordinationsmodell nicht das gesamte Fachmodell verworfen werden, sondern kann die Änderungen falls nötig anpassen.

Der Vorteil dieser Arbeitsweise ist die hohe Zeitersparnis durch die automatisierte Übernahme von Daten. Zusätzlich entfällt die Fehleranfälligkeit durch manuelle Eingaben. Die für open BIM erzeugten Daten sind standardisiert, sodass sich Datenbanken und Softwaretools für das Auslesen und Auswerten der Daten optimieren lassen. Große Gebäudemodelle können so effizient über regelbasierte Modellprüfungen analysiert werden. Zusätzlich sind Bauteile und Änderungen eindeutig nachvollziehbar.

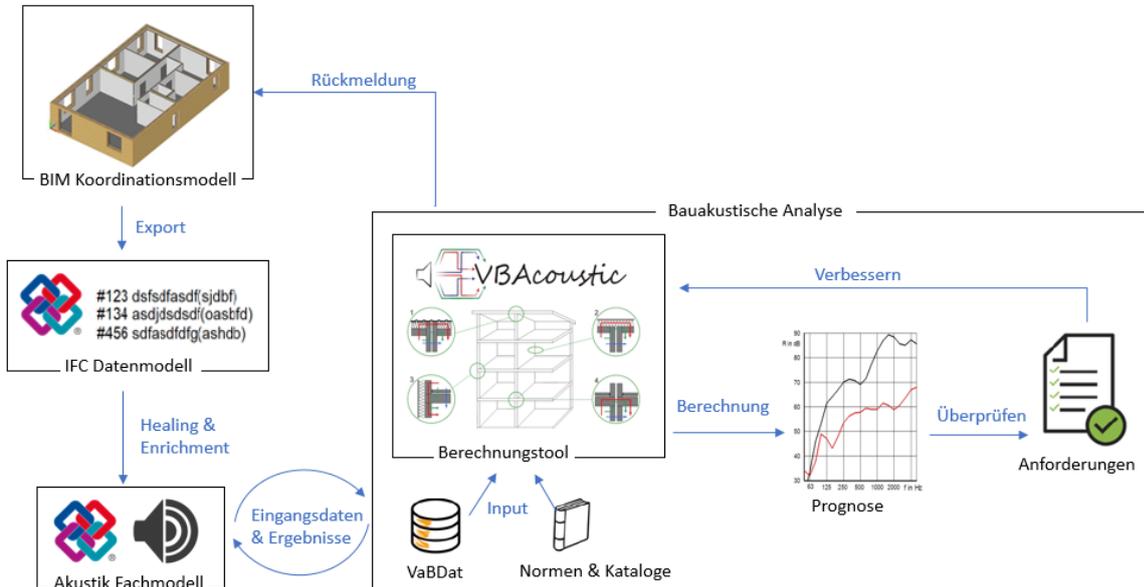


Abbildung 2: Bauakustische Analyse des Schalldämm-Maßes und des Trittschallpegels auf Grundlage eines BIM Koordinations mit Hilfe eines Akustik Fachmodells

4. Schallschutz im Holzbau

Die Schallschutzprognose im Holzbau wird wie für den Massivbau nach DIN EN ISO 12354 [8] gerechnet. Dabei wird neben der direkten Übertragung durch das trennende Element auch die Übertragung über die Schallnebenwege berücksichtigt. Dafür wird das Flanken-dämm-Maß R_{ij} verwendet:

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + \Delta R_{ij} + K_{ij} - 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} + 10 \lg \frac{S_s}{\sqrt{S_i \cdot S_j}} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

mit

$\overline{D_{v,ij}}$	Schnellepegeldifferenz in dB
R_i, R_j	Schalldämm-Maß des Elements i bzw. j in dB
S_s	Fläche des trennenden Elements in m^2
S_i, S_j	Fläche des Elements i bzw. j in m^2
ΔR_{ij}	Verbesserung oder Verschlechterung der Schalldämmung durch Vorsatzschalen, Estriche und abgehängte Unterdecken auf dem Übertragungsweg i-j in dB
l_{ij}	Länge der Stoßstelle zwischen Element i und j in m
a_i, a_j	Äquivalente Absorptionslänge von Element i bzw. j in m
K_{ij}	Stoßstellendämm-Maß für den Übertragungsweg i-j in dB

Je nach Situation entstehen zwei, drei oder vier mögliche Schallnebenwege. Für Trennwände sind es die gemischten Wege D_f und F_d und die reine Flankenübertragung F_f . Bei Trenndecken gibt es für die Trittschallübertragung den Weg D_f und zusätzlich im Holzbau den Weg D_{ff} , der den Einfluss des Estrichs auf die obere flankierende Wand beschreibt. Abbildung 3 verdeutlicht die genannten Übertragungswege. [9].

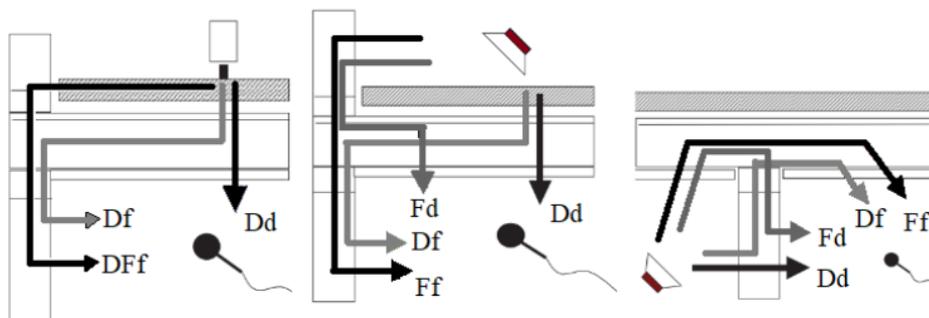


Abbildung 3: Schallübertragungswege mit den Wegen Ff, Df, Fd und DFF für die Trittschallübertragung einer Trenndecke (links), Schalldämmung einer Decke (mitte) und Schalldämmung einer Trennwand (rechts)

5. Herausforderungen für den Schallschutz

Digitale Gebäudemodelle sind nur von Vorteil, wenn die notwendigen Daten im Modell enthalten und maschinell abrufbar sind. Beim Akustik-Fachmodell bedeutet es, dass der Bauteilaufbau semantisch vorhanden sein muss (*IfcMaterialLayer*) um die korrekten Schalldämm-Maße oder Trittschallpegel der Bauteile zu ermitteln. Eine Herausforderung ist im Rahmen eines Projekts Definitionen für die Modellierung festzulegen. Zum Beispiel muss die Benennung des Materials (*IfcMaterial*) mit den genutzten Datenbanken übereinstimmen, da sonst jedes Bauteil manuell überprüft werden muss, um passende Werte aus der jeweiligen Datenbank zu ermitteln.

Eine weitere Herausforderung ist die Identifizierung der Stoßstellen. Hier muss neben den flankierenden Bauteilen auch der Typ der Stoßstelle erkannt werden (siehe Abbildung 4). Dieser Typ wird dann verwendet, um die Datenbankabfrage in VaBdat¹ durchzuführen und die richtigen Übertragungswege für das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} zu ermitteln. Die Datenbank VaBdat wurde an der TH Rosenheim entwickelt und beinhaltet neben Einzahlangaben vor allem frequenzabhängige Werte für die Schalldämm-Maße und Trittschallpegel von Bauteilen. Zusätzlich sind für verschiedene Stoßstellen aus Messungen die Stoßstellendämm-Maße angegeben.

Da das IFC-Format bisher keine ausreichenden Möglichkeiten bietet, Stoßstellen zu erstellen, müssen die Stoßstellen über verschiedene Abfragen am Gebäudemodell ermittelt werden. So wird aus der Position und der Geometrie der Bauteile die Stoßstelle nachgebildet und der Stoßstellentyp definiert. Im letzten Schritt werden anhand des Schichtaufbaus und des Stoßstellentyps noch die Übertragungswege ermittelt. Hier spielen auch Vorsatzschalen, Unterdecken oder schwimmende Estriche eine Rolle.

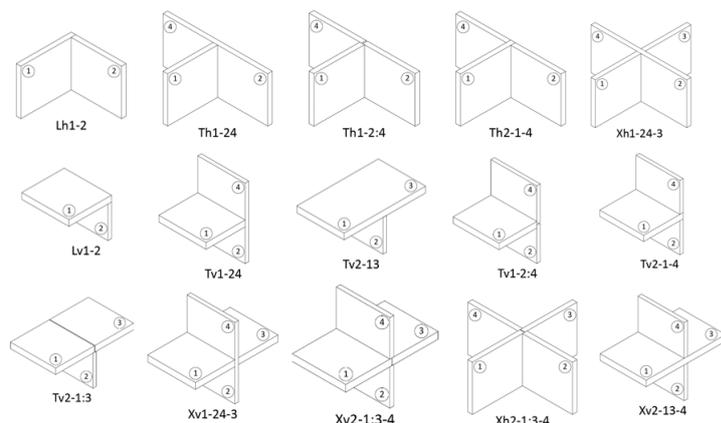


Abbildung 4: Für den Schallschutz relevante Stoßstellentypen in der Datenbank VaBdat [10]

¹ <https://www.vabdat.de/>: Datenbank mit frequenzabhängigen, vibroakustischen Kennwerten zu Bauteilen und Stoßstellen

Eine weitere Herausforderung ist, dass flankierende Elemente nicht über eine übliche Kollisionsabfrage ermittelt werden können, da die Bauteile an Stoßstellen nicht unbedingt eine Überlappung aufweisen. Sie können sogar konstruktionsbedingt einen Abstand zueinander aufweisen, sodass auch die Definition mit topologischen Operatoren wie berührt, beinhaltet, innerhalb nicht zielführend ist [11]. Abbildung 5 zeigt wie Elemente in einer Stoßstelle zusammentreffen können.

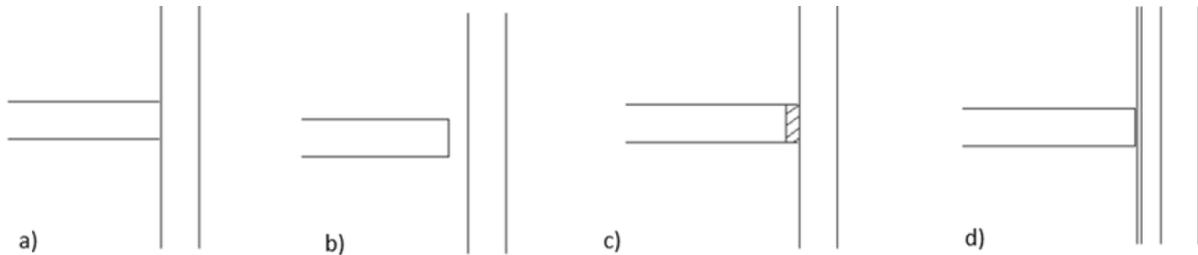


Abbildung 5: Erkennung der Stoßstelle für Elemente, die a) das Trennelement berühren ($d=0$) oder an das Trennelement angrenzen ($0 \text{ m} \leq d \leq 0,3 \text{ m}$) mit b) Luft, c) einer elastischen Schicht oder d) einer Vorsatzschicht dazwischen

6. Lösungsansatz mit IFC

An einer open BIM Lösung zur Implementierung des Schallschutzes in den Planungsprozess wird im Projekt der TH Rosenheim gearbeitet [12]. Als Gebäudemodell wird ein IFC-Datenmodell verwendet mit einem Detaillierungsgrad, der Bauteile in ihrer richtigen Position zueinander sowie ihren Bauteilaufbau enthält. Der Detaillierungsgrad von BIM Modellen kann über das Level of Development (LOD) beschrieben. Das BIM Forum gibt hierzu regelmäßige Richtlinien heraus, die Bauteilabhängig diese LODs beschreiben [13]. Der LOD beschreibt, bis zum welchem Grad die Geometrie von Bauteilen in einem Modell bedacht wurde und stellt den zuverlässigen Informationsgehalt eines Modells dar. Bei einem LOD 100 sind keine zuverlässigen geometrischen Angaben über das Bauteil vorhanden. Bei einem LOD 200 werden Bauteile mit ihrer Form und Position dargestellt, ohne dabei eine genaue Aufgliederung beispielsweise in Materialschichten zu enthalten. Sie können jedoch bereits semantische Informationen enthalten. Materialschichten und eine detaillierte Modellierung sollte ab einem LOD 300 vorhanden sein.

Für die akustische Analyse existieren idealerweise die Bauteile Wand, Decken und Fassaden mit einem LOD von 300. Aber auch ab einem LOD von 200 ist eine schalltechnische Analyse denkbar, da hier bereits die Stoßstellen ermittelt werden können, die aus geometrischen Abfragen des Trennbauteils mit seinen Flanken ermittelt und in Stoßstellentypen unterteilt werden. Das Schalldämm-Maß oder der Trittschallpegel der einzelnen Bauteile wird aus Herstellerangaben oder Datenbanken abgerufen. Aus dem BIM Model werden so Eingangsdaten für weitere Berechnungstools ausgelesen. Dazu gehören die Bauteilabmessungen, die Stoßstellenlängen und den genauen Aufbau der Bauteile, genauso wie die Stoßstellentypen.

Ein Tool für den Holzbau ist das Excel-basierten Tool VBAcoustic², das die Möglichkeit bietet die Prognose nach EN 12354 frequenzabhängig zu berechnen. Sollten Daten in VaBdat nicht vorhanden sein, kann auch auf Bauteile aus dem TH Katalog der Hochschule Rosenheim zurückgegriffen werden oder wenn vorhanden auch eigene Werte eingetragen werden.

Die Ergebnisse aus der Modellanalyse und Prognoseberechnung sollten in Form eines Fachmodells gespeichert werden. Dadurch können bei Änderungen im Koordinationsmodell schneller Entscheidungen zu Änderungen oder Neuberechnungen getroffen werden. Das Fachmodell Akustik wird aus dem Koordinationsmodell erstellt und beinhaltet alle Informationen, die zur Berechnung des Schallschutzes im Gebäude relevant sind.

Im Fachmodell selbst werden die Bauteile in drei akustisch relevante Schichten unterteilt. Dies ermöglicht ein schnelles Zuordnen der Schalldämm-Maße der Grundbauteile sowie der Verbesserungen durch Vorsatzschalen ΔR . Die drei Schichten sind wie folgt: eine Kernschicht mit dem tragenden Element und zwei äußere Schichten (siehe Abbildung 2). Die

² Download unter: <https://www.th-rosenheim.de/die-hochschule/fakultaeten-institute/fakultaet-fuer-angewandte-natur-und-geisteswissenschaften/ansprechpartner/professoren/prof-dr-andreas-rabold/>

Kernschicht muss dabei immer vorhanden sein, wohingegen die zwei äußeren Schichten optional sind. Für Wände sind diese äußeren Schichten außen zum Beispiel die Fassadenverkleidung und das Wärmedämmverbundsystem. Bei Innenwänden ist diese Schicht zum Beispiel eine Vorsatzschale. Die Kernschicht von Decken oder Dächern beinhaltet auch die Beschwerung und der Fußbodenaufbau ab der Trittschalldämmung ist dann bereits die äußere Schicht, genauso wie eine abgehängte Unterdecke. Für die Stoßstellenanalyse ist es ebenfalls wichtig, vor allem die Kernschicht zu betrachten. Diese bestimmt maßgeblich den Stoßstellentypen, wie in Abbildung 7 dargestellt ist.

Zum aktuellen Forschungsstand wird in IFC-Modellen die Lage von Stoßstellen an einem trennende Bauteil erkannt und flankierende Elemente richtig in ihre zugehörigen Stoßstellen eingefügt. Die Identifizierung der Stoßstellentypen nach Abbildung 4 wurde erfolgreich an einem Use Case demonstriert [12].

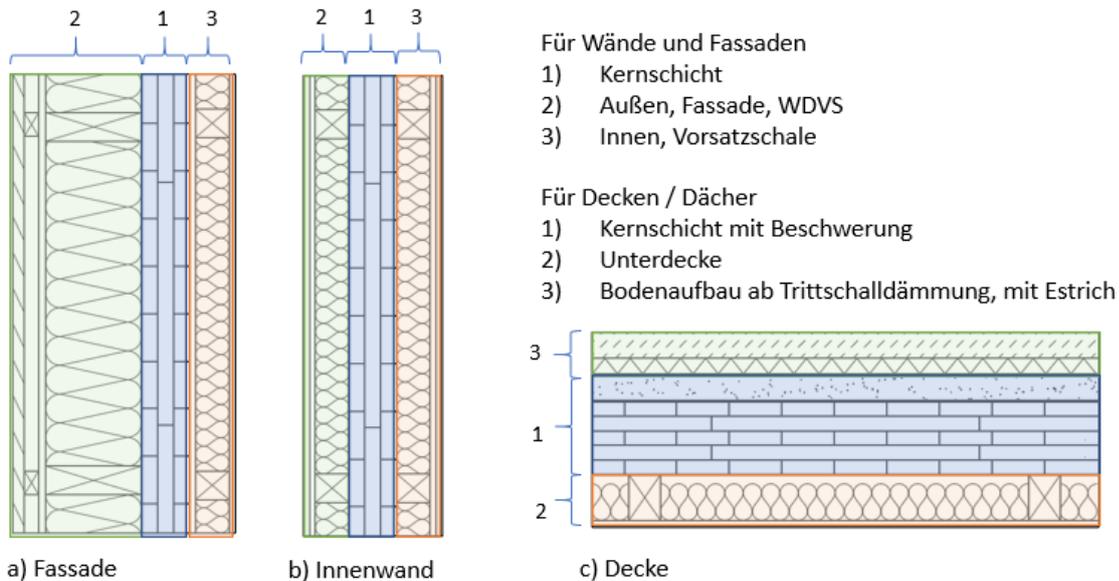


Abbildung 6: Beispiele im Schichtaufbau von a) Fassaden, b) Innenwänden, c) Decken

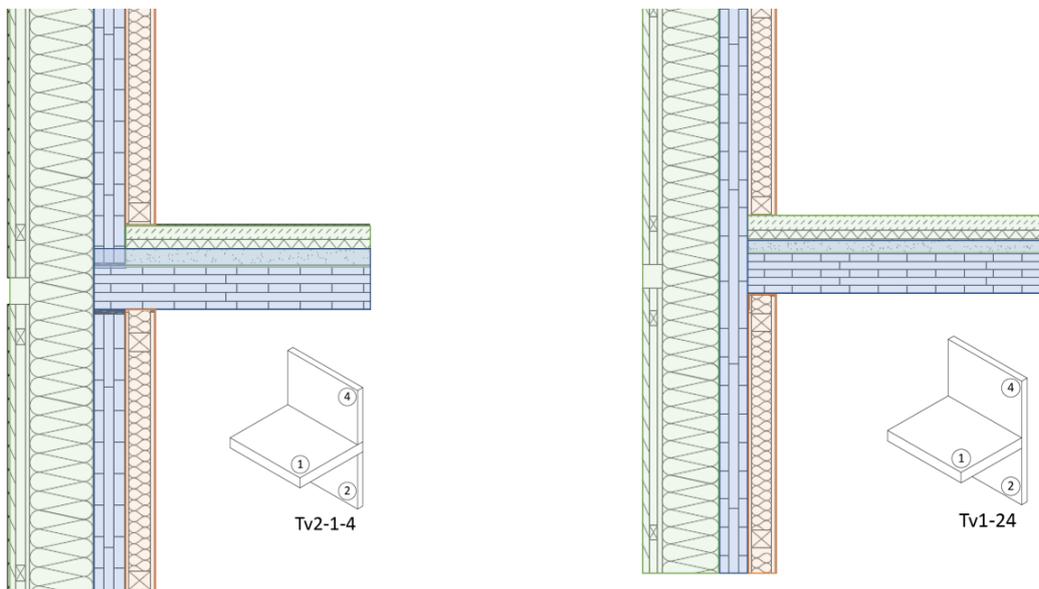


Abbildung 7: Beispiel eines Stoßstellendetails: die Kernschicht in blau aus Massivholzelementen ist für die Einteilung in die Stoßstellentypen relevant

7. Fazit und zukünftige Arbeiten

Die Planung des Schallschutzes ist eine wesentliche Herausforderung beim Entwurf von Holzbauten, da für die Anwendung der bisherigen Berechnungsmethoden viele Details beachtet werden müssen und so viele unterschiedliche Eingangsdaten zustande kommen. Bislang gibt es hierfür keine geeigneten Software-Tools, die sich in einen digitalen Planungsablauf integrieren und aus BIM-Modellen die richtigen Eingangsdaten automatisiert auslesen. Daher läuft an der TH Rosenheim ein Forschungsprojekt, welches diese Lücke schließen möchte. Dazu wird ein Open BIM Planungsprozess nachgestellt und ein digitales Gebäudemodell als herstellernerutrales IFC-Datenmodell verwendet. Durch die Umwandlung in ein Akustik Fachmodell können Bauteile und Bauteilanschlüsse analysiert werden und zu für die akustische Analyse interpretiert werden.

Dieses Forschungsprojekt zeigt, dass die Nutzung von BIM Modellen noch weiter optimiert werden kann. Die bisherigen Grenzen der Anwendung liegen vor allem an fehlenden computerbasierten Methoden, insbesondere in hochspezialisierten Teilgebieten wie die Betrachtung Schallschutz im Holzbau. Hier zeigt sich, dass die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Bau-Informatikern mit Fachleuten aus Holzbau und Akustik ein großes Potenzial hat.

Der nächste Schritt besteht darin, aufwendigere Bauteilaufbauten und komplexere Stoßstellen, wie sie in EN 12354-1 dargestellt sind, zu erkennen. Die Analyse von Elementen, die ein ΔR , also eine Verbesserung oder Verschlechterung des Schalldämm-Maßes herbeiführen, wie z. B. Vorsatzschalen und Unterdecken müssen in Zukunft ebenfalls berücksichtigt werden. Zusätzlich muss das Model Healing im Rahmen der Model Analyse sowie die Erzeugung des Fachmodells aus einem beliebigen BIM Modell vollständig implementiert werden.

8. Danksagung

Der Dank geht an die Unterstützung des bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst für die Finanzierung des Forschungsschwerpunkts «Prognoseverfahren zum Schall- und Schwingungsschutz für BIM-basierte Gebäudeplanung» (Kap. 15 49 TG 78, Förderzeitraum 2017-2021) an der Hochschule Rosenheim, sowie an Herr Prof. Dr.-Ing. André Borrmann der TU München für die Unterstützung.

9. Literaturverzeichnis

- [1] J. K. Wong, H. Li, H. Wang, T. Huang, E. Luo, and V. Li; Toward low-carbon construction processes: the visualisation of predicted emission via virtual prototyping technology, *Autom. Constr.*, 33, 2013, pp 72–78.
- [2] Gerard Finch, Guy Marriage, Antony Pelosi, and Morten Gjerde; Building envelope systems for the circular economy; Evaluation parameters, current performance and key challenges, *Sustainable Cities and Society*, 64, 2021, pp 102561.
- [3] WHO European Centre for Environment and Health: *Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization, Copenhagen, 2011.
- [4] *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Part 1: Data schema*, ISO 16739-1:2018. Beuth Verlag, 2018.
- [5] Ioannis Anagnostopoulos, Ioannis Brilakis, and Patricio Antonio Vela, Eds., 2015: *A Review on Methods for Generating As-built Building Information Models*.
- [6] J. Bogdahn and Volker Coors; TOWARDS AN AUTOMATED HEALING OF 3D URBAN MODELS, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume 38-4/W15*.
- [7] Eric Fichter, Veronika Richter, Jérôme Frisch, and Christoph van Treeck, 2021; Automatic generation of second level space boundary geometry from IFC models. In *Building Simulation 2021*.
- [8] *Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften. Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen*, DIN EN ISO 12354-1. Beuth Verlag, 2017.
- [9] Camille Châteauevieux-Hellwig, Andreas Rabold, and Markus Schramm: *Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten - Modellierung, numerische Simulation, Validierung. Teilprojekt 4: Bauteilprüfung, FEM Modellierung und Validierung*, Forschungsbericht, Rosenheim, 2017.
- [10] Aline Timpte, 2016: *Stoßstellen im Massivholzbau. Konstruktionen, akustische Kenngrößen, Schallschutzprognose*, Masterarbeit. Architektur. Technische Universität Berlin und Hochschule Rosenheim, Berlin.
- [11] André Borrman, 2007: *Computerunterstützung verteilt-kooperativer Bauplanung durch Integration interaktiver Simulationen und räumlicher Datenbanken*. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Lehrstuhl für Bauinformatik. Technische Universität München.
- [12] Camille Châteauevieux-Hellwig, Jimmy Abualdenien, and André Borrman, 2021; Analysis of the early-design timber models for sound insulation analysis. In *EG-ICE 2021. 28th international workshop on intelligent computing in engineering*.
- [13] Jim Bedrick, Will Ikerd, and Jan Reinhardt: *2021 level of development (LOD) specification for Building Information Models*, 2021.

AKUSTIK

Aussenlärm – Hintergründe und viel Neues

ÖNORM B 8115-2: Methodik zur Erstellung von Anforderungen

Clemens Häusler
bauphysik.at
Pfaffstätten, Österreich



Christoph Lechner
Amt der Tiroler Landesregierung
Innsbruck, Österreich



ÖNORM B 8115-2: Methodik zur Erstellung von Anforderungen

Vorbemerkung

Im Jahr 2018 wurde der final draft von ISO FDIS 19488 «Akustisches Klassifizierungssystem für Wohngebäude» [ISO FDIS 19488], eine Klassifizierung mit konkreten Zahlenwerten, von den Mitgliedsstaaten abgelehnt. Aus Sicht der Autoren zu Recht, denn nicht wertemäßig einheitliche Anforderungen, sondern eine einheitliche Methodik sollte das Ziel internationaler Harmonisierung sein. 2021 erschien inhaltlich unverändert ISO TS 19488, als «Technical Specification» [ISO TS 19488], also abgewertet als «Technische Regel».

Weltweit den gleichen Schallschutz zu fordern oder zu empfehlen ist genauso unrealistisch wie technisch fragwürdig. Nicht gleiche Anforderungen, sondern gleiche Verfahren sind gefragt. Die neue ÖNORM B 8115-2 präsentiert eine solche einheitliche Methodik, die absolute Höhe des Anforderungsniveaus kann entsprechend den jeweiligen Vorstellungen der «Schutzziel» festgelegt werden.

1. Einleitung

In Österreich sind die Anforderungen an den baulichen Schallschutz traditionell in ÖNORM B 8115-2 [ÖN B 8115-2] geregelt. Mit der Bestrebung zur Harmonisierung der bautechnischen Vorschriften wurde im Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) die Richtlinie 5 «Schallschutz» [OIB 5] erstellt und in den Ländern, die primär für Gesetzgebung und Vollzug des Baurechts zuständig sind, verbindlich erklärt. Während die OIB-Richtlinie 5 aus 2007 noch auf die Anforderungen der ÖNORM B 8115 Teil 2 verwies, wurden in der Ausgabe 2011 die Anforderungen fast identisch übernommen und verbal beschrieben. In der OIB Richtlinie 5 Ausgabe 2015 wurden dann diese textlichen Teile in Tabellen formuliert, um angeblich die Lesbarkeit zu erhöhen. Damit wurden die Regelungen der Anforderungen von der Normungs- zur Harmonisierungsebene verschoben.

Entsprechend dieser Bestrebungen ist es nun weder notwendig noch im Sinne einer Rechtssicherheit in verwaltungs- und zivilrechtlichen Verfahren erwünscht, dass die ÖNORM B 8115-2 weiterhin Anforderungen enthält. Trotzdem sollte eine Verfahrensanleitung zur Verfügung gestellt werden, mit dem die Anforderungen situativ ermittelt werden können. Es handelt sich dabei nicht um die Berechnung der Schallübertragung in Gebäuden, sondern die Ableitung von in sich kohärenten Anforderungswerten für Luft- und Trittschall sowie für Technische Anlagen.

2. Die Herausforderung

In den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten zeigt sich bei den Belästigungsreaktionen Betroffener eine Verschiebung in Bezug auf die Verursacher [Mikrozensus 19]. Während bis zu Beginn dieses Jahrhunderts die Schallquelle Verkehrslärm die bei weitem dominante war, stieg die Belästigung aus Nachbarschaftswohnungen (als Erstgenannte der störenden Quellen) stark an. Mögliche Begründungen dafür sind die Veränderung des Nutzungsverhaltens in Bezug auf Aktivitäten, die auch tieffrequenten Schall verursachen wie mittlerweile kostengünstige Home Consumer Electronic, der zunehmende Leichtbau bzw. mehrschalige Konstruktionen in Kombination mit tieffrequenten Geräuschen aber auch das durch die sehr hochwertigen Außenbauteile niedrige Geräuschniveau in den Aufenthaltsräumen.

Gerade über die aktuellen thermischen Anforderungen und über Aktivitäten zur thermischen Sanierung werden Fenster und Außentüren nicht nur mit einem hohen Schalldämmmaß sondern auch mit einer außerordentlich guten Dichtheit eingebaut. Diese Dichtheit zeigt akustisch betrachtet auch keine großen Veränderungen im Laufe der Jahre, sodass diese Fenster und Außentüren auch nachhaltig geeignet sind, den Lärm von außen in die

Empfangsräume stark zu dämmen. Diesem Umstand folgend entsteht in den Empfangsräumen ein sehr niedriges Geräuschniveau, die Hörsamkeit der Geräusche im Inneren ist damit besser gegeben. Dies könnte eine logische (nicht evidente) Begründung sein, warum die Beschwerdefälle aufgrund von Geräuschen aus Nachbarwohnungen in den letzten Jahren stark gestiegen sind.

Die Herausforderung bei der Formulierung einer Methodik für einen abgestimmten Schallschutz im Hochbau liegt nun darin, die Zusammenhänge zwischen der Lärmbelastung im Freien und den sich daraus ergebenden Geräuschniveaus in den Aufenthaltsräumen in Beziehung zu bringen mit der Hörsamkeit von Geräuschen aus Luft- und Trittschall sowie von Technische Anlagen.

3. Der traditionelle Beurteilungszugang in Österreich

Die Normung zum Schutz gegen Schall im Hochbau hat in Österreich eine lange Tradition, so wurden mit ÖNORM B 2115 vom 15. Dezember 1936 [ÖN B 2115] bereits die erforderlichen Schalldämmwerte für Übertragungssituationen in Wohnhäusern einerseits und Gasthöfen und Krankenhäusern u.dgl. andererseits definiert. Diese Anforderungswerte galten für Fenster, Türen, Trennwände innerhalb derselben Nutzungseinheit, Trennwände zwischen Wohnungen bzw. Gebäuden, Außenwände mit und ohne Fenster als Gesamtdämmmaß sowie für Decken, dies auch in Bezug auf den durchgelassenen Trittschall. Interessant sind die Zahlenwerte dieser Anforderungen. So wurden die Trennwände zwischen zwei Wohnungen mit 55 dB und zwischen zwei Gebäuden mit 60 dB als erforderliche Schalldämmwerte normiert. Beim durchgelassenen Trittschall in Wohnhäusern wurden Werte von 40 dB, für Gasthöfe, Krankenhäuser u.dgl. von 30 dB als Anforderungen definiert.

Im Laufe der Zeit wurden die Anforderungen detaillierter beschrieben und für den Luftschallschutz wurde in Bezug auf den zulässigen Wert sowohl für Geräusche von außen nach innen als auch für die Übertragung innerhalb der Gebäude ein allgemeiner Grundsatz (vgl. Ausgabe 1981) definiert. Der erforderliche Schallschutz ergibt sich aus

- dem vorhandenen oder zu erwartenden Lärm und
- dem Grundgeräuschpegel des zu schützenden Raumes.

Übersteigen Geräusche den im Raum herrschenden Grundgeräuschpegel, so stören sie, so die Aussage in der Ausgabe 1981. Dieser Grundgeräuschpegel wurde für Planungszwecke direkt aus den Baulandkategorien ermittelt und lag zwischen 20/15 dB (Tag/Nacht) in Ruhegebieten und reichte bis 35/25 dB (Tag/Nacht) in Gebieten mit geringer Lärmemission (Verteilung, Erzeugung, Dienstleistung, Verwaltung). Der Ausgabe von ÖNORM B 8115-2 aus dem Jahre 1987 ist zu entnehmen, dass die generelle Anforderung grundsätzlich gilt und für den Fall, dass kein höherer Schallschutz nach diesem Vorgang erforderlich ist, die in Tabellen festgelegten Mindestschallschutzwerte trotzdem einzuhalten sind. Im Hinblick auf die Beurteilungsgrundsätze wanderte der Hinweis, dass Geräusche über dem Grundgeräuschpegel störend sind, in die Fußnote ebenso wie in den Folgeausgaben 1992 und 1994. Mit Ausgabe 2002 wurde die allgemeine Anforderung wieder in den Haupttext wie folgt eingefügt:

- Dabei ist davon auszugehen, dass der Beurteilungspegel der Schallimmission den Grundgeräuschpegel im zu schützenden Raum nicht überschreiten soll und der Spitzenpegel den Grundgeräuschpegel nicht um mehr als 10 dB überschreiten soll.

Für den Trittschallschutz wird keine Unterscheidung der Anforderung nach dem Grundgeräuschpegel getroffen, dies gilt gleichfalls für Technische Anlagen. In der Ausgabe 2002 wird auch klargemacht, dass nur für den Fall, dass diese generelle Anforderung keinen höheren Schallschutz bedingt, die tabellarischen Anforderungen des Mindestschallschutzes erfüllt werden müssen. Die normativen Formulierungen lassen es offen, ob diese generellen Anforderungen auch für den Luftschallschutz im Gebäudeinneren gelten oder nur dem Luftschallschutz vor Lärm von außen. Letzteres lässt ein Hinweis auf die Ermittlung des Dauerschallpegels, welcher nur für Geräusche im Freien gilt, vermuten. Für die erstere These spricht die Bestimmung, dass auch der Mindestschallschutz in Gebäuden der generellen Anforderung unterworfen ist.

In der Ausgabe 2006, diese Ausgabe war jene, die die Anforderungen für die später ausgegebene OIB-Richtlinie 5 (2007) beinhaltete, wurden Bestimmungen, die lediglich Empfehlungscharakter hatten, eliminiert. Diese Norm musste den legislativen Anforderungen für einen direkten Verweis in einer Verwaltungsvorschrift Genüge tun. Für die normüblichen Übertragungssituationen in Gebäuden ohne Betriebsstätten wurden daher die mindesterforderlichen bewerteten Standard-Schallpegeldifferenzen festgeschrieben. Der generelle Grundsatz aus den Vorgängernormen wurde aber für die Anforderungen an den Luftschallschutz in Gebäuden ohne Betriebsstätten mit feststehenden Tabellenwerten formuliert. Dabei wurde davon ausgegangen, dass ein übliches Nutzerverhalten einerseits einem üblichen Nutzerempfinden andererseits gegenübersteht und dies generalisierbar sei. Für Gebäude mit Betriebsstätten wurde der tradierte generelle Grundsatz – der Grundgeräuschpegel im Empfangsraum darf nicht überschritten werden – übernommen, in seiner Ausformulierung aber adaptiert.

Der Begriff des Grundgeräuschpegels machte in der Praxis große Probleme in der Planfeststellung und späteren Bewertung. Der Grundgeräuschpegel ist eine Messgröße, welche zur Beschreibung des niedrigsten Geräuschniveaus dient. Definitionsgemäß konnte er nur erfasst werden, in dem der niedrigste Wert des Zeigers des Schallpegelmessers in Anzeigedynamik «fast» wiederholt beobachtet werden konnte und vom Messenden gleichzeitig dabei Ruhe empfunden wurde. Dies führte dazu, dass bei Messungen im Gebäudeinneren eine künstliche ruhige Atmosphäre geschaffen wurde, dies durch Abschaltung von Geräten in der Empfangswohnung. So wurden teilweise Kühlschränke, tickende Uhren und sogar surrende Lampen abgeschaltet.

Das echte Problem bestand aber beim Grundgeräuschpegel im Umstand, dass es eine Messgröße war. Diese kann naturgemäß erst dann erhoben werden, wenn das Messobjekt errichtet ist. Da dieser später gewonnene Messwert für die Definition der Anforderung an den baulichen Schallschutz in unmittelbarem Zusammenhang steht, konnte diese Anforderung bei genauem Betrachten erst erschlossen werden, wenn das Gebäude bereits errichtet war.

Für eine Planfeststellung im Sinne der Zulässigkeit der vorgesehenen Konstruktion war daher eine Planungsgröße einzuführen, die sowohl vor als auch nach Errichtung des Gebäudes stabil und immer gleichbleibt. Dies wurde in Form des Planungsbasispegels realisiert, welcher von den Zahlenwerten dieselben Größen aufweist wie der Grundgeräuschpegel, dessen Zuordnung aber auf Grund des maßgeblichen Außenlärmpegels erfolgt.

Die Ermittlung darf aber nicht durch Zuordnung allein aufgrund einer Baulandkategorie erfolgen, sondern verlangt stets eine Plausibilitätskontrolle. Auch sind bauteillagebezogene Abminderungen in Rechnung zu stellen. Je nach Ergebnis der Plausibilitätskontrolle bedarf es der Berücksichtigung strategischer Lärmkarten, einer standortspezifischen Berechnung oder einer repräsentativen Messung. Durch die bereits seit langem übliche Zuordnung zu Baulandkategorien und späteren messtechnischen Erfahrungen bestätigte sich in der Praxis zunehmend, dass der Zusammenhang zwischen Außenlärmpegel und Planungsbasispegel auch jenem Geräuschniveau entspricht, welches üblicherweise in den beschriebenen Konstellationen gemessen wurde.

Dabei darf man nicht außer Acht lassen, dass bei ruhigeren Gegenden (unter 30 dB in der Nacht im Freien), wie sie am Land aber durchaus auch im urbanen Bereich auf der den Lärmquellen abgewandten Seite üblich sind, der Grundgeräuschpegel sich der Erfassung einer Standardmessausstattung entzieht. Werte unter 20 dB sind durchaus üblich, Low-Noise-Ausstattungen zur Erfassung derselben werden benötigt. Aber auch mit diesen wurden von der Anzeige her die Eichgrenzen noch teils deutlich unterschritten. Diese Schwierigkeiten waren ein zusätzliches Argument, den Planungsbasispegel in Abhängigkeit von der Außenlärmbelastung zu formulieren.

Tabelle 1: Planungsbasispegel in Abhängigkeit vom maßgeblichen Außenlärmpegel in dB

Außenlärmpegel Kategorie ^a		-	1	2	3	4	5	6
Tag 06:00- 22:00	Außenlärmpegel $L_{A,eq}$	≤ 40	41 bis 45	46 bis 50	51 bis 55	56 bis 60	61 bis 65	> 65
	Planungsbasispegel L_{PB}	15	20	25	30	30	30	30
Nacht 22:00- 06:00	Außenlärmpegel $L_{A,eq}$	≤ 30	31 bis 35	36 bis 40	41 bis 45	46 bis 50	51 bis 55	> 55
	Planungsbasispegel L_{PB}	10	15	15	20	20	20	20

^a Die Ermittlung des Planungsbasispegels durch Zuordnung allein aufgrund einer Baulandkategorie ist nicht ausreichend. Hier müssen jedenfalls auch bauteillagebezogene Abminderungen in Rechnung gestellt werden.

4. Beurteilungskonzept

Entsprechend der überlieferten Formulierung der Anforderungen geht die neue ÖNORM B 8115-2 konsequent von folgendem Grundsatz aus:

- der Grundgeräuschpegel im Raum darf vom Beurteilungspegel nicht überschritten werden
- einzelne Spitzen dürfen den Grundgeräuschpegel um nicht mehr als 10 dB überschreiten

Dies gilt im ersten Schritt für den Luftschall, hier aber sowohl für den von Außen nach Innen dringenden Lärm als auch für die Luftschallübertragung im Gebäude. Der Beurteilungszugang geht in konsequenter Weise nicht vom energieäquivalenten Dauerschallpegel, sondern vom Beurteilungspegel aus.

Der Beurteilungspegel ist ein fachliches Konstrukt, welches das Wirkungsäquivalent im Hinblick auf Belästigungen zu dem Referenzgeräusch Straßenverkehr abbildet. In Österreich sind zur Bildung des Beurteilungspegels Anpassungswerte bestimmt, nach der früheren Diktion gekennzeichnet durch Ton-, Impuls- und Informationshaltigkeit. Ein kumulierender Zuschlag war in Österreich nicht zu vergeben.

Aufgrund eines Ringversuches [Lechner 2003] und dessen Unsicherheitsbetrachtungen wurden diese Geräuscheigenschaften zusammengefasst und mit einem + 5 dB betragenden generellen Anpassungswert versehen (siehe Tabelle 2). Für Schallübertragungen in Gebäuden kommt primär die Eigenschaft der Informationshaltigkeit zum Tragen (bei Betriebsstätten im Rahmen des Gastgewerbes ist dies schon jahrelang in ÖNORM S 5012 [ÖN S 5012] gleichlautend definiert).

Tabelle 2: In der Regel sind Anpassungswerte für folgende Schallquellen heranzuziehen

Anpassungswert für die Geräuschcharakteristik	L_z in dB
Schienenverkehr auf Durchzugsstrecken	-5
Schienenverkehr in Verschiebebahnhöfen	+5
Straßenverkehr mit fließendem Verkehr	0
Flugverkehr mit Flächenflugzeugen	0
Flugverkehr mit Hubschraubern	+5
Betriebsanlagen und akustisch vergleichbare Anlagen ^a	+5

^a hierzu zählen auch Personen aufgrund der Informationshaltigkeit

In einem weiteren Schritt wurde folgende zusätzliche Grundannahme getroffen:

- Was für den Luftschall richtig und bewährt ist, kann für den Trittschall und für technische Geräusche nicht grundsätzlich falsch sein

Diese triviale Feststellung trifft die Erfahrungen im Feld sehr gut, wonach in ruhigen Gebieten gerade Trittschall und Technische Anlagen wie im Besonderen auch Einzelgeräusche durch WC-Spülungen und Sanitärgeräusche besonders auffällig und lästig wurden.

5. Beschreibung des Verfahrens

Ein ausgewogenes Schutzniveau bedeutet, dass aufgrund der einwirkenden Lärmbelastung durch

- Luftschall von außen
- Luftschall von innen
- Trittschall von innen
- Technische Anlagen

im zu schützenden Raum ein einheitlicher Lärmpegel hervorrufen wird. Damit die Bauteile planerisch entsprechend dimensioniert werden können, muss hierfür die Lärmbelastung bekannt sein. Während dies beim Luftschall gegeben ist, musste beim Trittschall erst eine entsprechende Größe eingeführt werden, der sogenannte «relative Trittleistungspegel».

Das Gehen auf Fersen erzeugt im darunterliegenden Raum Pegelspitzen in Größenordnung vom bewerteten Standard-Trittschallpegel $L_{nT,w}$ (siehe Abbildung 1), damit kann ein Referenzwert angesetzt werden. Für andere Arten der Bewegung (z.B. leises Gehen, Ballengang, Tanzen, Turnen) kann ein entsprechender relativer Trittleistungspegel L_{going} für Planungszwecke festgelegt werden.

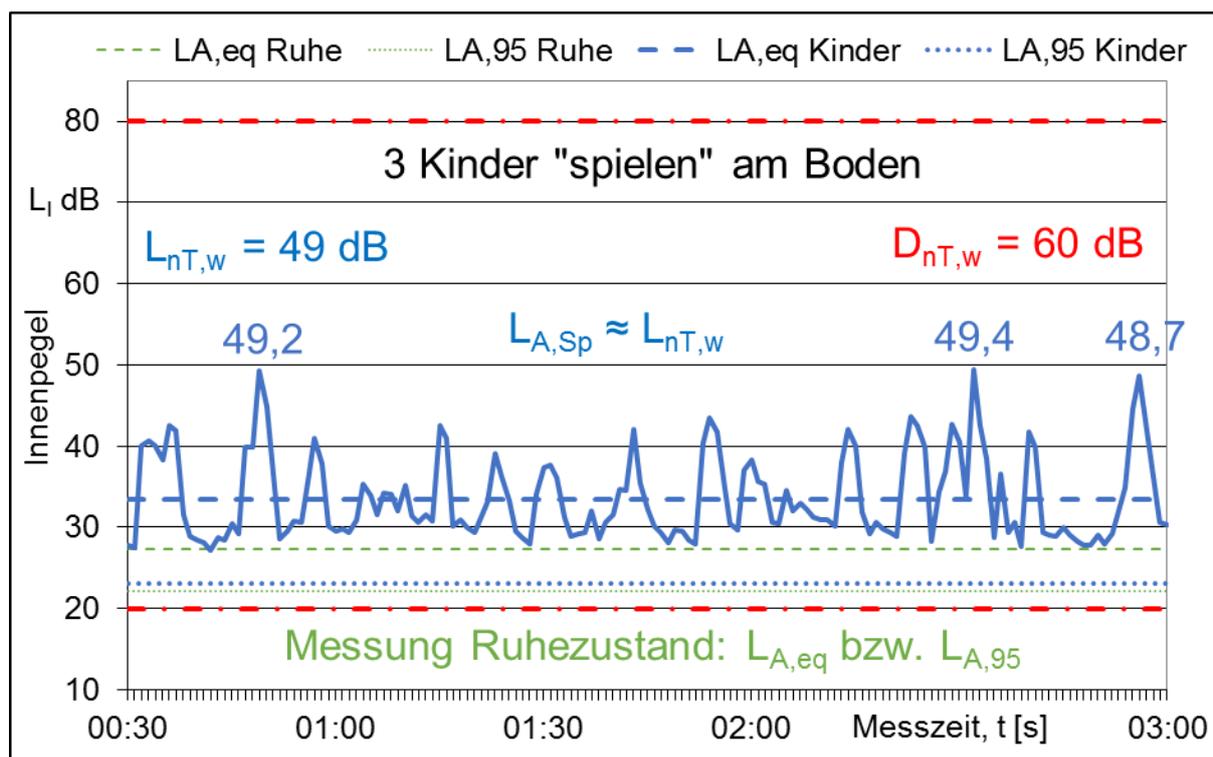


Bild 1: Fersengang (kennzeichnender Spitzenpegel $L_{A,sp}$) entspricht in etwa Standard-Trittschallpegel $L_{nT,w}$

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass auch für Technische Anlagen eine entsprechende Eingangsgröße für die Planung fehlt. Derzeit gibt es aber keine Laborprüfung, weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene, aus der sich die Schalleistung von Technischen Anlagen ergibt. Dies bedeutet, dass der Pegel im zu schützenden Raum vor Ort gemessen werden kann, dieser aber nicht in der Planung rechnerisch ermittelt werden kann.

5.1. Gleichungen für die Bemessung

Beim Luftschallschutz bildet sich in der Regel die maßgebliche Emission im Freien wie in Senderäumen über den energieäquivalenten Dauerschallpegel und dem daraus gebildeten Beurteilungspegel ab. Beim Trittschall sind die einwirkenden Pegelspitzen für die Bemessung des Schallschutzes maßgebend.

Die Bemessung des Schallschutzes der Außenbauteile erfolgt in der Regel nach Gleichung (1a) oder in Sonderfällen nach (1b):

$$D_{2m,nT,w} + C_j = L_{A,eq} + L_z - L_{PB} + K_{sens} + K_{Cj} + 5 \text{ dB} \quad (1a)$$

$$D_{2m,nT,w} + C_j = L_{A,sp} - 10 \text{ dB} - L_{PB} + K_{sens} + K_{Cj} + 5 \text{ dB} \quad (1b)$$

Die Anpassung von 5 dB berücksichtigt die unterschiedliche Schallanregung (im Labor Diffusfeld aber am Bau Punkt- bzw. Linienschallquelle) sowie die unterschiedliche spektrale Eigenschaft der Bauteile (z.B. ist ein Resonanzeinbruch im Diffusfeld weniger kritisch).

Die Bemessung des Luftschallschutzes innerhalb von Gebäuden erfolgt in der Regel nach Gleichung (2a) oder in Sonderfällen nach (2b):

$$D_{nT,w} + C_j = L_{A,eq} + L_z - L_{PB} + K_{sens} + K_{Cj} \quad (2a)$$

$$D_{nT,w} + C_j = L_{A,sp} - 10 \text{ dB} - L_{PB} + K_{sens} + K_{Cj} \quad (2b)$$

Die Bemessung des Trittschallschutzes innerhalb von Gebäuden erfolgt nach Gleichung (3):

$$L_{nT,w} + C_i = -L_{going} + 10 \text{ dB} + L_{PB} - K_{sens} + K_{Ci} + \Delta L_{exist} \quad (3)$$

Die rechnerische Berücksichtigung technischer Anlagen erfolgt nach Gleichung (4a) und (4b):

$$L_{Aeq,nT} = L_{PB} - K_{sens} + \Delta L_{exist} \quad (4a)$$

$$L_{AFmax,nT} = L_{PB} + 10 \text{ dB} - K_{sens} + \Delta L_{exist} \quad (4b)$$

Für den Trittschall wurde eine Erleichterung von 3 dB im Vergleich zur grundsätzlichen Festlegung gewählt (ΔL_{exist}), dies ist ein Zugeständnis an die gebaute Praxis. Für technischen Anlagen ist ΔL_{exist} mit 5 dB festgelegt. Beide Werte sind bei Überarbeitung der Norm zu evaluieren.

Durch Berücksichtigung des Planungsbasispegels ergibt sich eine Abhängigkeit vom maßgeblichen Außenlärmpegel. Bei der Gebäudehülle war dies auch in der Vergangenheit üblich (früheren Ausgaben ÖNORM B 8115-2), bei Innenbauteilen ist diese Abhängigkeit vom Außenlärmpegel neu. Aber der Außenlärmpegel ist eine veränderliche Größe, weshalb bei auf Dauer errichteten Gebäuden von keiner zu hohen Außenlärmbelastung ausgegangen werden sollte. Der Planungsbasispegel entspricht auch nur im theoretischen Idealfall dem individuell vorhandenen Grundgeräuschpegel, weshalb pauschal von keinem zu hohen Hintergrundgeräusch ausgegangen werden sollte.

Bei der Schallübertragung im Gebäude wird deshalb, wenn nicht explizit anders belegbar empfohlen, mit einem Planungsbasispegel L_{PB} von höchstens 25/15 dB (Tag/Nacht) zu rechnen. Bei Wohngebäuden in der Außenlärmpegel-Kategorie 1 (20/15 Tag/Nacht, Ruhegebiet, Kurgebiet) kann von 25/15 dB (Tag/Nacht) ausgegangen werden, da aufgrund der eigenen Nutzungsgeräusche in der Regel ein Planungsbasispegel am Tag von 25 dB zu erwarten ist.

Der Schallschutz der Innenbauteile ist demnach nur sehr theoretisch vom Außenlärmpegel abhängig. Lediglich in extrem ruhigen Lagen (leiser als die leiseste Baulandkategorie) oder in sehr lauten Gebieten (in denen auch auf der lärmabgewandten Seite der Außenlärmpegel mindestens 55/45 dB Tag/Nacht beträgt).

5.2. Planungswerte für die Bemessung

Um das Verfahren mit Leben zu füllen, braucht es Zahlenwerte für die Gleichungen 1 bis 4. Zur Ermittlung der Schallschutzniveaus können beispielhaft folgende Tabellen verwendet werden (die tatsächliche Schallleistung bzw. Trittleistung ist individuell sehr unterschiedlich, daher handelt es sich hier um sehr stark verallgemeinerte Planungsansätze):

Tabelle 3: Planungswerte für den Innenlärmpegel

Schallleistung pro Person	$L_{w,A}^a$	Schallleistung pro Instrument	$L_{w,A}^a$
Flüstern	50	–	50
leises Sprechen	55	–	55
ruhige Unterhaltung	60	–	60
normale Unterhaltung	65	–	65
angeregte Unterhaltung	70	–	70
laute Unterhaltung	75	Tastenglockenspiel	75
sehr laute Unterhaltung	80	Zither	80
maximale Unterhaltung	85	Akustische Gitarre	85
maximale Sprachleistung	90	Geige	90
Rufen	95	Saxophon	95
Schreien	100	Klavier	100
lautes Schreien, ausgebildeter Sänger	105	Trompete	105
maximale Schreileistung	110	Schlagzeug	110

^a der energieäquivalente Dauergeschwelligkeitspegel ergibt sich aus: $L_{A,eq} = L_{w,A} + 10 \log T/V + 14 \text{ dB}$

Tabelle 4: Planungswerte für den relativen Trittleistungspegel

Art der Bewegung	L_{going}	Anmerkung
Abrollen mit Hausschuhen (Turnschuhen)	-30	
Leises Gehen im Ballengang	-20	unter Rücksichtnahme auf Mitbewohner
Gehen im Ballengang, Stuhl Rücken	-10	Stühle mit Filzgleitern (Bodengleitern)
Gehen im Fersengang, Stuhl Rücken	0	
Tanzen, Turnen, Einkaufswagen/Rollkoffer	+10	auch Rutschauto (Bobby Car)
Ball prellen, defekter Einkaufswagen/Rollkoffer	+20	bzw. Einkaufswagen/Rollkoffer bei Fugen
Hammer, Bohrmaschine	+30	

Tabelle 5: Empfindlichkeitsniveaus im Empfangsraum

Empfindlichkeitsniveaus	K_{sens}	Anmerkung
Schutzziel «Schlaf» im Wohngebäude	0	Ruhe und Erholung
Schutzziel «Arbeit» im Nichtwohngebäude	-5	nicht über Wohnnutzung hinausgehendem Lärm
Schutzziel «Schlaf» im Nichtwohngebäude	-5	zeitlich begrenzte Aufenthaltsdauer, z.B. Hotel
Nebenraum	-5	zeitlich begrenzte Aufenthaltsdauer, z. B. Bad
kleiner Nebenraum ^a	-10	Volumen < 10 m ³ , z.B. WC, Bad, Abstellraum
Nebenraum bei Technischer Anlage	-10	weil Privatsphäre nicht gestört wird
kleiner Nebenraum bei Techn. Anlage ^a	-15	weil Privatsphäre nicht gestört wird
mit Verbindungstür zu Aufenthaltsraum	-5	wenn Räume Funktionseinheit bilden ^d

mit Verbindungstür in Nutzungseinheit	-10	wenn Räume Funktionseinheit bilden ^d
mit Verbindungstür zu Nebenraum	-15	wenn Räume Funktionseinheit bilden ^d
Techn. Anlage zu anderer Nutzungseinheit	0	
Techn. Anlage in eigener Nutzungseinheit	0	dauerhafter Betrieb erforderlich
Techn. Anlage in eigener Nutzungseinheit	-10	kein dauerhafter Betrieb erforderlich
eigener Wohnbereich (weniger empfindlich)	-10	nur Wohngebäude (nicht Hotel, Pension, ...)
Organisatorischer Schallschutz in NE ^b	-10	wenn «Org. Schallschutz» umsetzbar
eigener Wohnbereich & Org. SS in NE ^b	0	im Privatbereich üblich und weit verbreitet
^a aufgrund seiner geringen Raumtiefe sollte ein kleinvolumiger Nebenraum nicht maßgeblich sein ^b die Nutzungseinheit ist in Absprache mit den anderen Objektbeteiligten zu definieren ^c z. B. Büros, Kanzleien, Arztpraxen ^d «Funktionseinheit» setzt eine aus Sicht des Empfangsraums erwünschte Funktion voraus		

Höhere Ansprüche an den Schallschutz, z.B. Erwartungshaltung, Komfort, Vertraulichkeit, Privatsphäre werden nicht durch das Empfindlichkeitsniveau K_{sens} berücksichtigt. Sie können z.B. durch Schallschutzklassen abgebildet werden (siehe ÖNORM B 8115-5).

Damit bei der situationsabhängigen Verwendung der Spektrum-Anpassungswerte ein ähnliches Schallschutzniveau erhalten bleibt, wird, abhängig vom jeweiligen Spektrum-Anpassungswert, ein entsprechender Korrekturwert verwendet (Tabelle 6).

Tabelle 6: Korrekturwerte für Spektrum-Anpassungswerte

Bereich	K_{Cj} für Luftschall		K_{CI} für Trittschall
ab 100 Hz	C bzw. $C_{100-5000} = -2$	C_{tr} bzw. $C_{tr,100-5000} = -5$	$C_I = 0$
ab 50 Hz	$C_{50-3150}$ bzw. $C_{50-5000} = -5$	$C_{tr, 50-3150}$ bzw. $C_{tr, 50-5000} = -10$	$C_{I 50-2500} = 10$

Beim Schallschutz im Gebäude, insbesondere beim Trittschall, sollte der erweiterte Frequenzbereich berücksichtigt werden ($C_{50-3150}$ bzw. $C_{I 50-2500}$). Dies kann ansatzweise durch eine tiefe Resonanzfrequenz erfolgen (insbesondere im Massivbau), oder wenn Prüfwerte vorliegen, können die gemessenen Spektrum-Anpassungswerte herangezogen werden (dies ist insbesondere bei Leichtkonstruktionen relevant). Bei Außenbauteilen sollte der Spektrum-Anpassungswert für Verkehrslärm (C_{tr}) berücksichtigt werden.

5.2. Beispiel Schallschutzniveau

In einem ländlichen Wohngebiet mit einer Außenlärmbelastung von 50/40 dB Tag/Nacht (Planungsbasispegel $L_{PB}=25/15$) und einem Innenraumpegel von $L_{A,eq} = 75/65$ Tag/Nacht (6,0 x 5,0 x 2,5 m; 6 Personen laute/normale Unterhaltung Tag/Nacht), und Gehen im Ballengang bzw. leises Gehen im Ballengang ($L_{going} = -10/-20$ Tag/Nacht) ergibt sich in einem Aufenthaltsraum mit Schutzziel «Schlaf» ($K_{sens} = 0$):

$$D_{2m,nT,w} = L_{A,eq} + L_z - L_{PB} + 5 \text{ dB} = 30 \text{ dB} \quad (1a)$$

$$D_{nT,w} = L_{A,eq} + L_z - L_{PB} = 55 \text{ dB} \quad (2a)$$

$$L_{nT,w} = -L_{going} + 10 \text{ dB} + L_{PB} = 45 \text{ dB} \quad (3)$$

$$L_{Aeq,nT} = L_{PB} + \Delta L_{exist} = 30/20 \text{ dB} \quad (4a)$$

$$L_{AFmax,nT} = L_{PB} + 10 \text{ dB} + \Delta L_{exist} = 40/30 \text{ dB} \quad (4b)$$

Damit wird der Planungsbasispegel im Raum nicht überschritten bzw. durch einzelne Spitzen um nicht mehr als 10 dB überschritten (siehe Abbildung 2).

Durch Anwendung der verschiedenen Empfindlichkeitsniveaus (K_{sens}) können auch Arbeitsräume, Räume mit Verbindungstüren, Nebenräume als auch eigene Nutzungseinheiten berücksichtigt werden.

In lauten Gegenden (WG Stadt, Kerngebiet, siehe Abbildung 2) dürfte der Schallschutz im Gebäude theoretisch um 5 dB geringer sein. Allerdings muss sichergestellt sein, dass der Planungsbasispegel in allen Aufenthaltsräumen dauerhaft entsprechend höher ist (auch auf der schallquellenabgewandten Seite). In sehr leisen Gegenden (leiser als die leiseste Bau-landkategorie) sollte deshalb überlegt werden, den Schallschutz im Gebäude um 5 dB zu erhöhen.

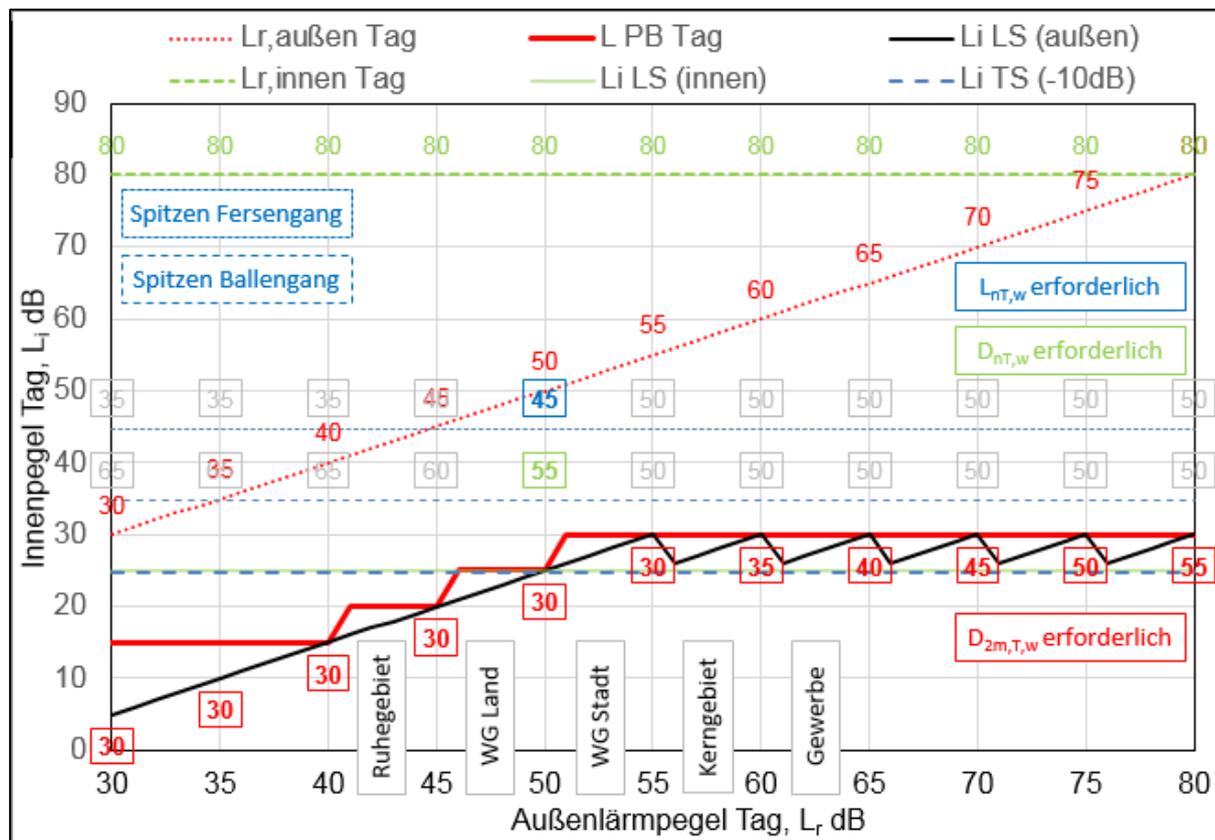


Bild 2: Einheitliches Schallschutzniveau, der Planungsbasispegel wird gleichmäßig unterschritten

Die Spitzen vom Fersengang überschreiten den Planungsbasispegel um 20/30 dB (Tag/Nacht), was erklärt warum es regelmäßig zu Beschwerden kommt obwohl der bau-rechtliche Schallschutz (deutlich) eingehalten wird. Dies ist vergleichbar mit einem Klavierspiel, $L_{A,eq} = 95$ dB ($L_{WA} = 100$ dB; Raum $4,0 \times 4,0 \times 2,5$ m), bei dem der Planungsbasispegel ebenfalls um 20/30 dB (Tag/Nacht) überschritten wird. Weder Fersengang noch Klavierspiel sind in Wohngebäuden verboten, in beiden Fällen ist aber eine entsprechende Rücksichtnahme auf andere Bewohner erforderlich.

Zu den Technische Anlagen erscheint noch eine Anmerkung wesentlich. Aktuell beschränkt sich der Grenzwert einer Technischen Anlage mit $L_{AFmax,nT} \leq 30$ dB. Aufgrund der neuen Methode ergibt sich eine Differenzierung, wann der Lärm verursacht wird (Tag/Nacht, z.B. Sonnenschutzvorrichtungen nur am Tag) und ob es sich um ein Dauergeräusch (z.B. Lüftungsanlage) oder Pegelspitzen handelt. Die Erleichterung von 5 dB (ΔL_{exist}) ist ein Zugeständnis an die derzeit gebaute Praxis, die Notwendigkeit dieser Erleichterung muss in Zukunft evaluiert werden.

Von der Methodik zur Erstellung von Anforderungen sind weder Fragen des Nachweises [ÖN B 8115-4, ÖN B 8115-6] noch Unsicherheitsbetrachtungen [Lechner 2019] berührt.

6. Fazit

Mit dieser Methodik, beschrieben in ÖNORM B 8115-2: 2021, ist es möglich ausgewogene Schallschutzniveaus zu erstellen. Dies nicht nur für Schlafräume, sondern ebenso für Arbeitsräume, Räume mit Verbindungstüren, Nebenräume als auch innerhalb einer Nutzungseinheit.

Dabei liegt die Betonung auf «ausgewogenen» und nicht auf der absoluten Höhe des Schallschutzniveaus. Durch diese Methodik werden keine konkreten Anforderungen gestellt, denn diese werden legislativ festgelegt (Bauordnungen) oder sind privatrechtlich zu vereinbaren. Eine Hilfestellung dazu bringt die gleichzeitig erschienen ÖNORM B 8115-5: 2021 [ÖN B 8115-5].

7. Literatur

- [ISO FDIS 19488] Akustik - Akustisches Klassifizierungssystem für Wohngebäude, 2018-08E
 [ISO TS 19488] Akustik - Akustisches Klassifizierungssystem für Wohngebäude, 2021-04
 [ÖN B 8115-2] Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Methodik zur Ermittlung von Schallschutzniveaus, 2021-04
 [ÖN B 8115-2] Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Anforderungen an den Schallschutz 2006-12, 2002-12, 1994-11, 1992-11, 1987-05, 1981-07
 [OIB 5] OIB Richtlinie 5: Schallschutz, 2007-04, 2011-10, 2015-03, 2019-04
 [Mikrozensus 19] Umweltbedingungen, Umweltverhalten 2019, Ergebnisse des Mikrozensus, Statistik Austria, Wien 2020
 [ÖN B 2115] Hochbau; Schutz gegen Schall und Erschütterungen, 1936-12
 [Lechner 2003] Ringversuch Messung der Schallimmission 2003, Berichte BE-276, Christoph Lechner, Umweltbundesamt Wien 2005
 [ÖN S 5012] Schalltechnische Grundlagen für die Errichtung von Gastgewerbebetrieben, vergleichbaren Einrichtungen sowie den damit verbundenen Anlagen, 2012-04
 [ÖN B 8115-4] Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Maßnahmen zu Erfüllung der schalltechnischen Anforderungen, 2003-09
 [ÖN B 8115-6] Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Messverfahren zum Nachweis der Erfüllung der schallschutztechnischen Anforderungen in Gebäuden, 2011-07
 [Lechner 2019] Ringversuch für bauakustische Messungen 2018, ÖAL Monografie Nr. 1, Christoph Lechner, Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung, Wien 2019
 [ÖN B 8115-5] Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Klassifizierung, 2021-04

8. Formelzeichen

$D_{2m,nT,w}$	bewertete Standard-Schallpegeldifferenz ermittelt in 2 m vor der Fassade
$D_{nT,w}$	bewertete Standard-Schallpegeldifferenz
$L_{nT,w}$	bewerteter Standard-Trittschallpegel (in europäischen Normen $L'_{nT,w}$)
C_j, C_i	der jeweils anzuwendende Spektrum-Anpassungswert für Luft- bzw. Trittschall
$L_{A,eq}$	Außenlärmpegel
$L_{A,sp}$	kennzeichnender Spitzenpegel
L_{going}	relativer Trittleistungspegel
L_z	Anpassungswert für die Geräuschcharakteristik bzw. die Geräuschquelle
L_{PB}	Planungsbasispegel
K_{sens}	Korrekturwert für die Empfindlichkeit im Empfangsraum (Ruheerwartung)
K_{Cj}, K_{Ci}	Korrekturwert Spektrum-Anpassungswert für Luft- bzw. Trittschall
$L_{Aeq,nT}$	äquivalenter Anlagengeräuschpegel
$L_{AFmax,nT}$	Anlagengeräuschpegel
ΔL_{exist}	Zugeständnis an die gebaute Praxis (Wert ist in Zukunft zu evaluieren)
T, V	Nachhallzeit, Raumvolumen

Schalltechnische Aspekte bei NawaRo-Dämmstoffen – Details aus dem Inneren

Andreas Rabold
Technische Hochschule Rosenheim
und ift Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Simon Mecking
Kurz und Fischer GmbH
Feldkirchen-Westerham, Deutschland



Anton Huber
PMI GmbH
Unterhaching, Deutschland



Schalltechnische Aspekte bei NawaRo-Dämmstoffen – Details aus dem Inneren

1. Einleitung

Damit das Wohnen und Wohlfühlen in Gebäuden mit einem hohen Anteil an Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen seinem guten Ruf gerecht wird, ist nicht zuletzt dem Schallschutz Rechnung zu tragen. Eine Grundvoraussetzung für einen guten Schallschutz im Gebäude ist es, bei der Auswahl der Außen- und Trennbauteile auf eine ausreichende Schalldämmung des Bauteils zu achten. Da die Schalldämmung eine Leistungseigenschaft des Bauteils und nicht der verwendeten Baustoffe beschreibt, kann die schalltechnische Eignung des Baustoffs nur in Bezug auf seine Wirksamkeit im betrachteten Bauteil beurteilt werden. In einem umfangreichen Projekt zur Förderung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen standen deshalb im Teilbereich des Projektes, der sich mit den bauakustischen Eigenschaften der Materialien beschäftigte, die Schalldämmung der Bauteile und die Einflüsse der unterschiedlichen Dämmstoffe auf die Schalldämmung im Mittelpunkt [1].

Bei den bauteilbezogenen Untersuchungen wurde zwischen Dämmstoffen zur Bedämpfung von Hohlräumen des Bauteils (zwischen Balken, Sparren oder Ständern), sowie druckfesten Dämmstoffen zur Entkopplung von Bauteilschichten unterschieden (Aufdachdämmplatten, Trittschalldämmplatten oder WDVS). Bei den Faserdämmstoffen in den Bauteilhohlräumen stand die Frage der Austauschbarkeit im Vordergrund. Bei den druckfesten Dämmstoffen stand die Frage nach geeigneten Gesamtkonstruktionen im Vordergrund, die den verschiedenen Schallschutzniveaus und damit den unterschiedlichen Komfortansprüchen der Bewohner gerecht werden können.

Die Untersuchungen wurden auf Basis von Prüfmatrizen der möglichen Bauteilvarianten durchgeführt, aus denen mit Unterstützung der begleitenden Arbeitsgruppe geeignete Konstruktionen ausgewählt wurden. Neben diesen empirischen Bauteilprüfungen zum Beleg der Anwendbarkeit ausgewählter Dämmstoffe, lag ein weiterer Schwerpunkt des Teilprojektes auf der Weiterentwicklung der Simulationsmodelle. Die Modelle wurden verwendet, um Erkenntnisse für die nicht empirisch untersuchten Dämmstofftypen zu gewinnen und Bauteiloptimierungen für druckfeste Dämmstofftypen durchzuführen.

2. Dämmstoffe im Hohlraum

Für die Untersuchung verschiedener Faserdämmstoffe im Bauteilhohlraum wurden Messungen an zweischaligen Wohnungstrennwänden und an Trenndecken mit entkoppelten Unterdecken durchgeführt. Diese zweischaligen Konstruktionen ohne, oder mit geringer Kopplung durch die Tragstruktur wurden gewählt, um eine dominante Schallübertragung durch den Dämmstoff sicherzustellen.

2.1. Dämmstoffe im Wandhohlraum

Die Wandmessungen wurden an Doppelständerwänden mit verschiedenen Faserdämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (Holzfaser, Hanffaser, Zellulose und Seegras) durchgeführt. Bei den Holzfaser- und den Hanffaserdämmstoffen handelte es sich um plattenförmige Dämmmaterialien. Die Zellulose wurde eingeblasen und das Seegras wurde als loser Dämmstoff manuell eingebracht. Zusätzlich zum Schalldämm-Maß des Wandaufbaus wurde von den eingebauten Dämmstoffen der längenbezogene Strömungswiderstand σ und die Raumdichte ρ_{tot} ermittelt. Die Messergebnisse in Abbildung 1 weisen bei Verwendung von Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen, trotz sehr unterschiedlichem Strömungswiderstand, das gleiche bewertete Schalldämm-Maß auf. Dagegen hat die Hanffaser und das Seegras zwar den gleichen Strömungswiderstand, die Luftschalldämmung ist

jedoch bei dem Wandaufbau mit Seegras auf Grund der höheren Gerüststeifigkeit des vollvolumig eingebrachten Dämmstoffes um 6 dB geringer. Tieffrequent ist die Luftschalldämmung der Doppelständerwand mit dem Seegras der Variante ohne Dämmstoff im Hohlraum sehr ähnlich.

Die Ergebnisse in Abbildung 1 zeigen somit zunächst keinen systematischen Zusammenhang zwischen dem längenbezogenen Strömungswiderstand und dem bewerteten Schalldämm-Maß. Das weist darauf hin, dass die schalltechnischen Eigenschaften eines Faserdämmstoffes allein über diese Kenngröße nur unzureichend beschrieben werden.

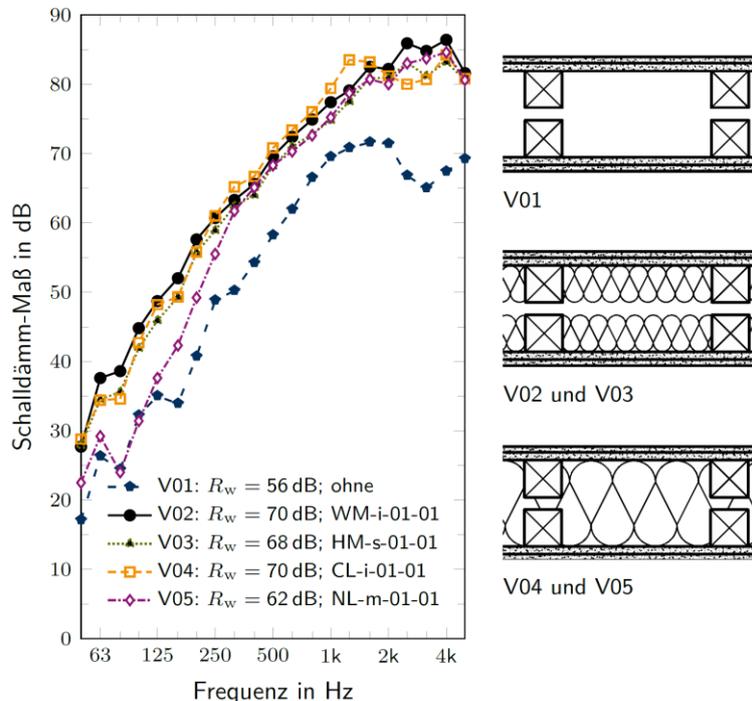


Abbildung 1: Gemessene Schalldämm-Maße von Doppelständerwänden unter Variation der Dämmung. Die Wand besteht aus Holzständern mit zwei Lagen Gipsfaser (12,5 mm + 10 mm) je Seite und einer Hohlraumtiefe $d = 140$ mm [3].

V02: Holzfasermatte, längenbezogener Strömungswiderstand $\sigma = 9$ kPa s/m², Raumdichte $\rho_{\text{tot}} = 46$ kg/m³

V03: Hanffasermatte, längenbezogener Strömungswiderstand $\sigma = 4$ kPa s/m², Raumdichte $\rho_{\text{tot}} = 63$ kg/m³

V04: Zelluloseflocken, längenbezogener Strömungswiderstand $\sigma = 36$ kPa s/m², Raumdichte $\rho_{\text{tot}} = 58$ kg/m³

V05: Seegras, längenbezogener Strömungswiderstand $\sigma = 3$ kPa s/m², Raumdichte $\rho_{\text{tot}} = 75$ kg/m³

Der Einfluss des Faserdämmstoffes auf die Luftschalldämmung des Bauteils wurde auf Basis der in Abbildung 1 dargestellten Messergebnisse, anhand eines semianalytischen Berechnungsmodells näher untersucht. Die frequenzabhängige Schalldämmung der Wandkonstruktion wird hierzu aus der Schalldämmung R_1 der Einzelschale (hier 10 mm GF + 12,5 mm GF) und der Verbesserung ΔR der zweiten (Vorsatz-) Schale berechnet.

$$R = R_1 + \Delta R \quad (1)$$

Die Berechnung von R_1 kann nach DIN EN ISO 12354-1 [2] erfolgen. Bei der Berechnung von ΔR müssen die maßgeblichen Transmissionsanteile berücksichtigt werden:

- Transmission durch die Masse-Feder-Masse-Resonanz
- Transmission durch Resonanzen im Zwischenraum

Als maßgebliche Resonanzen im Zwischenraum sind die gedämpften Eigenmoden (stehende Wellen) in x -, y - und z -Richtung zu berücksichtigen. ΔR wird somit aus dem Transmissionsanteil durch die Masse-Feder-Masse-Resonanz $\underline{\tau}_0$ und den Transmissionsanteilen durch die Eigenmoden des Zwischenraums mit Hohlraumdämmung $\underline{\tau}_{AR,x}$, $\underline{\tau}_{AR,y}$, $\underline{\tau}_{AR,z}$ sowie dem flächenbezogenen Masseverhältnis der Einzelschale zur Gesamtwand bestimmt.

$$\Delta R = -10 \lg \left[\left(\frac{\rho_{A,1}}{\rho_{A,tot}} \right)^2 \left| \underline{\tau}_0 + \underline{\tau}_{AR,x} + \underline{\tau}_{AR,y} + \underline{\tau}_{AR,z} \right| \right] \quad (2)$$

In die Berechnung der Transmissionsgrade fließt das komplexe Kompressionsmodul des Dämmstoffes ein, das sich als deutlich aussagekräftigere Kenngröße für die akustische Materialeigenschaft des Dämmstoffes erwiesen hat als der Strömungswiderstand [1], [5]. Die Berechnung der Schalldämmung wurde zunächst im Vergleich zu den Messdaten validiert (siehe Abbildung 2). Danach konnte der Einfluss der Materialkenngrößen auf die Schalldämmung von Bauteilen mit Faserdämmstoffen aus unterschiedlichen Rohstoffen im Zwischenraum berechnet werden.

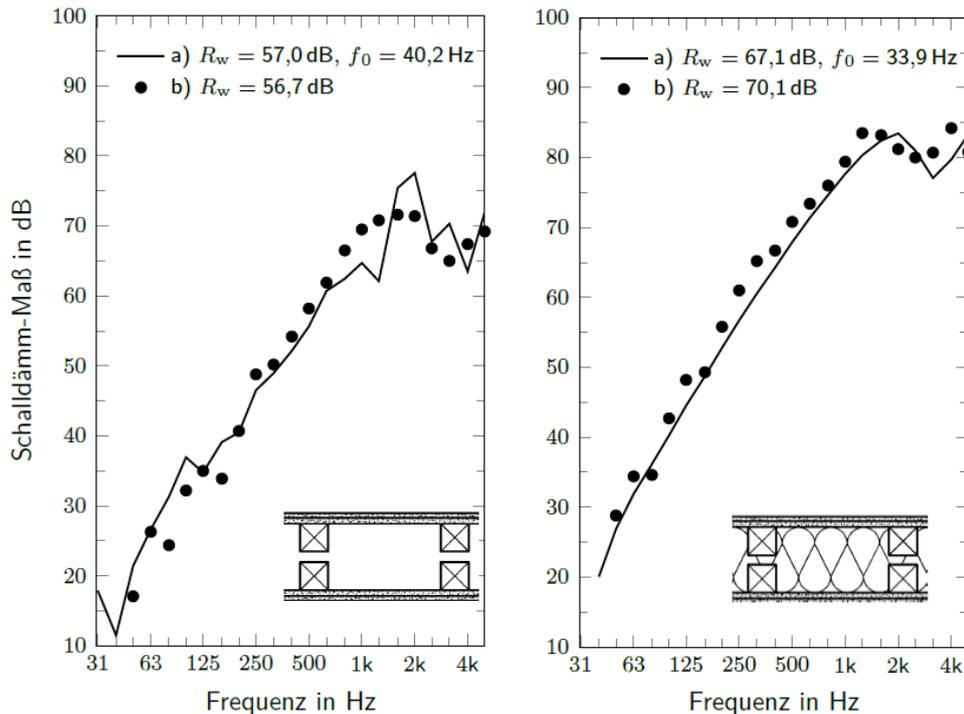


Abbildung 2: Schalldämmung einer zweischaligen Holztafelbau-Wand, links ohne Dämmung im Zwischenraum, rechts mit einem NawaRo-Dämmstoff (Zelluloseflocken). a) Berechnung b) Messung

Abbildung 3, links zeigt für Hanffasermatten im Zwischenraum, den Vergleich der Berechnung nach Gleichung (1) und (2) mit den Messdaten des Wandaufbaus. Zusätzlich werden die Berechnungsergebnisse eines empirischen Berechnungsmodells nach [6] dargestellt. In Abbildung 3, rechts wird die Anwendung des semi-analytischen Berechnungsmodells zur Erklärung des abweichenden schalltechnischen Verhaltens von Seegras gezeigt. Hierzu wurde die Gerüststeifigkeit des vollvolumig eingebrachten Dämmstoffes in der Berechnung berücksichtigt. Die Masse-Feder-Masse-Resonanz wurde durch die zusätzlich wirksame Gerüststeifigkeit von $f_0 = 35,3 \text{ Hz}$ auf $f_0 = 71,6 \text{ Hz}$ verschoben. Der dadurch entstehende Einbruch der Schalldämmung bei 63 Hz bis 80 Hz (Abbildung 3, rechts, Kurve b) gegenüber Kurve a) spiegelt sich auch in den Messwerten wider (Abbildung 3, rechts, Kurve d).

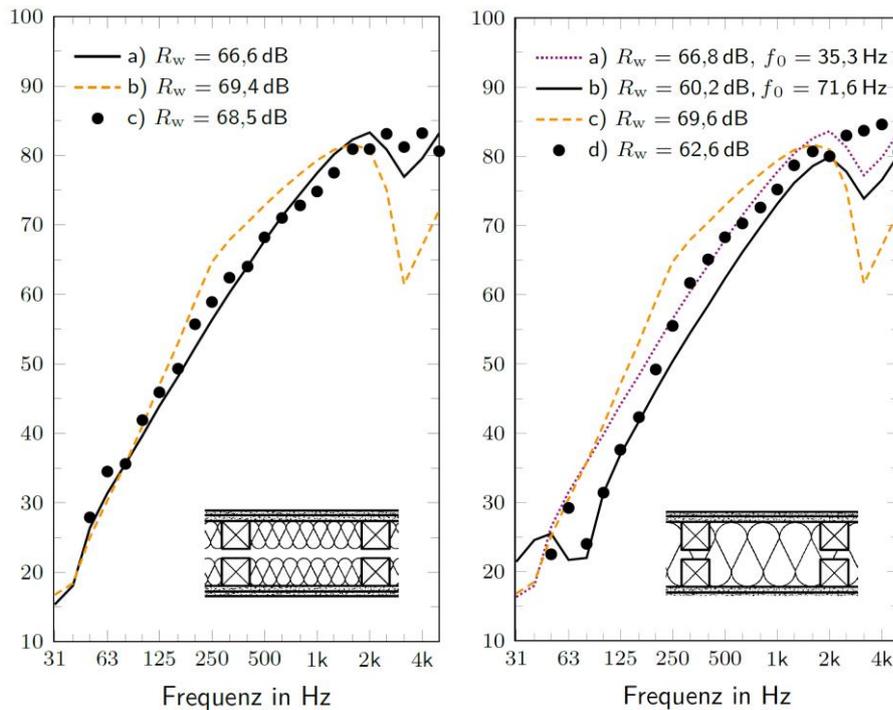


Abbildung 3: Schalldämmung einer zweischaligen Holztafelbau-Wand.

Links Hanffasermatten im Zwischenraum: a) Berechnung, b) empirische Berechnung nach [6], c) Messung. Rechts mit Seegras im Zwischenraum: a) Berechnung ohne Gerüststeifigkeit des Dämmstoffes, b) Berechnung mit Gerüststeifigkeit des Dämmstoffes, c) empirische Berechnung nach [6], d) Messung.

Die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Dämmstoffe, die auf Basis der Materialmessungen des komplexen Kompressionsmoduls in [1] durchgeführt wurden, konnten unterstützend zu den Messergebnissen für die Öffnung der Bauteilkataloge verwendet werden. Sie bestätigten die empirisch gewonnenen Erkenntnisse, dass ein schalltechnisch geeigneter Faserdämmstoff im Hohlraum zum einen die Steifigkeit zwischen den Schalen gegenüber einem Hohlraum ohne Dämmstoff verringert und zum anderen den negativen Einfluss von stehenden Wellen im Hohlraum durch Dämpfung reduziert.

2.2. Dämmstoffe im Deckenhohlraum

Ein Vergleich unterschiedlicher Dämmstoffe und Dämmstoffdicken in einer Deckenkonstruktion wird in Abbildung 4 gezeigt. Zu sehen ist der Norm-Trittschallpegel für Trenndecken mit Hohlraumdämmstoffen aus Jutefaser im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen in 100 mm und 200 mm Dicke. Der NawaRo-Dämmstoff ist gleichwertig zum Mineralfaser-Dämmstoff. Die Verdopplung der Dämmstoffstärke in Verbindung mit der schalltechnisch entkoppelten Unterdecke ermöglicht bei diesem Aufbau die aktuellen Mindestanforderungen an den Trittschall nach DIN 4109 ohne zusätzliche Rohdeckenbeschwerung zu erreichen.

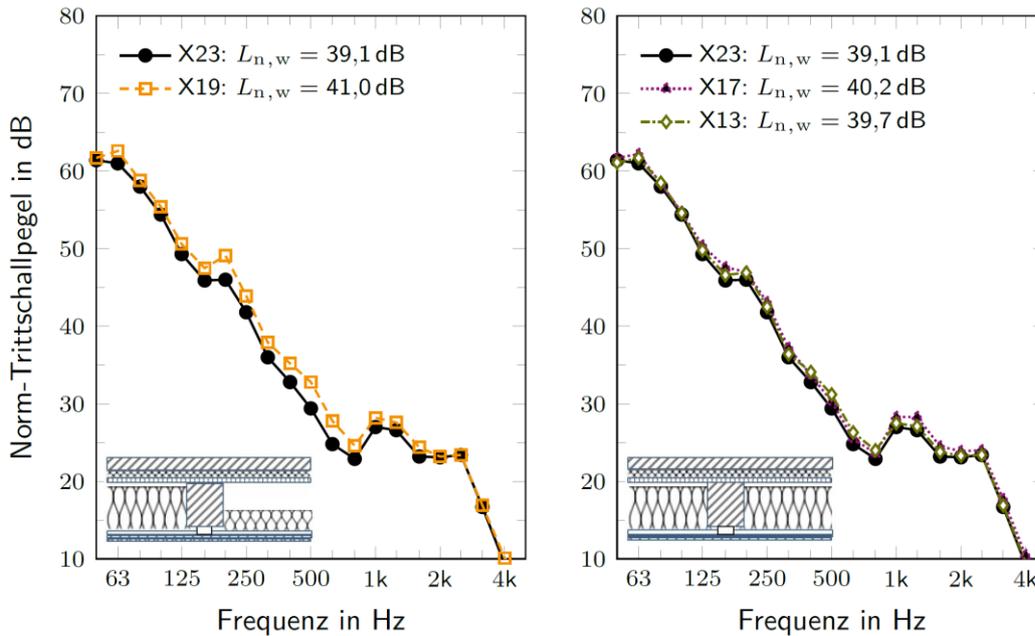


Abbildung 4: Einfluss des Hohlraumfüllstoffes auf den Norm-Trittschallpegel einer Holzbalkendecke mit Zementestrich auf Mineralfaser-Trittschalldämmplatten und entkoppelter Unterdecke mit doppelter Beplankung aus $2 \times 12,5$ mm GKF. Links Variation der Dämmstoffdicke. Rechts Variation der Dämmstoffart.

X23: 200 mm Mineralfaserdämmstoff, $\sigma = 7,0$ kPa s/m², $L_{n,w} = 39,1$ dB, $L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 51$ dB

X19: 100 mm Mineralfaserdämmstoff, $\sigma = 7,0$ kPa s/m², $L_{n,w} = 41,0$ dB, $L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 52$ dB

X17: 200 mm Mineralfaserdämmstoff, $\sigma = 5,0$ kPa s/m², $L_{n,w} = 40,2$ dB, $L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 51$ dB

X13: 200 mm Jutefaserdämmstoff, $\sigma = 3,4$ kPa s/m², $L_{n,w} = 39,7$ dB, $L_{n,w} + C_{1,50-2500} = 51$ dB

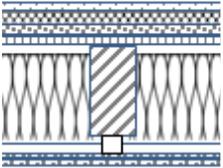
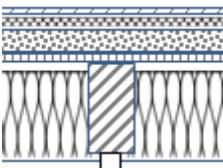
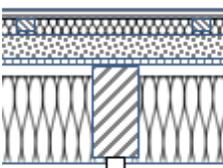
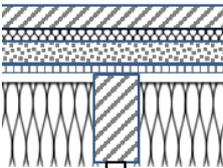
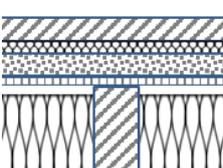
3. Druckfeste Dämmstoffe

Neben den Dämmstofftypen zum Einsatz im Konstruktionshohlraum werden auch druckfeste Dämmstoffe als Aufdachdämmung, Trittschalldämmplatte oder Wärmedämmverbundsystem (WDVS) eingesetzt. Während für Aufdach-Dämmsysteme mit NawaRo-Dämmstoffen bereits Planungsdaten in der Normung vorhanden sind, sollte innerhalb des Projektes gezeigt werden, dass auch hochwertige Deckenaufbauten mit Trittschalldämmplatten aus nachwachsenden Rohstoffen möglich sind. Zusätzlich wurden für Wärmedämmverbundsysteme mögliche Synergieeffekte zwischen Brand- und Schallschutz anhand FEM-Berechnungen untersucht.

3.1. Trittschalldämmplatten aus nachwachsenden Rohstoffen

Bei den Deckenaufbauten sollten hochwertige Varianten mit Trockenestrichelementen, Zementestrichen und Dielenböden realisiert werden. Die in Tabelle 1 dargestellten Aufbauten wurden in Zusammenarbeit mit der begleitenden Arbeitsgruppe ausgearbeitet und optimiert. Bei geeigneter Kombination der geprüften Holzfaser Trittschalldämmplatten mit Schüttungen ($m' \geq 90$ kg/m²) und gut entkoppelten und doppelt beplankten Unterdecken, konnten die Zielwerte in [9] für die Schallschutzniveaus *BASIS+* und *Komfort* ($L_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 50$ dB bzw. $L_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 47$ dB) erreicht werden. Sehr großes Optimierungspotential wies dabei die Abhängung der Unterdecke auf. Hier konnte gezeigt werden, dass optimale Verbesserungen für Eigenfrequenzen der Abhänger im Bereich von $f_0 = 12$ Hz bis 25 Hz erreicht werden [7], [9].

Tabelle 1: Prüfergebnisse von Holzbalkendecken mit Trocken- und Zementestrichen

Schnitt, vertikal	Konstruktionsdetails	$L_{n,w}$ $L_{n,w} + C_{I,50-2500}$ in dB	R_w in dB
1 	25 mm Gipsfaser Trockenestrichelement, $m' = 30 \text{ kg/m}^2$ 30 mm Holzfaser-Trittschalldämmplatte, $s' \leq 30 \text{ MN/m}^3$ 30 mm Schüttung ¹⁾ , $m' = 45 \text{ kg/m}^2$ 22 mm Holzwerkstoffplatte 220 mm Balken + 200 mm Hohlraumdämpfung ²⁾ $\geq 27 \text{ mm}$ Abhängung ³⁾ 12,5 mm GKF, $m' = 10 \text{ kg/m}^2$ 12,5 mm GKF, $m' = 10 \text{ kg/m}^2$	37 ... 38 dB 52 ... 55 dB	79... 80 dB
2 	25 mm Gipsfaser Trockenestrichelement, $m' = 30 \text{ kg/m}^2$ 30 mm Holzfaser-Trittschalldämmplatte, $s' \leq 30 \text{ MN/m}^3$ 60 mm Schüttung ¹⁾ , $m' = 90 \text{ kg/m}^2$ 22 mm Holzwerkstoffplatte 220 mm Balken + 200 mm Hohlraumdämpfung ²⁾ $\geq 27 \text{ mm}$ Abhängung ³⁾ 12,5 mm GKF, $m' = 10 \text{ kg/m}^2$ 12,5 mm GKF, $m' = 10 \text{ kg/m}^2$	33 ... 35 dB 48 ... 53 dB	79... 81 dB
3 	24 mm Dielenboden, Nut- und Federverbindung 40 mm Holzfaser-Trittschalldämmplatten mit Verlegeleisten 60 mm Schüttung ¹⁾ , $m' = 90 \text{ kg/m}^2$ 22 mm Holzwerkstoffplatte 220 mm Balken + 200 mm Hohlraumdämpfung ²⁾ $\geq 27 \text{ mm}$ Abhängung ³⁾ 12,5 mm GKF, $m' = 10 \text{ kg/m}^2$ 12,5 mm GKF, $m' = 10 \text{ kg/m}^2$	34 dB 50 dB	78 dB
4 	50 mm Zementestrich, $m' = 120 \text{ kg/m}^2$ 30 mm Holzfaser-Trittschalldämmplatte, $s' \leq 30 \text{ MN/m}^3$ 60 mm Schüttung ¹⁾ , $m' = 90 \text{ kg/m}^2$ 22 mm Holzwerkstoffplatte 220 mm Balken + 200 mm Hohlraumdämpfung ²⁾ 65 mm U-Direktabhänger, schallentkoppelt + CD-Profil 12,5 mm GKF, $m' = 10 \text{ kg/m}^2$ 12,5 mm GKF, $m' = 10 \text{ kg/m}^2$	32 dB 46 dB	82 dB
5 	50 mm Zementestrich, $m' = 120 \text{ kg/m}^2$ 30 mm Holzfaser-Trittschalldämmplatte, $s' \leq 30 \text{ MN/m}^3$ 60 mm Schüttung ¹⁾ , $m' = 90 \text{ kg/m}^2$ 22 mm Holzwerkstoffplatte 220 mm Balken + 200 mm Hohlraumdämpfung ²⁾ 65 mm U-Direktabhänger, schallentkoppelt + CD-Profil 18 mm GKF, $m' = 14,7 \text{ kg/m}^2$ 18 mm GKF, $m' = 14,7 \text{ kg/m}^2$	29 dB 44 dB	81 dB

1) Kalksplitt in Pappwaben, Splittschüttung mit Latexmilch, Splittschüttung im Lattenraster

2) NawaRo-Faserdämmstoff, $5 \text{ kPa s/m}^2 \leq \sigma \leq 50 \text{ kPa s/m}^2$

3) U-Direktabhänger, schallentkoppelt + CD-Profil, Klick-fix-Direktbefestiger, schallentkoppelt + CD-Profil, Federschiene

3.2. WDV mit Dämmplatten aus nachwachsenden Rohstoffen

Beim Einsatz von Faserdämmplatten in Wärmedämmverbundsystemen stellt vor allem die Anwendung bei Außenwänden in Massivholzbauweise eine schalltechnische Herausforderung dar. Diese Außenwandkonstruktion ist von besonderem Interesse, da sie im mehrgeschossigen Wohnungsbau gerne verwendet wird, aber sowohl im Brandschutz als auch im Schallschutz noch Optimierungsbedarf aufweist. Der gemessene Ausgangswert der Schalldämmung mit $R_w = 39$ dB ist für viele Einsatzzwecke nicht ausreichend (siehe Abbildung 5).

Der einfache Schichtaufbau der Wandkonstruktion steht einer geringen Entkopplung durch das WDV gegenüber. Weiche WDV mit einer günstigen Masse-Feder-Masse-Resonanz sind in der Regel nicht praxistauglich. Zudem bewirkt die erforderliche Befestigung mit Dübeln eine Kopplung zwischen der Putzschicht und der Grundwand. Da diese Aspekte sowohl für WDV mit konventionellen Dämmstoffen als auch für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen gelten, war ein Nachweis der Vergleichbarkeit der Ergebnisse hier nicht zielführend. Eine Analyse der Konstruktion in Bezug auf mögliche Verbesserungsmaßnahmen erschien deshalb sinnvoller. Auf den Messwerten aufbauend wurden hierzu Berechnungen der Schalldämmung auf Basis der Finiten Elemente Methode durchgeführt [4].

Nach der Validierung der Simulation gegenüber den Messwerten, die im angestrebten Bereich lag (Messwert ± 3 dB), wurde zunächst der Einfluss der Dübel auf die Schalldämmung untersucht. Auffällig ist die Verbesserung der Schalldämmung durch die Dübel im Bereich unter 250 Hz durch eine Bedämpfung der Eigenmoden, wie dies auch messtechnisch in [8] ermittelt wurde. Oberhalb von ca. 500 Hz wird die Schalldämmung durch den koppelnden Einfluss der Dübel verschlechtert. Dies kann vermieden werden, wenn der Dübelteller um 50 mm im Dämmstoff versenkt werden. Die aus Wärme- / Feuchteschutzgründen montierte zusätzliche Dämmschicht zwischen Dübelteller und Putzebene bewirkt dann eine gute Entkopplung.

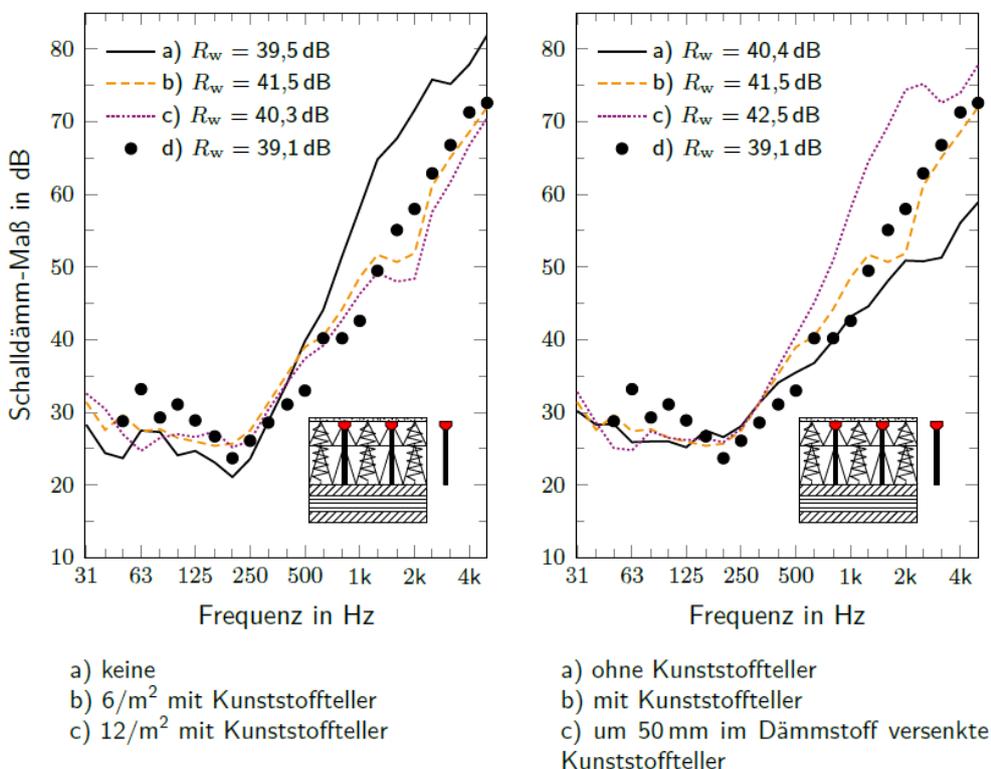


Abbildung 5: Simulation der Schalldämmung einer 100 mm Massivholzwand mit WDV (7 mm Putz, 160 mm Holzfaserdämmplatten). Berechnungsergebnisse für die Variation der Dübelanzahl (links) und der Putzankopplung an den Dübel (rechts). Zum Vergleich das Messergebnis der Bauteilprüfung (Kurve d) mit 6 Kunststoffteller-Dübeln pro m^2 .

Im zweiten Schritt wurde die Putzschicht variiert, um das Verbesserungspotential, der für den Brandschutz erforderlichen Zusatz-Putzmasse, für die Schalldämmung des Wandaufbaus zu simulieren. Abbildung 6, links zeigt den Einfluss der Putz-Rohdichte auf die Schalldämmung. Rechts wird die Schalldämmung bei einer 30 mm starken Putzschicht gezeigt. Die Erhöhung der Putzschichtdicke lässt eine starke Verbesserung der Schalldämmung erwarten. Die aus brandschutztechnischen Gründen erforderliche Maßnahme ermöglicht damit gleichzeitig Zielwerte $R_w > 45$ dB zu erreichen.

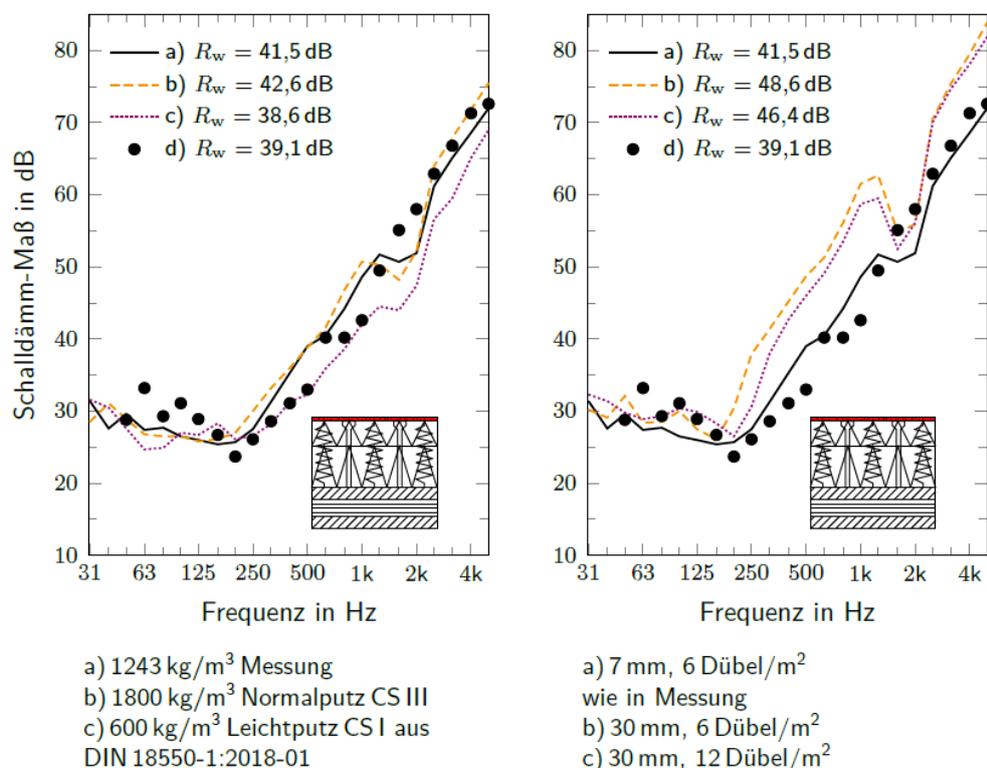


Abbildung 6: Simulation der Schalldämmung einer Massivholzwand mit WDVS. Berechnungsergebnisse für die Variation der Putz-Rohdichte (links) und der Putzdicke (rechts). Zum Vergleich das Messergebnis der Bauteilprüfung (Kurve d) mit 7 mm Putz, $\rho = 1243$ kg/m³ und 6 Dübel/m².

4. Zusammenfassung

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen können in vielen Bereichen alternativ zu konventionellen Dämmstoffen eingesetzt werden. Die schalltechnischen Untersuchungen im Rahmen des Projektes ergaben im direkten Vergleich der Dämmstoffe und bei der Prognose mit semi-analytischen Berechnungsmodellen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Auf Basis dieser Ergebnisse konnte die Bandbreite der einsetzbaren Dämmstoffe in den aktuellen Bauteilkatalogen [9] deutlich erweitert werden. Die erweiterten Bauteilkataloge werden nun im Rahmen der aktuellen Überarbeitung in DIN 4109-33 übernommen.

Auch für druckbelastete Dämmstoffe wurden geeignete Aufbauten gefunden. Während der Einsatz als Aufdachdämmung in der Praxis geläufig ist, bestanden bei Holzfasertrittschalldämmplatten auf Grund der höheren dynamischen Steifigkeit bei vielen Anwendern Bedenken. Hier konnten hochwertige Decken-Konstruktionen für den Einsatz dieser Trittschalldämmplatten entwickelt und im Bauteilkatalog berücksichtigt werden. Ein reiner Austausch gegenüber konventionellen Trittschalldämmplatten wäre in diesem Fall nicht zielführend gewesen.

Bei den WDV-Systemen stellte die Wirkungsweise der Befestigungsdübel eine wichtige Erkenntnis dar, die auf Basis von FEM-Simulationen gewonnen und mit Messergebnissen abgesichert wurde. Ebenso die Möglichkeit der Synergiegewinne zwischen Brandschutz, Wärmeschutz und Schallschutz durch die Erhöhung der Putzdicke und die Versenkung der Dämmstoffteiler.

Von besonderem Interesse für die Wirtschaftlichkeit der Konstruktionen ist es, in Zukunft die möglichen Synergieeffekte zwischen Wärme-, Brand- und Schallschutz bei WDVS, Unterdecken und Beplankungen besser zu nutzen.

5. Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die sehr hilfreichen Diskussionen mit den Instituten der Forschungskooperation und die planerische Unterstützung durch die Arbeitsgruppe, sowie für die finanzielle Unterstützung durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

6. Literatur

- [1] Rabold, A., Mecking, S., Huber, A., Kohrmann, M., Mehr als nur Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, Teilbereich Bauakustik, Forschungsbericht Technische Hochschule Rosenheim, 2020
- [2] DIN EN ISO 12354-1, Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen, Ausgabe 2017-11
- [3] Huber, A., Ermittlung von Planungsdaten für den Schallschutz von Außenwänden in Holzbauweise mit unterschiedlichen Dämmstofftypen: Datensammlung – Bauteilmessung – Simulation. Bachelorarbeit. Hochschule Rosenheim 2018
- [4] Huber, A., Entwicklung FEM basierter Modelle zur Vorhersage schalltechnischer Eigenschaften von Massivholzelementen mit Wärmedämmverbundsystemen aus nachwachsenden Rohstoffen, Masterarbeit, Technische Hochschule Rosenheim, 2020
- [5] Mecking, S., Rabold, A., Huber, A., Insulation materials made of renewable raw materials for the sound insulation prognosis of building components, Tagungsband ICA, Aachen 2019
- [6] Weber, L., Buchele, A., Akustische Sanierung von Wohngebäuden mit Vorsatzschalen und Vorsatzkonstruktionen: Berechnung, Planung, Optimierung, Fraunhofer IRB Verlag, 2010.
- [7] Rabold, A., Schödel, B., Schanda, U., Schalltechnische Optimierung von Unterdeckenabhängern, Tagungsband DAGA 2019
- [8] Pirch, P. und B. Nusser, Schallschutz von WDVS auf Brettsperrholzwänden, Tagungsband Holz Haus Tage, Bad Ischl 2017
- [9] Blödt, A., Rabold, A., Halstenberg, M., Ecker, T., Huber, A., Huissel, L., Löffler, S., Scheuerpflug, M., Schallschutz im Holzbau – Grundlagen und Vorbemessung, holzbau handbuch, Reihe 3, Teil 3, Folge 1, Holzbau Deutschland 2019

Holzbau im Spiegel des Außenlärms: Zusammenhänge und aktuelle Erkenntnisse

Dr. Andreas Meier
Müller-BBM GmbH
Planegg bei München, Deutschland



Holzbau im Spiegel des Außenlärms: Zusammenhänge und aktuelle Erkenntnisse

1. Vorbemerkungen

Der Nachweis zum Schallschutz gegen Außenlärm in der zentralen deutschen Bauakustiknorm DIN 4109 ist mit der aktuellen Ausgabe der Norm Anfang 2018 überarbeitet worden. Die aktualisierte Norm nimmt moderate Anpassungen der Mindestanforderungen vor. Für den Schallschutz gegen Außenlärm wurde die separate Untersuchung des Tag- und Nachtzeitraum eingeführt und die für die Planung zu grobe 5 dB-Stufung der Anforderungswerte gegen eine 1 dB-Stufung abgelöst. Der Beitrag beschreibt die Hintergründe und die neue Nachweisführung. Hieraus werden Planungsgrundsätze für die Holzbauweise abgeleitet.

2. Neufassung der DIN 4109

2.1. Allgemeines

Die zentrale Schallschutznorm für den Hochbau, die DIN 4109, wurde auf Basis der Ausgabe aus dem Jahr 1989 in einer neuen Fassung herausgegeben [1]. Die Zeit für eine Anpassung der Schallschutznorm war überreif, denn folgende Entwicklungen fanden im Laufe der Zeit statt:

- Die regelmäßige Anwendung der alten Fassung förderte Defizite zu Tage, die beseitigt werden mussten.
- Die Planung des Schallschutzes kann durch neue Erkenntnisse heute deutlich zielorientierter und sicherer erfolgen. Der Einfluss jedes Bauteils und einzelner Schallübertragungswege kann separat diagnostiziert werden.
- Anpassungen an Vereinbarungen zu Nachweisverfahren im europäischen Handelsraum wurden notwendig.
- Für den Schallschutz gegen Außenlärm sollte auch der für einen erholsamen Schlaf wichtige Nachtzeitraum einbezogen werden.
- Baustoffe und Bauweisen haben sich durch Detailentwicklungen und gute Ideen fortlaufend weiterentwickelt.

Der bauakustisch erfahrene Anwender wusste längst, dass die aufgelaufenen Defizite der alten Norm insbesondere in Bezug auf die Berechnungsverfahren mittlerweile ein erhebliches Ausmaß erreicht hatten. So wurden z.B. sehr leichte flankierende Bauteile regelmäßig unterschätzt. Für die monolithische, wärmedämmende Ziegelbauweise musste hilfsweise in Ergänzung zur Norm eine bauaufsichtliche Zulassung für die Berechnung der Luftschalldämmung geschaffen werden. Diese wurde nun in die neue Norm integriert. Die Holzbauweise hat sich weiterentwickelt und war in der alten Norm nur rudimentär behandelt. Neue Erkenntnisse z.B. zu Reihenhaustrennwänden, Vorsatzschalen, Estrichen oder Fenstern, waren nicht eingearbeitet. Was erfahrene Anwender ausgleichen können, stellte für weniger erfahrene Anwender durchaus ein Anwendungs- und Haftungsrisiko dar.



Abbildung 1: Struktur der neuen Schallschutznorm für den Hochbau DIN 4109:2018-01 bzw. 2020-08

Nachfolgend werden die wichtigsten Änderungen der Schallschutznorm erläutert.

2.2. Schalltechnische Anforderungen – nur geringe Änderungen

Die Norm formuliert in Teil 1 Mindestanforderungen an den baulichen Schallschutz, was nun im Titel eindeutig angegeben ist. Die schalltechnischen Schutzziele (Vertraulichkeit bei normaler Sprechweise, Schutz vor unzumutbarer Belästigung) sind benannt und entsprechen der Zielsetzung nach der EU-Bauproduktverordnung Nr. 305/2011. Die daraus abgeleiteten schalltechnischen Anforderungen erscheinen unter Berücksichtigung dieser Schutzziele nach der Erfahrung der Planung und der Bauwirtschaft mit einer vergleichsweise geringen Zahl an Beschwerderückläufer von Gebäudenutzern im Wesentlichen als angemessen. Sie entsprechen also offensichtlich der allgemeinen Erfahrung und sind immer in Kombination mit üblichen, zugelassenen Bauweisen und Baumaterialien zu sehen [2].

Im Wesentlichen ist das Anforderungsniveau gegenüber der alten Fassung der DIN 4109 aus dem Jahr 1989 gleichartig geblieben. Anpassungen wurden lediglich bei langjährig erprobten Bauweisen nach den Regeln der Technik, wie z. B. der Trittschalldämmung von Decken oder der Schalldämmung von Haustrennwänden (Doppel- und Reihenhaus) vorgenommen. Neu aufgenommen wurde eine Anforderung an die Trittschalldämmung von Balkonen und zulässigen Geräuschpegel bei Betrieb von raumluftechnischen Anlagen im eigenen Wohnbereich, was bislang nicht geregelt war. Die Erfahrung aus der Praxis zeigt, dass diese Anforderungen mit allen wesentlichen und bauüblichen Regelkonstruktionen erfüllt werden können.

2.3. Schallschutz gegen Außenlärm

Urbane Räume werden mit neuen Bauprojekten weiter verdichtet. Auch mit Lärm belastete Grundstücke scheiden aufgrund der hohen Nachfrage von Nutzern bei der Auswahl aktuell nicht mehr grundsätzlich aus. In der Folge rücken Gebäude stärker an Verkehrswege und Gewerbeflächen heran. Daher gelangt der Außenlärm in Planungsprozessen häufiger als früher in den Fokus.

Eine wesentliche Änderung und Verbesserung der neuen Schallschutznorm für die Gebäudenutzer ist die Einbeziehung der Schallbelastung des Nachtzeitraums. Es wird nun sichergestellt, dass der Schallschutz grundsätzlich mindestens 10 dB besser als am Tag ist. Sofern sich die Außenlärmpegel gegenüber dem Tagzeitraum im Nachtzeitraum nicht um 10 dB mindern, so müssen die Schalldämm-Maße der Außenbauteile von Schlafräumen entsprechend höher dimensioniert werden. Das ist z.B. regelmäßig bei Einwirkung von Schienenverkehrslärm der Fall, da die bereitgestellten Zugzahlen nachts häufig eine gleiche Belastung wie am Tag anzeigen. Für Straßenverkehr ist bei stark frequentierten Straßen nachts von einem Rückgang der Beurteilungspegel von 5 dB gegenüber dem Tag auszugehen. Innerorts treten in der Regel für relevante Straßen eine Minderung von 8 dB auf. Durch die Einbeziehung des Nachtzeitraums ist daher für Verkehrsgereusche von einer Erhöhung der schalltechnischen Anforderungen an die Außenbauteile auszugehen. Eine Unterscheidung zwischen Tag- und Nachtzeit sowie eine 10 dB Stufung ist jedoch schon seit langem in den einschlägigen Regelwerken zu Verkehrsgereuschen obligatorisch.

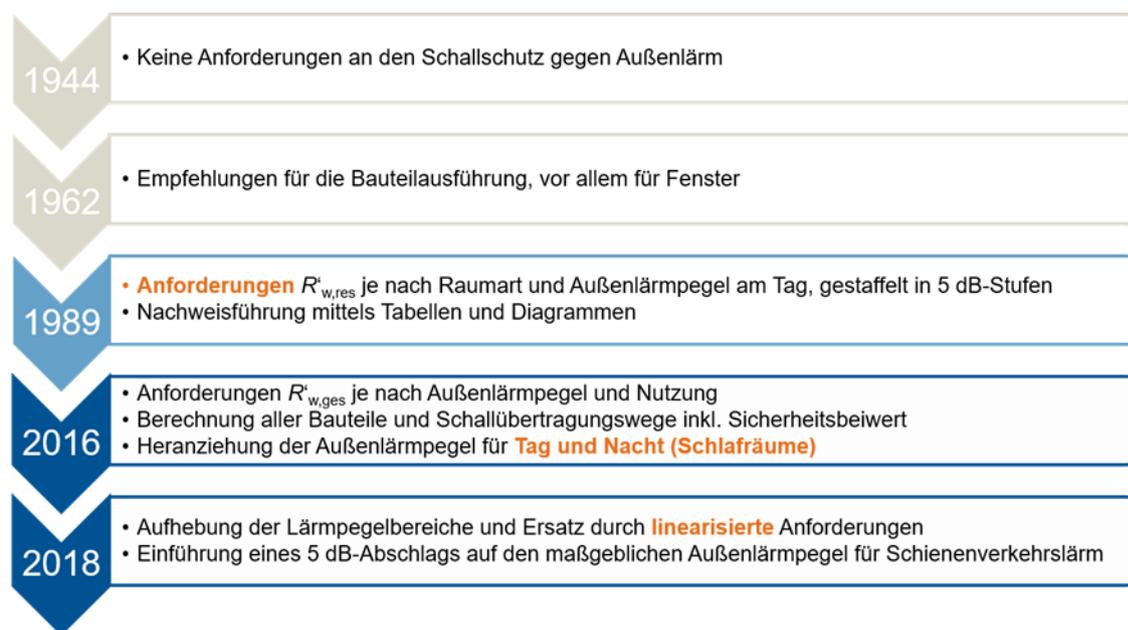


Abbildung 2: Neuerungen der verabschiedeten Fassungen der DIN 4109 zum Schallschutz gegen Außenlärm

Im Zuge der Einbeziehung des Nachtzeitraums wurde die grobe 5 dB Stufung der Anforderung überprüft. In der Vergangenheit führte die Erhöhung der Außenlärmpegel um 1 dB teilweise zur Erhöhung der Anforderung um 5 dB, da der nächste Lärmpegelbereich erreicht wurde. Die Heranziehung von Lärmpegelbereichen ist noch möglich, jedoch bietet sich dem Planer die Möglichkeit zur dB-genauen Auslegung der Außenbauteile, um Überdimensionierung zu vermeiden.

In der Praxis besteht regelmäßig die Frage, wann der Schallschutz gegen Außenlärm nach DIN 4109 detailliert betrachtet werden muss. Als erster Indikator können hier Lärmaktionspläne der Kommunen dienen. Zeigen diese im Fall von Wohngebäuden für das betreffende Grundstück z.B. einen Wert von Nachts $L_N > 50$ dB(A) an, dann ist eine detaillierte Berechnung der Beurteilungspegel angeraten. Prinzipiell sind die Lärmaktionspläne jedoch nur als Indikator geeignet, da in Bezug auf die 16. BImSchV inkompatible Pegelgrößen und lediglich grobe Raster verwendet werden.

Es können für einfache Verkehrswege (z.B. «lange gerade Straße») auch Nomogramme verwendet werden, mit denen aus der jeweils vorhandenen Verkehrsstärke Beurteilungspegel ablesbar sind. Solche Nomogramme finden sich in Anhang A der DIN 18005-1.

Mittlerweile ist es für größere Bauvorhaben oder Planungsumgriffe üblich, dass eine Gebäudelärmkarte auf Grundlage eines digitalen 3D-Modells erstellt wird. Hieraus lassen sich fassaden- und geschossweise Beurteilungspegel angeben und maßgebliche Außenlärmpegel L_a ableiten, mit denen in Abhängigkeit der Gebäudeart, z.B. Wohn- oder Bürogebäude, die Anforderung an die Schalldämm-Maße $R'_{w,ges}$ der Außenbauteile berechnet werden können, vgl. Gleichung 1.

$$R'_{w,ges} = L_a - K_{Raumart}$$

mit $K_{Raumart} =$

- 25 dB für Krankenhäuser und Sanatorien
- 30 dB für Wohngebäude, Übernachtungsräume in Hotel, Schulräumen
- 35 dB für Bürogebäude

Gleichung 1: Berechnung der Anforderung an das Gesamt-Schalldämm-Maß der Außenbauteile $R'_{w,ges}$ in Abhängigkeit des maßgeblichen Außenlärmpegels L_a und der Raumart.

2.4. Schienenbonus? – Kein Schienenbonus, aber Untersuchungsbedarf!

Mit Einführung der Anforderung für den Nachtzeitraum ergab sich für die neue DIN 4109 ein besonderes Dilemma: In der alten DIN 4109 wurde keine Unterscheidung für Schienen- und Straßenverkehrslärm vorgenommen. Im Fall von Schienenverkehr war seinerzeit jedoch bekannt, dass aufgrund hochfrequenter Schallanteile des Schienenverkehrs physikalisch bedingt eine bessere Dämmwirkung der Außenbauteile vorhanden ist [8]. Für Straßenverkehr mit Verbrennungsmotoren traten hingegen verstärkt tieffrequente Anteile auf, die durch übliche Bauteile weniger gut gedämmt werden.

Um weiterhin mit Einzahlangaben (A-Bewerteter Schalldruckpegel, bewertetes Schalldämm-Maß) zu arbeiten, wendete man Korrektursummanden an, um aus der gewünschten A-Schallpegeldifferenz von maßgeblichen Außenlärm und Innenpegel die Anforderung an das bewertete Bau-Schalldämm-Maß $R'_{w,ges}$ des Außenbauteils abzuleiten [7].

Entsprechende Unterscheidungen bzw. Differenzierungen für einzelne Lärmarten wurden z.B. mit Herausgabe der VDI 2719 [5] im Jahr 1987 eingeführt und sind auch in der vom Gesetzgeber erlassenen 24.BImSchV [6] etabliert. Da in der alten Norm DIN 4109 im Jahr 1989 jedoch nur die Tagbelastung herangezogen wurde, hatte man sich Ende der 80er Jahren offensichtlich entschieden, keine Unterscheidung zwischen den Lärmarten vorzunehmen. Man nahm offensichtlich bei Schienenverkehr eine Überdimensionierung der Bauteile auf Basis des Tagwertes in Kauf, um aufgrund der geringen Nachtreduzierung des Schienenverkehrslärms auch nachts den Schallschutz sicherzustellen.

Leider sind die genauen Hintergründe in den verfügbaren Unterlagen nicht dokumentiert. Lediglich aus einem handschriftlichen Dokument ist nachzuvollziehen, dass als historischer «Spektrumsanpassungswert» in den Anforderungen an die Schalldämm-Maße einheitlich ein Zuschlag von 5 dB angewendet wurde, um einen mittleren Innenpegel von 35 dB(A) am Tag sicherzustellen. Da dieser Wert jedoch mit vom Verbrennungsmotor geprägtem Straßenverkehr korreliert wurde und bei Schienenverkehr nicht anzuwenden war, ist in der neuen DIN 4109 mit Einführung der separaten Tag-/Nachtbetrachtung vom Beurteilungspegel von Schienenverkehr ein Abschlag von 5 dB anzuwenden, um den in den Anforderungen enthaltenen Zuschlag zu neutralisieren. Ein Bonus / Malus-Regelung für unterschiedliche Lärmträger ist in DIN 4109 nicht beabsichtigt und auch sicherlich fehl am Platz. Es geht um den Schallschutz von Nutzern im Hochbau und für diese ist in erster Linie unabhängig vom Lärmträger sicherzustellen, dass entsprechend der Zielsetzung der Norm eine ausreichende Schalldämmung der Gebäudehülle für entsprechende Innenpegel vorgesehen wird.

Aus den Erläuterungen ist ersichtlich, dass die zugrundeliegenden Erkenntnisse vor mehr als 30 Jahre ermittelt wurden. Ungeklärt ist, ob die Unterscheidung Straße/Schiene im Hinblick auf den Schallschutz gegen Außenlärm uneingeschränkt gültig ist. Die im Laufe der Zeit verschärften Anforderungen an Vorbeifahrtgeräusche von Kraftfahrzeugen als auch die Verschärfungen der Anforderungen an Schienenfahrzeuge lassen vermuten, dass die spektrale Verteilung des Außenlärms Veränderungen unterworfen ist.

2.5. Überarbeitetes Berechnungsverfahren und erweiterter Bauteilkatalog

Wesentliche Änderungen der neuen Norm betreffen das Nachweisverfahren sowie den deutlich erweiterten Bauteilkatalog. Das tabellarische Nachweisverfahren wurde ersetzt durch ein Rechenverfahren. Dieses Verfahren berücksichtigt alle relevanten Schallübertragungswege zwischen Räumen nach den abgestimmten europäisch vereinheitlichten Methoden [3] [4].

Das Verfahren ist anwendbar für alle gängigen Bauarten, ausreichend validiert und praxiserprobt. Es ist festzustellen, dass mit großer Sorgfalt seit 20 Jahren im Zusammenwirken aller relevanten Baustoffhersteller und Interessensgruppen, die in DIN 4109 [1] angewendeten Rechenmethoden in transparenter Weise von allen Seiten beleuchtet und überprüft wurden. Das Verfahren wird bereits seit 2010 im Bereich von Baustoffzulassungen angewendet. Die Praxis zeigt, dass für die Anwendung von der Industrie bereitgestellte Softwareprodukte bereits verfügbar und erprobt sind.

In angrenzenden Ingenieurdisziplinen wie z.B. der Tragwerksplanung ist die bewusste Steuerung der gewünschten Sicherheit zwischenzeitlich obligatorisch. Auch in DIN 4109 wurde ein Sicherheitskonzept implementiert und dieses klar gekennzeichnet. Diese neue Klarheit schneidet bewusst die alten Zöpfe ab, nach denen im alten Verfahren die Sicherheiten teils versteckt und immer pauschal integriert waren. Hier besteht zukünftig Potenzial, um bewusst mit den anzuwendenden Sicherheiten umzugehen.

Die Bauteilangaben in Form eines Bauteilkatalogs wurden stark erweitert. Die angegebenen Kennwerte sind durch schalltechnische Messungen abgesichert. Durch den neuen Bauteilkatalog ist die Wahrscheinlichkeit gestiegen, dass der Anwender schalltechnische Angaben zur benötigten Konstruktion findet.

Aktuell werden neueste Erkenntnisse aus der anwendungsbezogenen Forschung zu Vorhangfassaden und WDV-System eingearbeitet. Verbänden, die z.B. einzelne Bauweisen oder Produktgruppen vertreten, steht es offen, abgesicherte schalltechnische Auslegungen in die Berechnungsverfahren zu implementieren, um den Planer herstellernerneutral bei der Auslegung und Bewertung zu unterstützen. Durch die klare Gliederung soll eine ggf. dynamische Ergänzung der Normenteile unterstützt werden.

Das neue Berechnungsverfahren in Verbindung mit dem neuen Bauteilkatalog erlaubt eine detaillierte Auslegung. Durch die Vermeidung von Überdimensionierungen sind Baukosteneinsparungen möglich.

Die Anwendung der überarbeiteten Berechnungsverfahren schärft den Blick auf die Mechanismen der Schallübertragung und führt zu vorteilhaften Produktentwicklungen. Beispiele finden sich auch im Holzbau, z.B. durch schalltechnisch optimierte Stoßstellen.

3. Vergleichsrechnungen

In der Diskussion zu den Folgen der Überarbeitung des Schallschutzes gegen Außenlärm tritt die Frage auf, inwieweit sich das bislang bekannte Anforderungsniveau geändert hat. Hierzu sind nachfolgend Vergleichsberechnungen dargestellt.

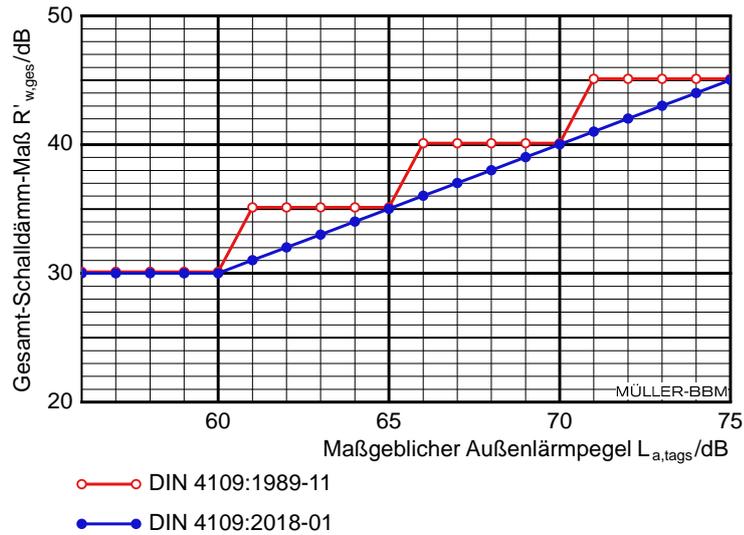


Abbildung 3: Straßenverkehrslärm an einer innerstädtischen Straße, $\Delta L_{Tag/Nacht} = 10$ dB (Verkehrsbelastung in der Nacht 10% vom Tagwert)

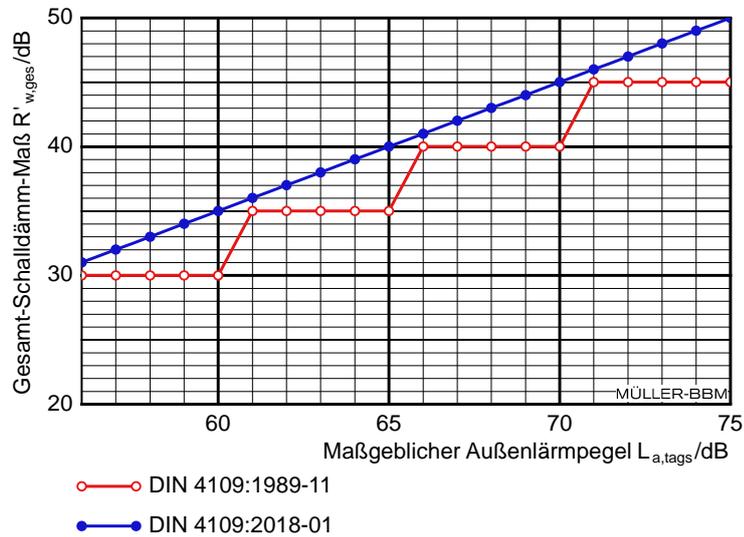


Abbildung 4: Straßenverkehrslärm an einer Autobahn, $\Delta L_{Tag/Nacht} = 5$ dB (Verkehrsbelastung in der Nacht 32% vom Tagwert)

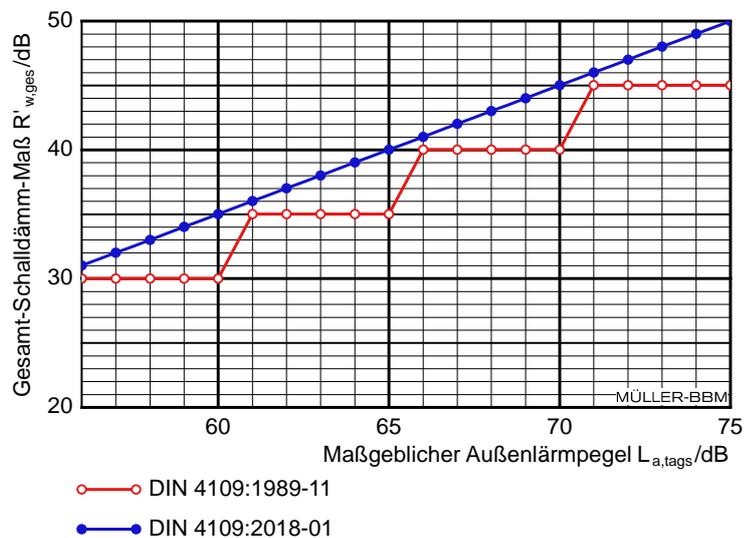


Abbildung 5: Schienenverkehrslärm, $\Delta L_{Tag/Nacht} = 0$ dB, d.h. gleicher Pegel am Tag und in der Nacht

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die neue DIN 4109 im Bereich von Straßen, die nachts deutlich weniger befahren sind als am Tag, eine berechnete Reduzierung der Anforderungen an die Außenbauteile von bis zu 4 dB auftritt (vgl. Abb. 2). Für Straßen und Schienen, die nachts nur einen leichten bis keinen Rückgang der Lärmbelastung aufweisen, tritt hingegen eine Verschärfung um bis zu 5 dB auf (siehe Abb. 3 und 4).

Die Änderungen der Anforderungen berücksichtigen jeweils einzuhaltende Innenpegel, die unter anderem mit dem Umweltbundesamt abgestimmt wurden. Insofern kann erwartet werden, dass die in den jeweiligen länderspezifischen Bauordnungen definierten Schutzziele (siehe z.B. §3 der Musterbauordnung MBO) eingehalten werden.

4. Holzbauteile zum Schallschutz gegen Außenlärm

Das Gesamt-Schalldämm-Maß $R'_{w,ges}$ einer Fassade setzt sich in Abhängigkeit der jeweiligen Fläche aus dem Schalldämm-Maßen der einzelnen Bauteile und Elemente in der Fassade, bezogen auf die Fassadenfläche, zusammen. Das bedeutet, das Gesamt-Schalldämm-Maß wird vor allem durch schwache Bauteile oder Elemente beeinflusst.

In der Regel sind die Fenster die schalltechnisch schwächsten Außenbauteile. Die neue DIN 4109 [1] führt in den Bauteilkatalogen herstellerunabhängig Fensterkonstruktionen auf, die als Einfach-, Verbund- oder Kastenfensterkonstruktionen ein bewertetes Schalldämm-Maß von $R_w = 25$ dB bis 45 dB abdecken. Produktspezifisch sind schalltechnisch höchstwertige Sonderkonstruktionen bis zu $R_w = 55$ dB bekannt. Die Praxiserfahrung zeigt, dass unter Berücksichtigung aktueller Anforderungen an den Wärmeschutz Einfachfenster von $R_w = 35$ dB bis 45 dB gebräuchlich sind.

Die Außenwand oder die Dachkonstruktion als opake Außenbauteile sollten gegenüber den Fenstern ein deutlich höheres Schalldämm-Maß aufweisen. Folgende Angaben können im Sinne einer ersten Orientierung genannt werden: Ein Wert von ca. $R_w = 40$ dB bis 45 dB stellt auch ohne Außenlärmbelastung die unterste Grenze dar, die nicht unterschritten werden sollte, da das Gebäude ansonsten von den Nutzern als hellhörig gegenüber Außenlärm beschrieben wird. Bei moderater Außenlärmbelastung ist sicherlich ein Wert von $R_w = 45$ dB bis 50 dB einzuhalten. Bei höherer Außenlärmbelastung sind opake Außenbauteile mit bewerteten Schalldämm-Maßen von $R_w \geq 50$ dB erforderlich.

Um Konstruktionen in Holzbauweise schalltechnisch zu beurteilen eignet sich der Bauteilkatalog in DIN 4109-33 [1].

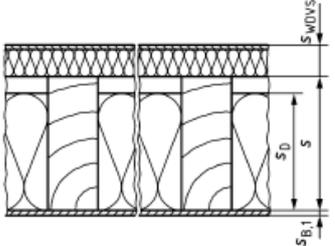
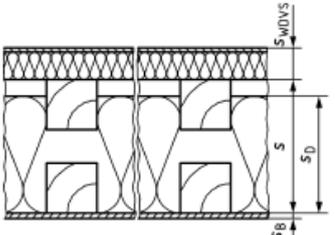
Zeile	Schnitt, horizontal	Konstruktionsdetails				R_w ($C; C_{tr}$) dB
		Mindestdämm-schicht-dicke ^a s_D mm	Holz-ständer ^b b/h mm	Mindest-schal-en-abstand s mm	Bekleidung ^c $s_{B,n}$ mm	
7		140	60/160	160	s_{WDVS} Putz ^e + WF 60 $s_{B,1}$ HW 15	46 (-1; -6)
8		140	Stiel 2 x 60/60 Rähm 60/160 durch- gehend	160	s_{WDVS} Putz ^e + WF 60 s_B HW 15	49 (-1; -4)

Abbildung 6: Auszug aus dem Bauteilkatalog zu Außenwänden in Holzbauweise in DIN 4109-33 [1]

Spalte	1	2	3		
Zeile	Schnitt, vertikal	Konstruktionsdetails		R_w (C ; C_{tr}) dB	
		mm	Bauteilbeschreibung		
1			Dachdeckung	50 ^b (-3; -9)	
			Lattung, Konterlattung,		
		120 bis 180	Zwischensparrendämmung ^a		
			Lattung		
2			12,5	Gipsplatten GK	52 (-3; -10)
				Dachdeckung,	
			Lattung, Konterlattung,		
		≥ 180	Zwischensparrendämmung ^c		
3			12,5	Gipsplatten GK	52 (-4; -11)
				Dachdeckung,	
			Lattung, Konterlattung,		
		≥ 200	Zwischensparrendämmung ^d		
		10	Gipsfaserplatten GF		

Abbildung 7: Auszug aus dem Bauteilkatalog zu Dächern in Holzbauweise in DIN 4109-33 [1]

Alternativ können auch bauphysikalische Datenbanken zu Holzbauteilen mit qualitätsgesicherten Angaben zu den Schalldämmungen herangezogen werden. Exemplarisch sei die Datenbank Dataholz.eu genannt [9]. In den beiden folgenden Abbildungen sind vergleichende Auswertungen dargestellt.

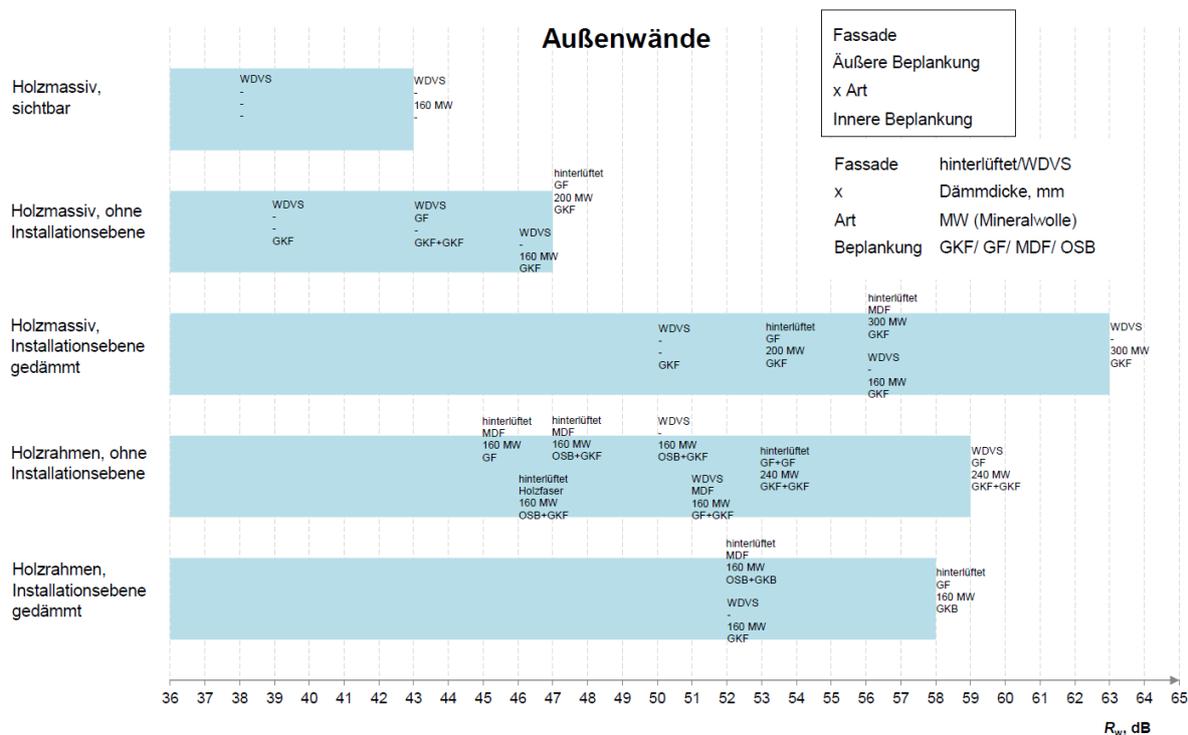


Abbildung 8: Zusammenstellung von Außenwänden aus der Datenbank Dataholz.eu [9]

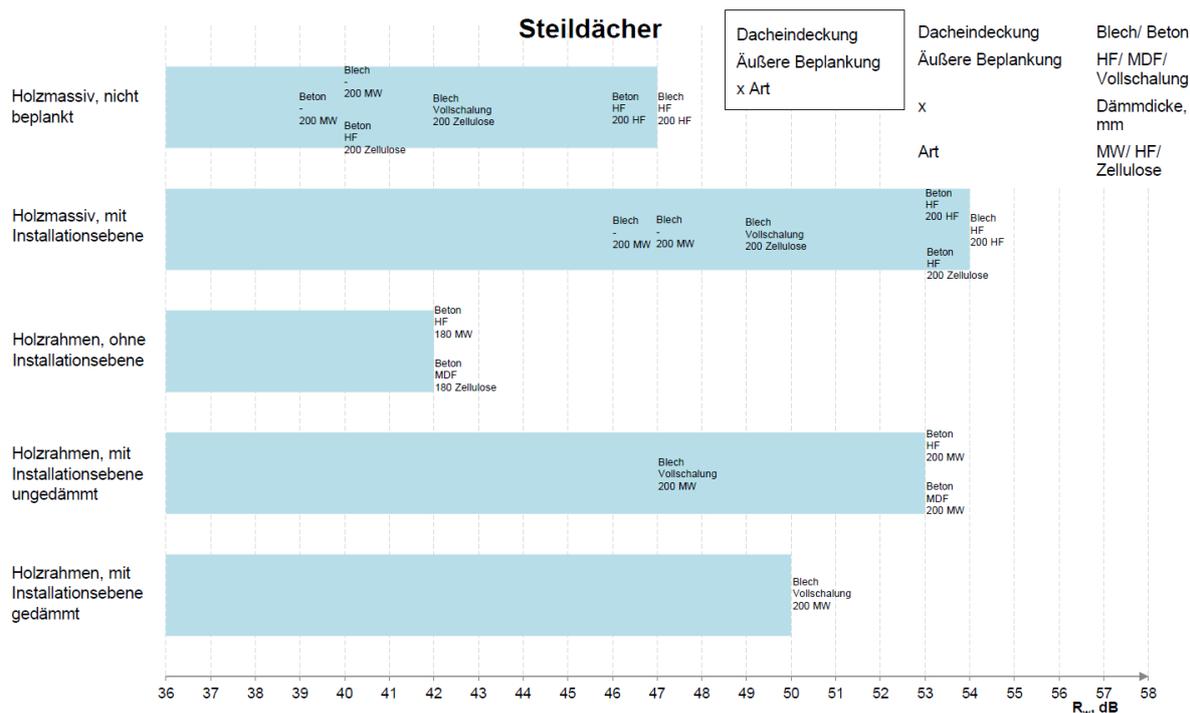


Abbildung 9: Zusammenstellung von Steildächern aus der Datenbank Dataholz.eu [9]

Für die Praxis können auf Grundlage solcher Zusammenstellungen vereinfachte und exemplarische Zusammenhänge angegeben werden:

- Bei Außenlärmbelastung sind Außenbauteile sowohl in Holzrahmen- als auch Holzmassivbauweise prinzipiell geeignet.
- Eine raumseitige Installationsebene ist bei Außenlärmbelastung sinnvoll, um ausreichend hohe Schalldämm-Maße sicherzustellen.
- Außenwände in Holzrahmenbauweise und einem WDV-System z.B. mit Holzfaserdämmstoffen erreichen vergleichsweise hohe Schalldämm-Maße.
- Durch eine Erhöhung der Konstruktionstiefe von Außenbauteilen können höhere Schalldämm-Maße erreicht werden. Der Schallschutz erfordert Platz.
- Dachkonstruktionen mit Sichtsparren oder sichtbaren Holzmassivbauteilen sind bei Anforderungen an den Schallschutz gegen Außenlärm nur bedingt geeignet.
- Für Dachkonstruktionen ist neben der Zwischensparrendämmung aus Faserdämmstoff eine Aufsparrendämmung ebenfalls aus Faserdämmstoff günstig.

5. Blick in die Zukunft – Forschungsvorhaben zum Schallschutz gegen Außenlärm

Die dargestellten Regelungen zum Außenlärm führen insbesondere aufgrund der Regelungen zum Schienenverkehrslärm und der Kritik am angewendeten pauschalen Abschlag von 5 dB bei der Ermittlung des Maßgeblichen Außenlärmpegels (siehe Abschnitt 2.4) zu zwei Schlichtungsverfahren und einem Schiedsverfahren beim Deutschen Institut für Normung.

Zur Bewertung der derzeitigen Nachweisführung wurden daher im Rahmen einer Forschungsarbeit im Auftrag des DIBt - Deutschen Institut für Bautechnik Außenlärmspektren aus Regelwerken für die Berechnung von Verkehrslärm und exemplarischen Messungen zusammengetragen, um einen Überblick über zu erwartende Außenlärmspektren zu erhalten. Diese wurden systematisch mit exemplarischen Schalldämmspektren zu Ermittlung der Korrektursummanden ausgewertet und daraus Ansatzpunkte für eine zukünftige Überarbeitung der DIN 4109 abgeleitet.

Aktuelle wird ein im Abschlussbericht des Forschungsberichtes [10] angegebener Normungsvorschlag diskutiert, bei dem sämtliche pauschalen Korrektursummanden gestrichen werden und statt dessen zukünftig bei der Nachweisführung die Anforderungen für die Außenbauteile an das jeweilige bewerteten Schalldämm-Maße zuzüglich Spektrums-Anpassungswerte C und C_{tr} verwendet wird. Durch die diskutierten Änderungen sind in Abhängigkeit der Außenlärmart gegenüber dem derzeitigen Stand sowohl Verringerungen als auch Erhöhungen der Anforderungen zu erwarten.

6. Literatur

- [1] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau, Ausgabe 2020-05, 2018-01 bzw. 2016-07
- Teil 1: Mindestanforderungen
 Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen
 Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes
 Teil 31: Rahmendokument
 Teil 32: Massivbau
 Teil 33: Holz-, Leicht- und Trockenbau
 Teil 34: Vorsatzkonstruktionen vor massiven Bauteilen
 Teil 35: Elemente, Fenster, Türen, Vorhangfassaden
 Teil 36: Gebäudetechnische Anlagen
 Teil 4: Bauakustische Prüfungen
 Teil 5: Erhöhte Anforderungen
- [2] Gerhard Hilz: Die neue DIN 4109 im Ländervergleich. Forum-Holzbau 8. HolzBauSpezial – Bauphysik, März 2017
- [3] Heinz-Martin Fischer: Neufassung der DIN 4109 auf Basis europäischer Regelwerke des baulichen Schallschutzes. In: Bauphysik-Kalender 2014, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn
- [4] Oliver Kornadt, Maximilian Redeker: Normative Neuerungen zum Schallschutz im Hochbau. In: Deutsches Ingenieurblatt 10-2018.
- [5] VDI-Richtlinie 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen. Ausgabe 1987-08
- [6] 24. BImSchV «Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung» zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 1997-02
- [7] Wolfgang Moll, Renate Szabunia: Beurteilung des Schallschutzes durch Außenbauteile; Messtechnische Untersuchung der Relation zwischen bewertetem Bau-Schalldämm-Maß und A-Schallpegeldifferenz. Forschungsbericht 105 04 511 im Auftrag des Umweltbundesamtes, November 1985
- [8] S. Jovicic, R. Wettschureck: Bewertetes Schalldämm-Maß und A-Schallpegel-Differenz bei Fenstern – Statistische Auswertung der an fertigen Bauten gemessenen Schalldämmkurven, Bericht Nr. 7217-35/1, Oktober 1983
- [9] Datenbank für Gebäudebauteile in Holzbauweise: www.Dataholz.eu, Holzforschung Austria
- [10] Forschungsvorhaben Schallschutz gegen Außenlärm, Anforderungen zum baulichen Schallschutz gegen Außenlärm nach DIN 4109 unter Berücksichtigung des derzeitigen Stands der Technik als Grundlage für bauaufsichtliche Regelungen. Bauforschung, Band T 3383, Andreas Meier, Müller-BBM GmbH, Planegg, 2021, 136 S., zahlr. Abb. u. Tab., Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-7388-0623-6, <https://www.baufachinformation.de/forschungsvorhaben-schallschutz-gegen-aussenlaerm/fb/254211>

AKUSTIK

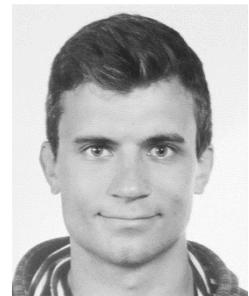
Hören wir, was wir planen?

Verbesserung des Schalldämm-Maßes durch Vorsatzschalen im Holzmassivbau

Simon Mecking
Kurz und Fischer GmbH
Feldkirchen-Westerham, Deutschland



Tobias Mutter
Kurz und Fischer GmbH
Feldkirchen-Westerham, Deutschland



Andreas Rabold
Technische Hochschule Rosenheim
und ift Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Verbesserung des Schalldämm-Maßes durch Vorsatzschalen im Holzmassivbau

1. Einleitung

Zur Prognose des Einflusses von Vorsatzschalen auf das bewertete Schalldämm-Maß enthalten die Normen DIN 4109-34:2016-07 und DIN EN ISO 12354-1:2017-11 Berechnungsansätze. Diese gelten für frei stehende Konstruktionen ohne mechanische Verbindung zum Grundbauteil und Konstruktionen, bei denen die Vorsatzschale über eine Dämmschicht mit dem Grundbauteil verbunden wird. Die semiempirischen Prognoseansätze basieren auf Datengrundlagen aus dem konventionellen Massivbau. Validierungen zur Anwendung bei Massivholzelementen als Grundbauteile fehlen bislang. Die vorhandene Berechnungsgrundlage weist bei Vorsatzkonstruktionen, welche mit dem Grundbauteil konstruktiv verbundenen sind, eine Lücke auf. Das führt zu Prognoseunsicherheiten in der Planungspraxis.

Dieser Beitrag zeigt durch eine Analyse von Messdaten aus Prüfständen, wo Grenzen vorhandener Prognosen [1, 3] liegen und in welchen Anwendungsbereichen Modifikationen sowie Ergänzungen sinnvoll erscheinen.

2. Berechnung

Gemäß [1] berechnet sich die bewertete Verbesserung der Schalldämmung durch frei stehende, gedämmte Vorsatzschalen mit Masse-Feder-Masse-Resonanzfrequenzen f_0 von 30 Hz bis 160 Hz nach dem semiempirischen Zusammenhang in Gleichung (1).

$$\Delta R_w(30 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 160 \text{ Hz}) = \max \begin{cases} 74,4 - 20 \lg f_0 - 0,5 R_w \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

Dabei ist R_w das bewertete Schalldämm-Maß des Grundbauteils. Das bewertete Luftschallverbesserungsmaß ΔR_w von zweischaligen Bauteilen gegenüber der Schalldämmung des Grundbauteils ist maßgeblich abhängig von der Lage von f_0 nach Gleichung (2). Die Resonanzfrequenz berechnet sich aus den beiden flächenbezogenen Massen der beteiligten Bauteile und der dynamischen Steifigkeit s' der Zwischenschicht [10]. Gleichung (2) ist die Grundlage für die Berechnungsverfahren zu Vorsatzschalen in [1, 3].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (2)$$

In [2] wird für die dynamische Steifigkeit einer Luftschicht mit Dämmung ein pauschaler Wert von 0,111 MPa in Gleichung (3) angenommen. Dieser Wert wird in [3] zur Berechnung von f_0 der Vorsatzschalen mit gedämmter Zwischenschicht verwendet. Der längenbezogene Strömungswiderstand eines geeigneten Dämmstoffes liegt im Bereich $5 \text{ kPa s/m}^2 \leq r \leq 50 \text{ kPa s/m}^2$ [vgl. 1].

Werden zur Befestigung der Vorsatzschalen am Grundbauteil elastische Verbindungsmittel eingesetzt, kann die Gesamtsteifigkeit aus der Summe der Steifigkeit des gedämmten Hohlraumes und der Steifigkeit aus den Verbindungsmitteln nach (3) berechnet werden [vgl. 8].

$$s' = \frac{0,111 \times 10^6}{d} + \begin{cases} 0 & \text{frei stehend} \\ n D & \text{punktförmig elast.} \\ \frac{D}{e} & \text{linienförmig elast.} \end{cases} \quad (3)$$

Dabei ist n die Anzahl der punktförmigen Verbinder je m^2 , e der Achsabstand der Federstreifen in m und D bzw. D_1 die Federsteifigkeit des Verbindungsmittels.

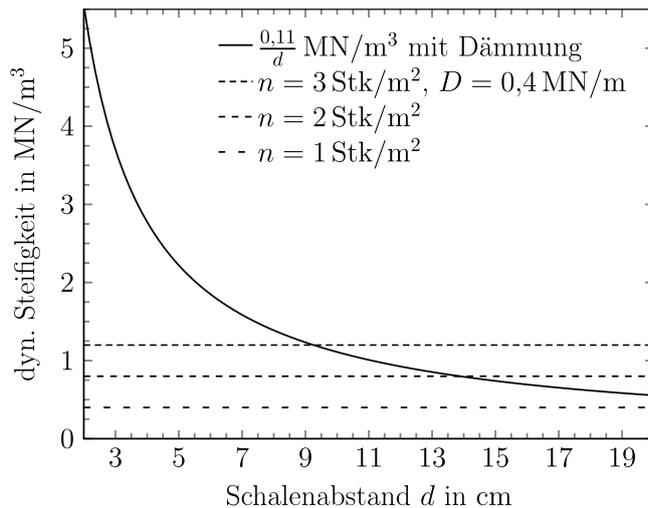


Abbildung 1: Dynamische Steifigkeit der Luftschicht in Abhängigkeit des Schalenabstandes im Vergleich zur *zusätzlichen* dynamischen Steifigkeit aus elastisch gekoppelten, punktförmigen Verbindungsmitteln in Abhängigkeit von der Anzahl je Quadratmeter n . Als exemplarische Federsteifigkeit eines Verbindungsmittels wird $D = 0,4$ MN/m verwendet.

2.1. Kennwerte elastischer Verbindungsmittel

In [8] wurden Federsteifigkeiten von Verbindungsmitteln ermittelt, welche zum Teil auch für die Befestigung von Vorsatzschalen an Wänden eingesetzt werden. Tabelle 1 zeigt Kennwerte basierend auf diesen Ergebnissen, die zur Berechnung von f_0 in (2) und (3) verwendet wurden.

Tabelle 1: Federsteifigkeiten der punktförmigen und linienförmigen Verbindungsmittel [vgl. 5]

Verbindungsmittel	D	D_1	Einheit
Direktschwingabhänger (DSA)	0,19	-	MN/m
Befestigungs-Clip (BC)	0,35	-	MN/m
Schwingbügel (SB)	0,44	-	MN/m
Federschiene (FS)	-	0,38	MN/m^2

Abbildung 1 zeigt die Größenordnung der Steifigkeitsanteile aus den elastischen Verbindungsmitteln im Vergleich zum Anteil der dynamischen Steifigkeit der Luftschicht im Hohlraum. Je geringer der Schalenabstand, desto höher ist der Steifigkeitsanteil aus der Hohlraumschicht im Vergleich zum Verbindungsmittelanteil. Daher beeinflussen elastische Verbindungsmittel bei Verwendung an Vorsatzschalen mit einem Schalenabstand von nur wenigen Zentimeter die kombinierte Steifigkeit lediglich geringfügig. Je größer der Schalenabstand, desto entscheidender wird der Anteil aus den elastischen Verbindungsmitteln.

2.2. Kennwerte Grundbauteile

Für Massivholzelemente mit und ohne biegeweiche Direktbeplankung kann das bewertete Schalldämm-Maß aus dem empirischen Zusammenhang in Gleichung (4) nach [6] basierend auf Prüfstandmessungen abgeschätzt werden. Die Anwendung von (4) ist beschränkt auf Elementdicken von 0,08 m bis 0,16 m sowie einer flächenbezogenen Masse von $m'_{\text{tot}} = 35$ kg/m^2 bis 160 kg/m^2 .

$$R_w = 25 \lg \frac{m'_{\text{tot}}}{1 \text{ kg/m}^2} - 7 \quad (4)$$

2.3. Starre linienförmige Kopplungen

Nach Heckl [vgl. 5] kann im Spezialfall von Vorsatzschalen mit starren linienförmigen Verbindungen an dicken Einfachwänden mit niedriger Koinzidenzfrequenz f_c das Luftschallverbesserungsmaß oberhalb von f_0 mit Gl. (5) berechnet werden. Der Massenterm mit m'_{GW} für die flächenbezogene Masse der Grundwand und m'_{VS} für die Vorsatzschale ist gegenüber [5] hier ergänzt [vgl. 9].

$$\Delta R = -10 \lg \left(\left(\frac{f_0}{f} \right)^4 + \frac{2 c_{\text{air}}}{\pi} \frac{1}{e f_c} \left(\frac{m'_{\text{GW}}}{m'_{\text{VS}} + m'_{\text{GW}}} \right)^2 \right) \quad (5)$$

Der Faktor vor dem Massenterm stellt den Transmissionsanteil für die Abstrahlung linienförmiger Brücken dar, welcher von der Koinzidenzgrenzfrequenz f_c der Beplankung, dem Ständerabstand e sowie der Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft c_{air} abhängt. Der zweite Summand bestimmt gleichzeitig das theoretisch maximale, bewertete Luftschallverbesserungsmaß in (6) der starren, linienförmig gekoppelten Vorsatzschale. Dies kann bei starrer Kopplung erreicht werden, wenn die Resonanzfrequenz hinreichend tief ist ($f_0 \ll 100$ Hz), sodass es für die Einzahlwertbildung irrelevant wird.

$$\Delta R_{\text{w,rigid,L}}(f_0 \ll 100 \text{ Hz}) \approx \max \Delta R(f) \approx 10 \lg(e f_c) - 23,4 + 20 \lg \left(\frac{m'_{\text{GW}} + m'_{\text{VS}}}{m'_{\text{GW}}} \right) \quad (6)$$

3. Messdaten aus Prüfständen

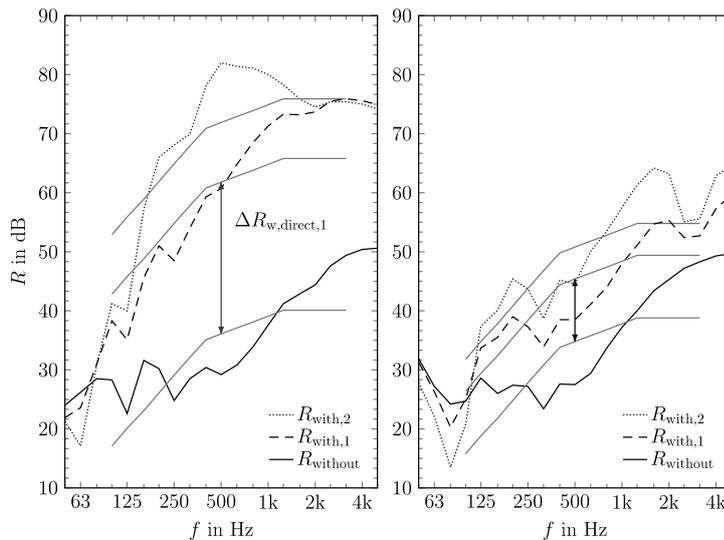
Die Messdaten wurden von Prüfinstituten, den Herstellern von Massivholzelementen und von Trockenbausystemen zur Verfügung gestellt. Die Zusammenstellung und Aufbereitung der Messdaten erfolgten in [7]. Insgesamt liegen 37 Datensätze zu einseitigen Vorsatzschalen und 21 Datensätze zu beidseitigen Vorsatzschalen vor. Dabei liegt jeweils die gemessene Luftschalldämmung des Grundbauteils und des zusammengesetzten Bauteils vor. Für die Analyse in diesem Beitrag sind nur Vorsatzschalen mit Hohlraumdämmung unter Ausschluss von Sonderkonstruktionen berücksichtigt. Damit verbleiben 32 Datensätze von einseitigen und 17 Datensätze zu beidseitigen Vorsatzschalen. Eine Konstruktionsübersicht zu den einseitigen Vorsatzschalen gibt Tabelle 2. Die Grundwände bestehen zu etwa 90 % aus Brettsperrholzelementen (CLT). Jeweils zwei Konstruktionen haben Brettstapel- oder OSB-Grundwände. Nur sehr wenige Grundwände weisen eine Direktbeplankung auf. Die überwiegende Anzahl der Vorsatzschalen sind zweilagig beplankt. Die Vorsatzschalen mit Holzlattung sind alle einlagig.

Tabelle 2: Konstruktionsübersicht zu Datensätzen mit einseitiger Vorsatzschale. Dabei ist d_{GW} die Dicke der Grundwand, d der Schalenabstand, m'_{VS} die flächenbezogene Masse der Vorsatzschale, n die Anzahl der punktförmigen und e der Abstand der linienförmigen Verbindungsmittel.

Gruppe	N	d_{GW}	d	m'_{VS}	n	e
	Stk	mm	mm	kg/m ²	1/m ²	cm
frei stehend	10	75–158	55–105	12–38	-	-
punktförmig	11	94–158	27–60	9–36	1–3	-
Federschiene	5	75–100	23–30	11–30	-	50–63
Holzlattung	6	90–135	35–80	9–11	-	62–63

Abbildung 2 zeigt Messdatensätze, bei denen jeweils die Grundwand allein sowie mit einseitiger und zweiseitiger Vorsatzschale gemessen wurde. Insbesondere bei Wänden mit beidseitig frei stehenden Vorsatzschalen ist bei höheren Frequenzen ein Einfluss durch die Maximalschalldämmung des Prüfstandes auf die Messergebnisse zu erwarten. Beide Beispiele zeigen, dass der Einsatz der Vorsatzschalen im mittleren und hochfrequenten Bereich die Luftschalldämmung im Gegensatz zur Grundwand erhöht. Unter 100 Hz führt der Einsatz der Vorsatzschalen aufgrund der Lage von f_0 im Bereich von 63 Hz bis 80 Hz zum Teil zur deutlichen Verschlechterung der Luftschalldämmung. Ein symmetrischer Aufbau von beidseitigen Vorsatzschalen verstärkt diese Verschlechterung im Gegensatz zu einem asymmetrischen Aufbau.

Wie Abbildung 2(b) zeigt, reduziert die Befestigung der Vorsatzschale mit Holzlatten an der Grundwand die zu erwartende Verbesserung deutlich gegenüber der frei stehenden Variante in Abbildung 2(a). Grund hierfür ist der zusätzliche Übertragungsweg über die Holzlattung, welcher bei mittleren und höheren Frequenzen maßgeblich ist.



(a) CLT 94 mm,
frei stehend, $d = 85$ mm,
 $2 \times 12,5$ mm GKB

(b) CLT 100 mm,
Holzlattung, $d = 50$ mm,
 $e = 62$ cm, 12,5 mm GKF

Abbildung 2: Gemessene Schalldämm-Maße ohne, mit einseitiger (Index 1) und mit beidseitiger (2) Vorsatzschale. Hohlraumbedämpfung mit Faserdämmstoff. Die beidseitigen Vorsatzschalen sind symmetrisch aufgebaut.

4. Auswertung

Die bewerteten Schalldämm-Maße R_w können bei der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz in Abbildung 2 abgelesen werden. Die bewerteten Luftschallverbesserungsmaße aus Messungen werden nach [4] entsprechend der Gl. (7) auf eine Dezimalstelle bestimmt.

$$\Delta R_{w,\text{direct}} = R_{w,\text{with}} - R_{w,\text{without}} \quad (7)$$

Zur Analyse der Messdaten sind diese auf f_0 normiert, dabei ist f_0 differenziert nach Gleichung (3) berechnet. Die Abbildung 3(a), (c) und (e) und zeigen, dass die Berechnungen von f_0 in dieser Darstellungsform plausibel erscheinen, da im Bereich von $f/f_0 = 1$ die Einbrüche der Luftschallverbesserungen der Vorsatzschalen auftreten. Oberhalb von diesem Bereich entspricht der Anstieg $40 \lg(f/f_0)$.

Die Regressionsanalyse der bewerteten Luftschallverbesserungsmaße aus den Prüfstandmessungen erfolgt mit Gleichung (8), die auch in den Normen [1, 3] für Konstruktionen mit f_0 von 30 Hz bis 160 Hz zugrunde liegt.

$$\Delta R_{w,\text{direct}} = a - b \lg f_0 - 0,5 R_{w,\text{without}} \quad (8)$$

Die Abbildungen 3(b), (d) und (f) zeigen die Ergebnisse für die Parameter a und b dieser Regressionsanalyse. Dazu sind die Einzahlwerte aus den Messergebnissen durch Umstellung von Gleichung (8) auf der y -Achse in Abhängigkeit der berechneten Resonanzfrequenz f_0 auf der x -Achse aufgetragen. Im Fall frei stehender Vorsatzschalen in Abbildung 3(b) ist zusätzlich der semiempirische Zusammenhang, welcher in den Normen [1, 3] zur Verfügung steht, eingezeichnet. Der Vergleich der Normvariante mit den Ergebnissen der Regressionsanalyse auf Basis der Vorsatzschalen vor Holzmassivbau-Grundwänden zeigt, dass für $f_0 < 70$ Hz die Vorsatzschalen im Holzmassivbau mit kleiner werdendem f_0 tendenziell besser werden als nach [1, 3] prognostiziert. Insgesamt zeigen die Regressionsanalysen der Messdaten in Abbildung 3 mit Gleichung (8) hohe Bestimmtheitsmaße auf.

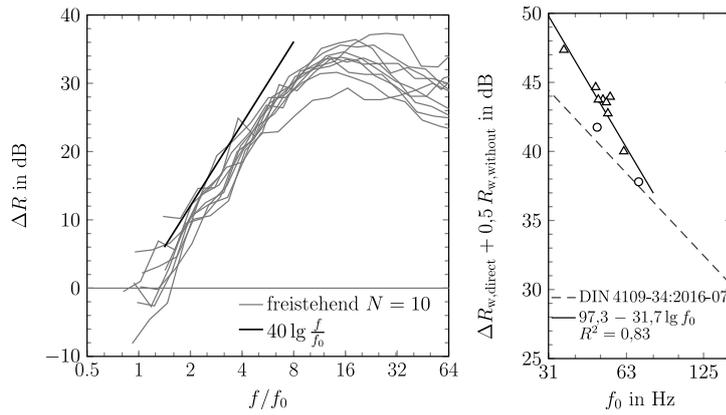
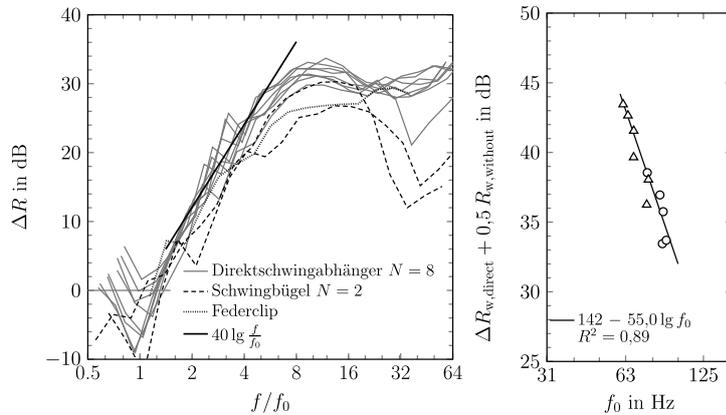
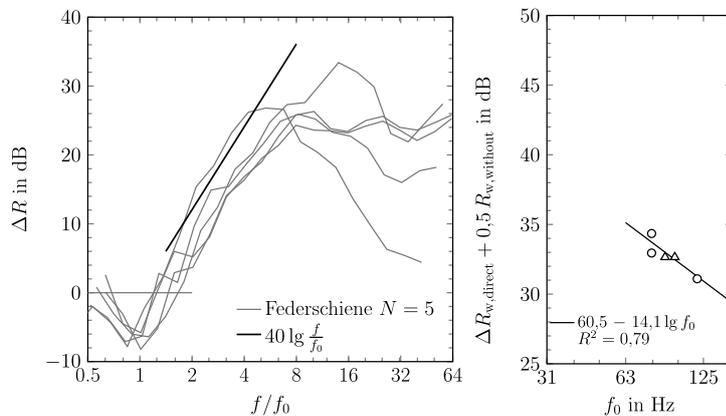
(a) frei stehend vor CLT, OSB
 $f_0 = 36 \text{ Hz bis } 70 \text{ Hz}$ (b) $N = 10$ (c) punktförmig vor CLT
 $f_0 = 61 \text{ Hz bis } 91 \text{ Hz}$ (d) $N = 11$ (e) Federschiene vor CLT, BST
 $f_0 = 79 \text{ Hz bis } 118 \text{ Hz}$ (f) $N = 5$

Abbildung 3: *Links*: Luftschallverbesserungsmaße einseitiger Vorsatzschalen mit normierter Frequenzachse. *Rechts*: Semiempirischer Zusammenhang nach Gleichung (8) bei Ausführung mit einfacher (Kreise) oder doppelter Beplankung (Dreiecke). Die dynamische Steifigkeit ist differenziert nach Gleichung (3) berechnet.

Der Zusammenhang der Differenzen zwischen den bewerteten Luftschallverbesserungsmaßen, ermittelt aus den Messergebnissen aus mit Holzlatten befestigten Vorsatzschalen, und den Rechenergebnisse nach Gleichung (6) zeigt nur ein geringes Bestimmtheitsmaß auf (Abbildung 4). Gleichzeitig liegt der Unterschied zwischen Messung und Berechnung im Bereich von $-2,0 \text{ dB}$ bis $0,4 \text{ dB}$. Aus den theoretischen Überlegungen erscheint eine direkte Prognose mit Gleichung (6) als hinreichend geeignet.

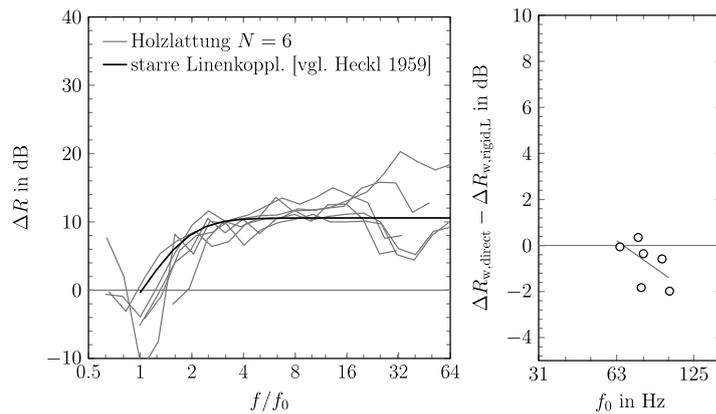
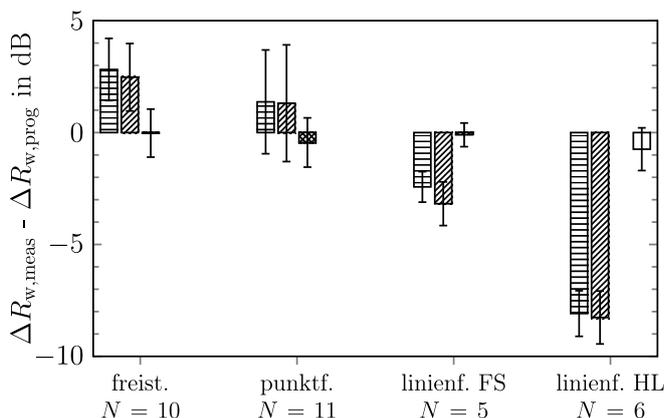
(a) frei stehend vor CLT, BST
 $f_0 = 65 \text{ Hz bis } 101 \text{ Hz}$ (b) $a = 14,6; b = 8,0;$
 $R^2 = 0,33; N = 6$

Abbildung 4: (a) Luftschallverbesserungsmaße einseitiger Vorsatzschalen mit normierter Frequenzachse. (b) Zusammenhang zwischen Differenz aus Messung und Prognose von ΔR_w nach Gleichung (6) einer starren linienförmigen befestigten einfachen Beplankung und f_0 .

Eine Übersicht zu den mittleren Abweichungen zwischen den messtechnisch ermittelten, bewerteten Luftschallverbesserungsmaßen und den prognostizierten ist in Abbildung 5 dargestellt. Die horizontal schraffierten Balken können als Validierung des Normverfahrens auf Holzmassivbauteile an diesen Beispieldaten verstanden werden. Dabei ist zu beachten, dass die Prognose gemäß [1, 3] nur für frei stehende Vorsatzschalen anzuwenden ist. In dieser Darstellungsform geht allerdings die Information verloren, dass der Unterschied tendenziell abhängig von f_0 ist (vgl. Abbildung 5). Der Unterschied zwischen den Balken mit horizontaler Schraffur und den mit diagonaler Schraffur ist, dass bei den letzteren für die Grundwand das Schalldämm-Maß mithilfe von Gleichung (4) abgeschätzt wurde, was zu geringen Unterschieden führt.

Die Balken mit kreuzweise diagonaler Schraffur ergeben sich bei Verwendung von a und b aus Abbildung 5. Dabei ist zu beachten, dass der Unterschied geringer werden muss, da die Grundlage für den Fit und der Vergleich der Messdaten auf denselben Daten beruht. Darum ist vor Verwendung für Prognosen eine Validierung an unabhängigen Daten nötig.



▨ $74,4 - 20 \lg f_0 + 0,5 R_{w, \text{without, meas}}$ [DIN 4109-34:2016-07]

▩ $74,4 - 20 \lg f_0 + 0,5 R_{w, \text{without, prog}}$ [DIN 4109-34:2016-07, Huber 2018]

▧ $a - b \lg f_0 + 0,5 R_{w, \text{without, meas}}$

□ starre Linienkoppl., [vgl. Heckl 1959]

Abbildung 5: Mittelwert und Standardabweichung der Abweichung von Messung zu Prognose des bewerteten Luftschallverbesserungsmaßes einseitiger Vorsatzschalen von Massivholzwänden bei differenzierter Berechnung von f_0 . Zusammenhang aus [1, 3] ist nur für frei stehende Vorsatzschalen gültig. Kurzbezeichnungen: Feder-schiene (FS), Holzlattung (HL).

Bei mit Holzlatten befestigten Vorsatzschalen kann die Abweichung (Balken ohne Schraffur) in Abbildung 5 als Validierung von Gleichung (6) verstanden werden. Die mittlere Abweichung von $-0,8$ dB bei einer Standardabweichung von $1,0$ dB (Anzahl $N = 6$) weist auf eine gute Prognoseeignung für Konstruktionen mit $f_0 < 100$ Hz hin.

5. Zusammenfassung

Die Anwendung der Prognose gemäß [1, 3] für gedämmte, frei stehende, einseitige Vorsatzschalen konnte für den Holzmassivbau für Konstruktionen mit $f_0 < 70$ Hz validiert werden. Dabei zeigte sich, dass die Prognose umso weiter auf der sicheren Seite liegt, desto kleiner f_0 ist.

Eine Erweiterung für Konstruktionen mit elastisch gekoppelten, einseitigen Vorsatzschalen über punktförmige Verbindungen oder Federschien ist möglich. Dazu kann die Gesamtsteifigkeit zur Bestimmung von f_0 über die Federsteifigkeiten und Anzahl der Verbindungsmittel berechnet werden. Die Regressionsanalyse weist auch für diese Fälle einen anderen semiempirischen Zusammenhang zu f_0 auf als in [1, 3]. Vor einer Anwendung für die Prognose ist eine Validierung an unabhängigen Daten erforderlich, um eine Eignung nachzuweisen.

Für einseitige Vorsatzschalen, die über Holzlatten befestigt sind, konnte die Eignung der Berechnung nach [5] für starre Linienverbindungen mit den vorliegenden Messdaten mit $f_0 < 100$ Hz validiert werden.

Der Quotient aus der Verbesserung des bewerteten Luftschallverbesserungsmaßes durch eine zweite Vorsatzschale im Vergleich zur Ersten liegt im Bereich von $1,2$ bis $1,5$ und damit teilweise niedriger als $1,5$ aus [1, 3].

6. Danksagung

Wir danken der CSTB, Huber & Sohn, dem ift Rosenheim, KLH, Knauf, Müller BBM, Stora-Enso und der TU Graz für das Bereitstellen der Messdaten.

7. Literatur

- [1] DIN 4109-34:2016-07, Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Vorsatzkonstruktionen vor massiven Bauteilen.
- [2] DIN EN 29052-1:1992-08, Bestimmung der dynamischen Steifigkeit – Materialien die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden.
- [3] DIN EN ISO 12354-1:2017-11, Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Luftschalldämmung zwischen Räumen.
- [4] DIN EN ISO 717-1:2021-05, Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen.
- [5] Heckl, Manfred A. 1959. Untersuchungen über Die Luftschalldämmung von Doppelwänden mit Schallbrücken.
- [6] Huber, Anton. 2018. Ermittlung von Planungsdaten für den Schallschutz von Außenwänden in Holzbauweise mit unterschiedlichen Dämmstofftypen. Bachelorarbeit, HS Rosenheim.
- [7] Mutter, Tobias. 2021. Betrachtung von vereinfachten und frequenzabhängigen Modellen zur Berechnung des Luftschallverbesserungsmaßes von Vorsatzkonstruktionen vor Holzmassivbauelementen. Bachelorarbeit, TH Rosenheim.
- [8] Schödel, Benjamin. 2018. Ermittlung schalltechnischer Beurteilungskriterien für Unterdeckenabhängiger und Trittschalldämmplatten. Bachelorarbeit, TH Rosenheim.
- [9] Sharp, Ben H. 1978. Prediction Methods for the Sound Transmission of Building Elements. *Noise Control Eng J* 11 (2): 53–63.
- [10] Wintergerst, E. 1932. Theorie der Schalldurchlässigkeit von einfachen und zusammengesetzten Wänden. *Die Schalltechnik* 5 (1).

Tiefe Frequenzen – ja, Sie sind wichtig!

Markus Müller-Trapet
National Research Council
Ottawa, Canada



Berndt Zeitler
HFT Stuttgart
Stuttgart, Deutschland



Tiefe Frequenzen – ja, Sie sind wichtig!

1. Einleitung

Obwohl die Bauordnungen in vielen Ländern Anforderungen an den Schallschutz stellen, gibt es weiterhin eine beträchtliche Anzahl an Beschwerden der Bewohner. Ein potentieller Grund dafür ist, dass die bestehenden Verfahren zur Bewertung des Schallschutzes nicht ausreichend mit der durch die Bewohner empfundenen Lästigkeit in Verbindung stehen. Mehrere Ansätze zur Verbesserung der standardisierten Kenngrößen sind in den letzten Jahren gemacht worden [14]. Ein Thema, das bei diesen Untersuchungen immer wieder aufkommt, ist die Berücksichtigung von tiefen Frequenzen.

Was den Luftschall angeht, ist besonders die Popularität von Heimkinosystemen mit Subwoofern ein Grund für einen Anstieg der tieffrequenten Lärmbelästigung. Beim Trittschall leiten viele Quellen tieffrequenten Schall in die Struktur ein. Wahrscheinlich kann sich jeder das dumpfe Klopfen vorstellen, was durch Schritte oder springende Kinder entsteht. Diese Krafteinleitung hängt jedoch von der Interaktion von Trittschallquelle und Struktur ab und ist daher sehr schwierig vorherzusagen. In vielen Studien hat sich jedoch gezeigt, dass gerade dieser (tieffrequente) Trittschall der störendste Faktor in Wohngebäuden ist.

Die meisten Bewertungsverfahren der Schalldämmung berücksichtigen Frequenzen ab 100 Hz aufwärts. Jedoch gerade im Holzbau gibt es signifikante Beiträge der Schallanregung und -übertragung unterhalb von 100 Hz [0].

Die Physik der Schallübertragung macht eine gute Schalldämmung bei tiefen Frequenzen sehr aufwendig und kostspielig, wenn nicht gar unmöglich. Zudem ist eine gute Bestimmung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen sehr schwierig, da in üblicherweise eher kleinen Wohnräumen (weniger als 100 m³) ein weit höherer Aufwand nötig ist, um valide Messdaten zu erheben. Viele der Materialien und Konstruktionen, für die es aus alten Studien Messdaten gibt, haben erst gar keine Information bei tiefen Frequenzen, was eine gute Planung schwierig macht.

Dieser Beitrag beleuchtet das Problem tieffrequenter Schallübertragung im Hinblick auf verschiedene Aspekte: zum einen werden die theoretischen Grundlagen von Luft- und Trittschall im Hinblick auf dieses Problem geschildert (Kapitel 2). Zum anderen wird eine psychoakustische Studie zur empfundenen Lästigkeit von Trittschall vorgestellt und die Ergebnisse werden vor allem im Kontext der Kenngrößen, die für die Bauordnung benötigt werden, analysiert (Kapitel 3). Mögliche Lösungsansätze werden in Kapitel 4 kurz aufgezählt.

2. Grundlagen der Luft- und Trittschalldämmung

Schall breitet sich in Luft und in Körpern als Wellen aus. Die Wellen höherer Frequenz haben eine kürzere Wellenlänge. Ein Teil des Schalls wird bei einer Änderung der Ausbreitungsgeometrie oder des -materials (Impedanzsprung) reflektiert, absorbiert und transmittiert. Der jeweilige Anteil ist frequenzabhängig. Die tieffrequenten Wellen mit ihren langen Wellenlängen „sehen“ kleine und leichte Hindernisse nicht und breiten sich auch ohne viel Dämpfung aus. Die hochfrequenten Wellen mit ihren kurzen Wellenlängen werden stark von Gegenständen beeinflusst. Das heißt, dass Bauelemente für Wellen mit hoher Frequenz größere Hürden darstellen als für Wellen mit tieferer Frequenz. In anderen Worten, ist in den meisten Fällen die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen schlechter als bei hohen Frequenzen. Die Luftschalldämmung beruht hauptsächlich auf der Reflektion des eintreffenden Schalls wegen der Änderung des Material (von Luft zu Festkörper), die dadurch die Transmission reduziert. Die flächenbezogene Masse eines Bauteils spielt dabei eine wesentliche Rolle.

Wie laut es im Empfangsraum ist und empfunden wird, wird natürlich auch vom Frequenzgang der Quelle beeinflusst. Wenn zudem die Schalldämmung bei der Frequenz niedrig ist, bei der die Quelle den höchsten Schalldruck erzeugt, wird das Geräusch am Empfängerort bei der Frequenz noch lauter und störender sein. Einige Frequenzgänge von Verkehrsgereäuschen die vor der Fassade aufgenommen wurden [0], auch Spektren genannt, werden in Abbildung 1 dargestellt.

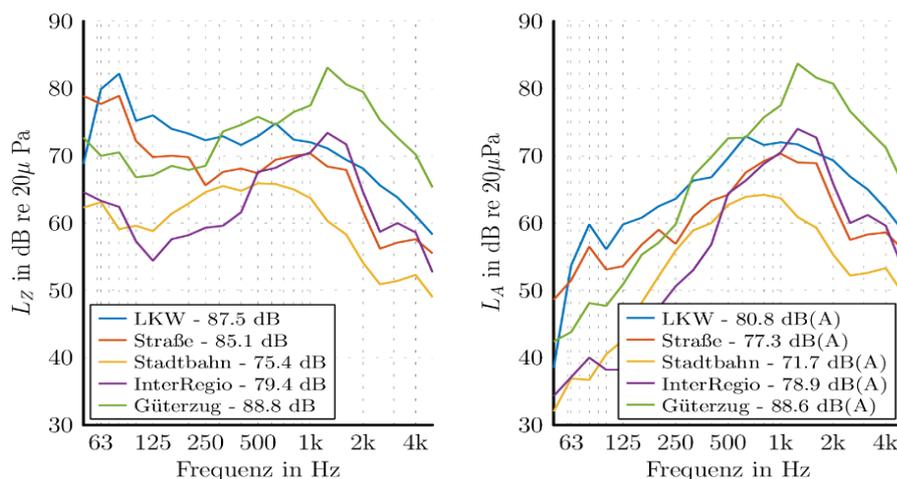


Abbildung 1: Außenschallpegel von unterschiedlichen Verkehrsmitteln. Links Z-Bewertet und rechts A-Bewertet

Vorgestellt werden hier nicht die absoluten Pegel, sondern die Form der Spektren. Im linken Diagramm zeigt sich, dass der Verkehrslärm mit linearer Z-Frequenzbewertung einen starken tieffrequenten Anteil besitzt, vor allem die LKWs und Autos. Nach der A-Bewertung, welche das Lautstärke-Empfinden bei mittleren Pegeln gut abbildet, sinkt die Relevanz der tiefen Frequenzen im Außenbereich und die Reihenfolge der lautesten Quellen bezogen auf den Summenschallpegel ändert sich. Nach der A-Bewertung ist der InterRegio lauter als die Straße. Es bleibt jedoch abzuwarten, ob die tiefen Frequenzen nach der Schallübertragung in den Innenraum nicht doch wieder eine wichtige Rolle spielen. Dazu wird hier auf das Luftschalldämm-Maß R kurz eingegangen.

2.1. Luftschalldämmung

Das Schalldämm-Maß beschreibt den zehnfachen Logarithmus von eintreffender zu durchgelassener Schalleistung ($R = 10 \log (W_e/W_d)$). Wenn der einfache Fall einer biegeweichen Masse betrachtet wird, kann das Bergersche Massengesetz angesetzt werden. Dieses besagt, dass die Schalldämmung pro flächenbezogener Massenverdopplung um 6 dB erhöht wird (siehe Abbildung 2). Genauso steigt das Schalldämm-Maß bei einer Frequenzverdopplung um 6 dB. Letzteres veranschaulicht nochmal warum die tiefen Frequenzen schlechter gedämmt werden als die hohen. Wenn also das Schalldämm-Maß erhöht werden soll, kann die flächenbezogene Masse erhöht werden. Dies macht aber nur zu einem gewissen Maß Sinn; denn soll die Schalldämmung eine Halbierung der empfundenen Lautstärke hervorrufen, muss das Schalldämm-Maß um etwa 10 dB erhöht werden, also zwei Mal die flächenbezogene Masse verdoppelt werden (6 dB + 6 dB). In anderen Worten muss die Dicke des Bauteils auf das Vierfache gesteigert werden, von z.B. einer 20 cm dicken Wand zu einer unrealistischen Wanddicke von 80 cm.

Dass 10 dB eine Verdopplung oder Halbierung der empfundenen Lautstärke hervorrufen gilt für Töne. Die empfundene Lästigkeit ist nicht ganz so einfach zu definieren, vor allem bei komplexeren Geräuschen. Ergebnisse zum Empfinden komplexerer Geräusche werden später durch subjektive Untersuchungen vorgestellt, jedoch wird bis dahin davon ausgegangen, dass A-bewertete Pegel das Empfinden gut repräsentieren.

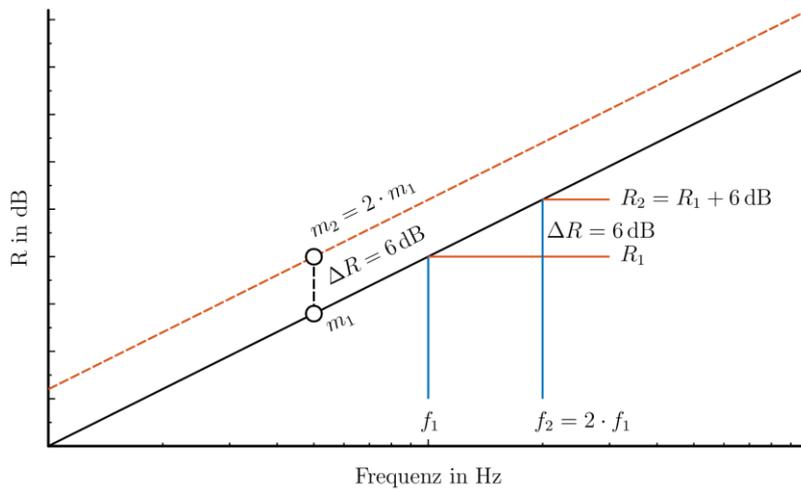


Abbildung 2: Schalldämm-Maß R: Bergersches Masse Gesetz mit 6 dB Erhöhung pro Massen und Frequenz Verdoppelung

Eine elegantere Methode die Schalldämmung zu verbessern ist durch die Entkopplung der Übertragung durch z.B. Zweischaligkeit oder Vorsatzschale. Einfach gesehen kann das Grundbauteil als Masse gesehen werden, die Luft oder das Material im Hohlraum zwischen den Schalen als Feder, und die äußere Schale (z.B. Gipskarton oder Mörtel) als weitere Masse, zusammen also ein Masse-Feder-Masse System. Tieffrequent schwingen beide Bauteile gleich, jedoch wirkt sich die zugefügte Masse (m_2'') vorteilhaft auf das Schalldämm-Maß aus, laut Bergerschem Massegesetz $\Delta R = 20 \log((m_1'' + m_2'')/m_1'')$. Hochfrequent sind die Massen bzw. Elemente voneinander entkoppelt, so dass wenig Schall übertragen wird – die Verbesserung der Schalldämmung steigt mit der Frequenz (siehe Abbildung 3). Bei einer Frequenz jedoch, der Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenz (f_R), schwingen beide Massen stärker als eine alleine und es kommt zu einer Verschlechterung der Schalldämmung. Hochfrequent sieht man in der Realität, z.B. wegen Körperschallbrücken, eine Stagnation der Verbesserung und sie übersteigt einen bestimmten Wert trotz steigender Frequenz nicht mehr.

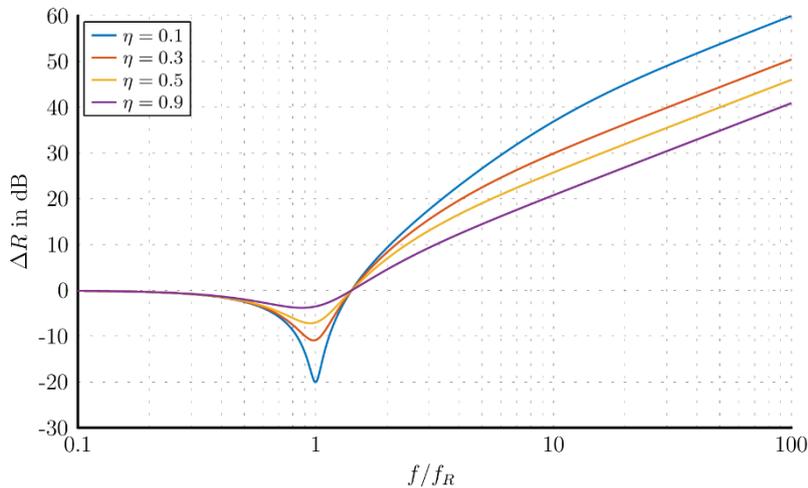


Abbildung 3: Verbesserung des Schalldämm-Maßes ΔR durch Entkopplung mit einer Vorsatzschale und einem Verlustfaktor von 10% bis 90%. Der Zugewinn an Masse wird hier noch nicht berücksichtigt.

Je nachdem wie hoch die Verluste sind, wird der Einbruch tiefer oder geringer ausfallen. Hohe Verluste sind für den Einbruch bei der Resonanzfrequenz hilfreich, reduzieren jedoch die Verbesserung zu den hohen Frequenzen hin. Da hochfrequent die Schalldämmung schon sehr gut ist, kann meistens dieser Nachteil in Kauf genommen werden. Die Resonanzfrequenz sollte jedoch tief abgestimmt werden, sodass es über einen großen Frequenzbereich zu einer Verbesserung der Schalldämmung kommt. Die Resonanzfrequenz lässt sich folgendermaßen bestimmen:

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s'' \left(\frac{1}{m''_1} + \frac{1}{m''_2} \right)},$$

wobei s'' die flächenbezogene Steifigkeit der Zwischenschicht (abhängig von Dicke und Material), und m''_1 und m''_2 die flächenbezogenen Massen der inneren und äußeren Elemente sind.

Mit dem Verständnis zum Schalldämmmaß kann jetzt der Innenraumpegel aus den Außenraumpegeln bestimmt werden (siehe Abbildung 4). Hierzu wird als Beispiel die Schalldämmung einer fünfplagigen Brettsperrholz (CLT - Cross Laminated Timber) Wand mit zwei Lagen Gipskarton ($90\text{kg/m}^2 + 2 \times 10\text{kg/m}^2$) ohne und mit der theoretischen Vorsatzschale (20kg/m^2) mit einer Resonanzfrequenz bei 63 Hz und Verlustfaktor von 30% verwendet.

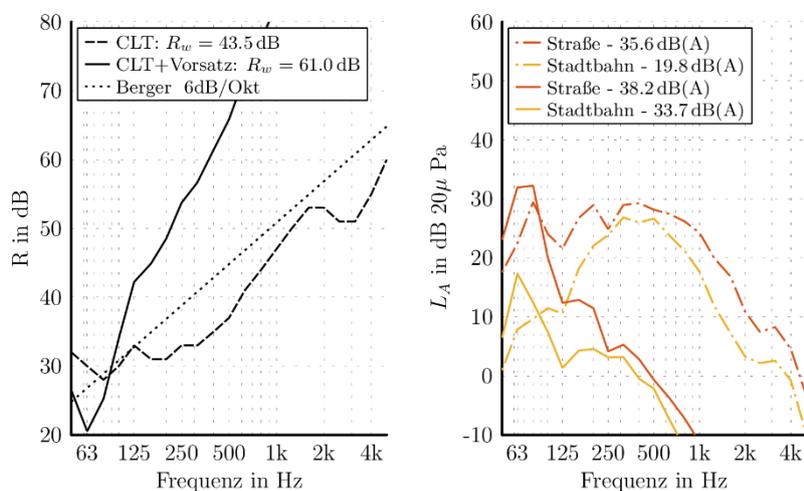


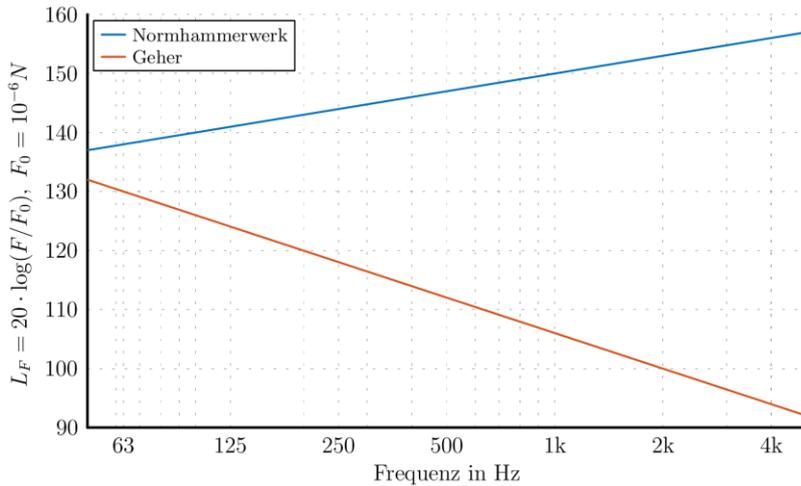
Abbildung 4: Links: Schalldämm-Maß einer Massivholzwand ohne ('-') und mit ('-') theoretischer Vorsatzschale und nach Berger gerechnet ('·'). Rechts: A-gewichteter Innenraumpegel des Verkehrslärms (Straße und Stadtbahn) nach Transmission durch Wand ohne und mit Vorsatzschale.

Der Innenraumpegel wurde mit der Annahme eines diffusen Innenraums mit einer äquivalenten Absorptionsfläche A von 10 m^2 berechnet ($L_{\text{in}} = L_{\text{auß}} - R + 10\log(S/A)$, wobei $S=12.5\text{ m}^2$ die Fläche der Wand ist). Hier geht es wiederum nicht um die absoluten Pegel, sondern um die Form der Spektren. Im linken Diagramm sieht man, dass durch die Vorsatzschale das Schalldämm-Maß tieffrequent verschlechtert wurde, hochfrequent jedoch wie erwartet stark steigt. Im rechten Diagramm sieht man, dass die tiefen Frequenzen obwohl schon A-gewichtet wieder an Wichtigkeit gewinnen, weil die Schalldämmung tieffrequent niedrig ist, sogar noch mehr mit der zusätzlichen Vorsatzschale ('-'). Im Innenraum werden also maßgeblich die tiefen Frequenzen gehört.

2.2. Trittschall

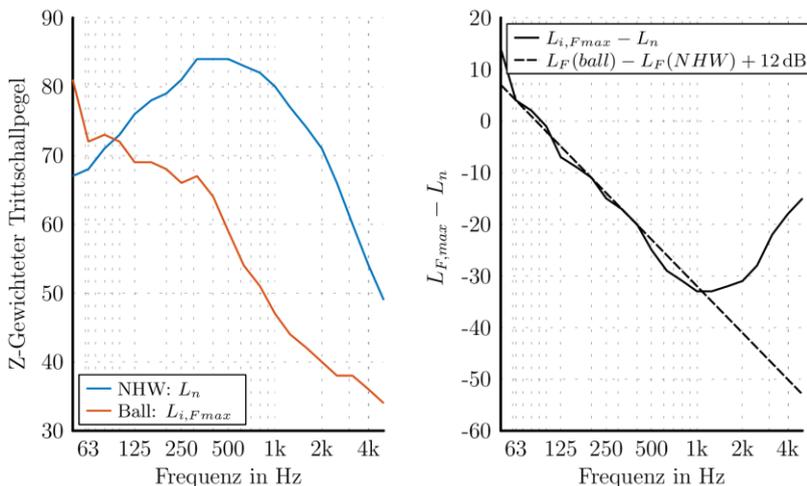
Um die Qualität des Trittschallschutzes zu beurteilen wird nicht wie beim Schalldämm-Maß eine Leistungsbilanz herangezogen, sondern der Schalldruckpegel im Empfangsraum wird evaluiert. Dennoch treten hier ähnliche Phänomene auf.

Fangen wir wieder bei den Quellen an. Zur Beurteilung des Trittschallschutzes wird üblicherweise mit einem Normhammerwerk (NHW) die Decke angeregt. Dabei fallen fünf 500g schwere Hämmer von 40 mm mit einer Gesamtfrequenz von 10 Hz auf die zu untersuchende Decke. Der Schallpegel im Empfangsraum wird dabei aufgenommen. Das in Terzen theoretisch erwartete Kraftspektrum ($L_F = 150 + 10 \cdot \log(f/1000\text{Hz})$) kann laut [0] in Abbildung 5 gesehen werden.

Abbildung 5: Vereinfachte blockierte Kraft des Normhammerwerks (~ 3 dB/Okt) und eines Geher (~ -6 dB/Okt)

Bei einem idealen Dirac Stoß wären alle Frequenzen gleichermaßen stark angeregt, was bei der Darstellung in Terzen zu einer Steigung der Kurve von 3 dB/Okt führt. Dabei ist zu sehen, dass die tiefen Frequenzen keine besondere Rolle spielen, eher umgekehrt. Wenn aber nicht als Quelle das NHW sondern ein Geher verwendet wird wie bei $[0, 0]$ gemessen, wurde hier als Vereinfachung ein Gerade mit einem Abfall von 6 dB/Okt angesetzt. Wegen der Quelle werden nun die tiefen Frequenzen wieder wichtiger. Eine normative Quelle, der schwere und weiche Gummiball beschrieben in $[0]$, wurde extra von $[0]$ entwickelt um einen ähnlichen Kraft- und Impedanzverlauf wie der Geher $[0,0]$ zu haben.

Wie viel sich das Spektrum nach der Trittschallübertragung verändert zeigt die blaue Kurve in der Linken Abbildung 6, in der der Norm-Trittschallpegel ($L_n = L + 10 \log(A/A_0)$), mit L als Pegel im Empfangsraum, A die äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum und $A_0 = 10 \text{ m}^2$, des gleichen CLT Bauteils dargestellt wird. Da es sich um eine transiente Anregung handelt, wird mit dem Ball nicht der L_n gemessen, sondern der zeitlich Fast bewertete Maximalpegel ($L_{i,Fmax}$).

Abbildung 6: Links: Auf CLT Decke L_n mit dem NHW und $L_{i,Fmax}$ mit dem Ball gemessen. Rechts: Vergleich der Differenzen der Schallpegel im Empfangsraum ($L_{i,Fmax} - L_n$) und der Blockierten Kräfte (Ball-NHW).

Durch Anregung mit dem NHW sind die tiefen Frequenzen weiterhin nicht sehr relevant, jedoch aber durch Anregung mit dem Gummiball. Der Normtrittschallpegel L_n steigt sogar im mittleren Frequenzbereich wegen der hohen Abstrahlung um die Koinzidenzfrequenz. Der $L_{i,Fmax}$ fällt stetig mit steigender Frequenz. Obwohl diese beiden Trittschall-Größen nicht ganz vergleichbar sind, wurde die Differenz in der Rechten Figur gebildet (durchgezogene Linie). Die Differenz ist mit der Differenz der Kräfte von Geher und NHM um 12 dB nach oben verschoben (gestrichelte Linie) sehr ähnlich. Beide haben erfreulicher Weise, außer

sehr tief und sehr hochfrequent die gleiche Steigung von -9 dB/Okt. Um das Empfinden etwas abschätzen zu können werden die Trittschallpegel wieder mit einer A-Bewertung in Abbildung 7 (gestrichelte Linien) dargestellt.

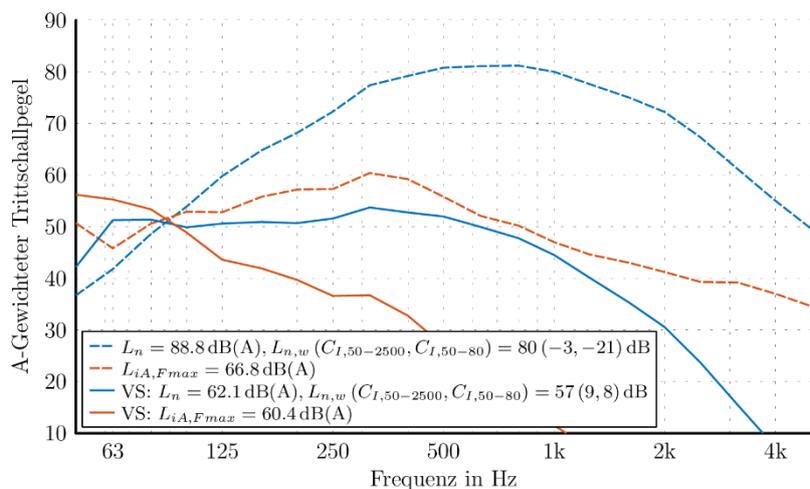


Abbildung 7: A-Bewerteter Trittschallpegel (L_n -Blau, $L_{iA,Fmax}$ -Rot) auf CLT Decke ohne (gestrichelt) und mit (durchgezogen) abgehängter Decke.

Die tiefen Frequenzen haben nun bei beiden Arten von Trittschallpegeln an Bedeutung verloren. Jedoch muss dazu gesagt werden, dass die Decke ohne eine Art Vorsatzschale mit einem Norm-Trittschallpegel von $L_{n,w}=80$ dB nicht einsetzbar ist. Sobald eine vernünftige Vorsatzschale – in diesem Beispiel eine theoretische abgehängte Decke mit der gleichen Verbesserung wie die Vorsatzschale der CLT Wand – angebracht wird, werden die tiefen Frequenzen wieder bedeutsamer (durchgezogene Linien).

Es können durch diese messtechnische und theoretische Untersuchung mit Verwendung der A-Bewerteten Innenraumpegel und Trittschallpegel nur richtungsweisende Annahmen über das Empfinden gemacht werden: Tiefe Frequenzen sind wichtig. Genauer auf das Empfinden kann durch eine subjektive Studie eingegangen werden indem hoffentlich auch die gleiche Antwort gefunden werden kann.

3. Psychoakustische Untersuchung zum Trittschall

Üblicherweise basieren die Anforderungen in der Bauordnung auf den Einzahlkennwerten, die aus standardisierten Labor- oder Feldmessungen gewonnen werden. Da jedoch zuletzt die Bewohner der Gebäude der ausschlaggebende Faktor für die Lärmbelastung sind, muss die von den Bewohnern empfundene, also subjektive Lästigkeit mit den objektiven Einzahlkennwerten in Verbindung gesetzt werden.

Dies wird mit speziell ausgelegten psychoakustischen Hörversuchen realisiert, bei denen Probanden unter meist kontrollierten Bedingungen verschiedene Hörbeispiele im Hinblick auf die Lästigkeit bewerten. Die subjektiven Bewertungen werden dann mit den objektiven Messdaten aus dem Labor verglichen. Solche psychoakustischen Studien sind insbesondere dann wichtig, wenn es um die Einführung neuer Bewertungskenngrößen, z.B. speziell für tiefe Frequenzen, geht, für die (noch) keine standardisierten Kenngrößen existieren.

Eine solche psychoakustische Studie für den Trittschallschutz von Holzdeckenaufbauten wird im Weiteren beschrieben.

3.1. Vermessene Deckenaufbauten

Die in dieser Studie vermessenen Aufbauten basierten auf einem 175mm tiefen, 5-lagigen Cross-Laminated Timber (CLT) Massivholz-Element und einer Holzbalkendecke aus 16 mm dicken OSB-Platten auf 240 mm tiefen Doppelstegträgern. Für beide Arten von Aufbauten wurden Variationen mit verschiedenen Auflagen getestet, die in Tabelle 1 beschrieben sind. Als sichtbarer Abschluss der Decke wurden eine oder mehrere Lagen 16 mm Rigipsplatten verwendet, die für die Trägerdecke mit Federschielen angebracht wurden. Auf dem CLT Element wurden die Rigipsplatten direkt angebracht.

Tabelle 1: Untersuchte Holzdeckenaufbauten

	Grundelement	
	175mm CLT	240mm Doppelstegträger
	ohne	ohne
Auflagen	Klicklaminat auf 2 mm Gummimatte	25mm Zementestrich
	38 mm Beton auf 2 mm Gummimatte	25mm Zementestrich auf 3 mm Filzmatte
	38 mm Beton auf 8 mm Schaumstoff	25mm Zementestrich auf 6 mm Akustikmatte
	Klicklaminat auf 2 mm Gummimatte + 38 mm Beton auf 8 mm Schaumstoff	25mm Zementestrich auf 25 mm Gummimatte
	100 mm Beton auf 23 mm Gummimatte	

Da die Messdaten aus zwei getrennten Testserien erhoben wurden, gab es keine Überschneidungen zwischen den Auflagen für die beiden Grundelemente.

3.2. Messaufbau

In dieser Studie wurden im Deckenprüfstand am National Research Council (NRC) in Ottawa sowohl standardisierte Messungen durchgeführt, als auch in einem modifizierten Empfangsraum Aufnahmen für eine subjektive Studie gemacht. Der Deckenprüfstand am NRC besteht aus zwei entkoppelten, vertikal angeordneten Hallräumen mit einem Raumvolumen von etwa jeweils 175 m³ (Abbildung 8, links). In jedem der Hallräume wird der Schalldruck an acht verschiedenen Positionen mit Mikrofonen gemessen. Dieser Deckenprüfstand wird für alle standardisierten Messungen von Luft- und Trittschall nach ISO und ASTM Normen benutzt. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden für Luftschall mit vier Lautsprechern in jedem Hallraum gemessen. Der Trittschall wurde sowohl mit dem Normhammerwerk als auch mit dem in ISO 10140-3 beschriebenen Gummiball gemessen. Alle Messdaten wurden in den Terzbändern mit Mittenfrequenz von 25 Hz bis 10 kHz ausgewertet.

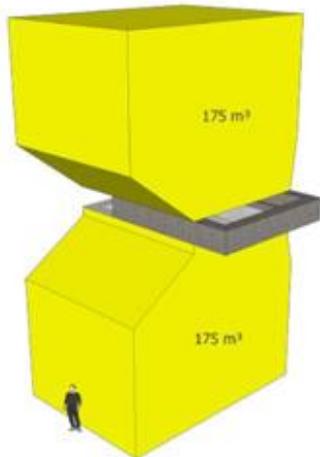


Abbildung 8: Deckenprüfstand am NRC: Anordnung der Hallräume (links) und Aufbau zur Aufnahme für die subjektive Studie im unteren Hallraum (rechts)

Im normalen Zustand hat der untere Hallraum des Deckenprüfstands eine Nachhallzeit zwischen 2 und 4 Sekunden. Für den subjektiven Hörversuch musste diese Nachhallzeit auf etwa 0.5 Sekunden reduziert werden, um die Halligkeit in den Aufnahmen einer realistischen Wohnzimmersituation anzugleichen. Dazu wurden im unteren Empfangsraum große Schaumstoffplatten verlegt. Abbildung 9 zeigt die gemessenen Nachhallzeiten.

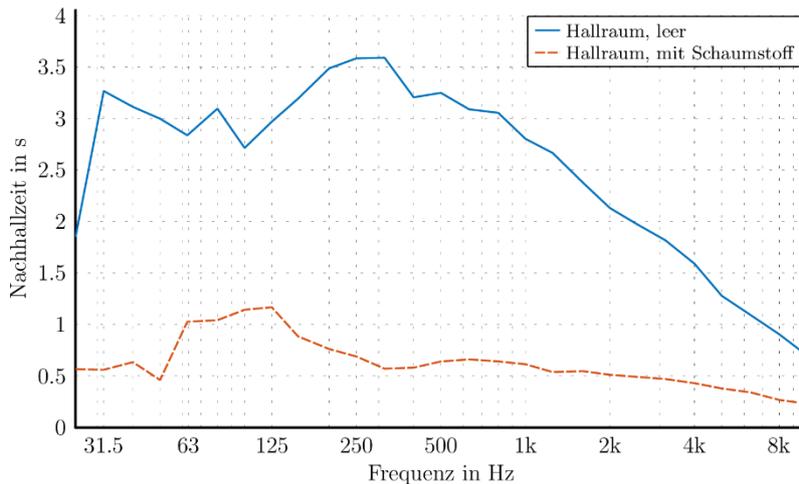


Abbildung 9: Nachhallzeit im Hallraum, im leeren Zustand und mit reduzierter Nachhallzeit.

Im unteren Hallraum erlaubt ein akustisch transparentes Zwischengitter den Aufbau von Aufnahmeegeräten nah unterhalb des im Prüfstand befindlichen Prüfobjekts. Auf dieser Zwischentage wurden sowohl ein Kunstkopf (B&K HATS Type 4128-C) als auch ein vierkanaliges Sennheiser AMBEO VR Ambisonics-Mikrofon platziert (Abbildung 8, rechts). Mit diesen beiden Empfängern wurden alle Aufnahmen des Trittschalls für die Hörversuche durchgeführt.

Insgesamt wurden fünf verschiedene Szenarien mit Trittschallquellen auf jedem Deckenaufbau aufgenommen:

- Standard-Gummiball aus 10 cm und 100 cm Höhe
- Gehen mit Schuhen und auf Socken
- Einzelschläge des Normhammerwerks

Die Geher bewegten sich bei den Aufnahmen in Form einer Acht, zentriert im Mittelpunkt des Deckenaufbaus.

3.3. Hörversuch

Der Hörversuch fand im reflexionsarmen Raum am NRC statt. Die aufgenommenen Trittschallgeräusche wurden für den Hörversuch über einen Ambisonics-Lautsprecheraufbau mit acht Monitorlautsprechern und 3 Subwoofern wiedergegeben. Der Aufbau war bis zu einer unteren Frequenz von 20 Hz entzerrt. Ein Foto des Aufbaus ist in Abbildung 10 zu sehen. Um die Probanden nicht durch den Anblick der Lautsprecher abzulenken, wurden diese hinter Vorhängen versteckt.

Der Hörversuch wurde von 26 Probanden im Alter zwischen 19 und 60 Jahren (Mittelwert 38 Jahre, Standardabweichung 10 Jahre) durchgeführt. Jeder Proband wurde einem audiometrischen Test unterzogen, um das Hörvermögen der Probanden zu dokumentieren. Keiner der Probanden hatte merkliche Hörverluste.

Der eigentliche Hörversuch dauerte im Durchschnitt etwa 20 Minuten pro Proband. Die aufgenommenen Geräusche für 12 verschiedene Deckenaufbauten wurden in zufälliger Reihenfolge präsentiert, wobei die Geräusche in fünf Abschnitten (einem pro Quellentyp) sortiert waren. Für jedes Geräusch sollte die empfundene Lästigkeit auf einer Skala von 0 bis 100 angegeben werden.



Abbildung 10: Lautsprecheraufbau für den Hörversuch

3.4. Ergebnisse der Standardmessungen

Die standardisierten Einzahlwerte, die in dieser Studie betrachtet wurden, sind in Tabelle 2 aufgezählt. Zusätzlich zu den standardisierten Einzahlwerten wurden auch einige andere Bewertungsmethoden untersucht, vor allem da die meisten Standards keine Daten unterhalb von 100 Hz bewerten.

Tabelle 2: Einzahlwerte zur Bewertung von Trittschall

Einzahlwert	Benötigte Messdaten	Messobjekt	Frequenzbereich	Standard
L_{n,w,C_I}	L_n	Hammerwerk	100 Hz - 3150 Hz	ISO 717-2
$C_{I,50-2500}$	L_n	Hammerwerk	50 Hz - 2500 Hz	ISO 717-2
$C_{I,50-80}$	L_n	Hammerwerk	50 Hz - 80 Hz	-
$C_{I,AL}$	L_n	Hammerwerk	20 Hz - 2500 Hz	-
IIC	L_n	Hammerwerk	100 Hz - 3150 Hz	ASTM E989
HIIC	L_n	Hammerwerk	400 Hz - 3150 Hz	ASTM E3222
LIIC	L_n	Hammerwerk	50 Hz - 80 Hz	ASTM E3207
$L_{i,A,L}$	L_n	Hammerwerk	50 Hz - 3150 Hz	JIS 1419-2
$L_{i,F,max,H}$	$L_{i,F,max}$	Gummiball	50 Hz - 630 Hz	JIS 1419-2
$L_{i,C,F,max,H}$	$L_{i,F,max}$	Gummiball	50 Hz - 630 Hz	

Ein Problem bei der Untersuchung von tieffrequentem (Tritt-) Schall ist die Tatsache, dass die Messunsicherheit zu tiefen Frequenzen hin steigt. Dies gilt insbesondere bei kleinen Räumen, wie sie bei Messungen im Feld zu finden sind, da in kleinen Räumen die Modendichte bei Frequenzen unterhalb von 100 Hz deutlich niedriger ist. Ein Beispiel ist in Abbildung 11 gezeigt, in der die erweiterte Messunsicherheit (95% Konfidenzintervall) für Empfangspegel dargestellt ist. Die Daten zeigen die Ergebnisse im Hallraum des NRC (etwa 175 m³ Volumen) für Messungen von Trittschall mit dem Normhammerwerk und dem Gummiball, und für Luftschall bei Messungen des Schalldämmmaßes, sowie die Vorhersage mit der Theorie nach Davy [0].

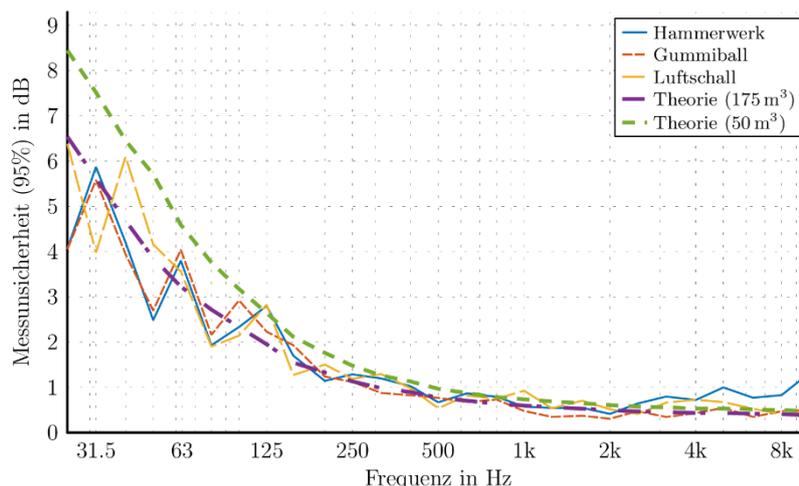


Abbildung 11: Erweiterte Messunsicherheit (95% Konfidenzintervall) bei Empfangspegeln für Trittschall und Luftschall, sowie theoretische Vorhersage für große und kleine Räume

Es zeigt sich, dass die theoretische Vorhersage sehr gut mit den tatsächlichen Ergebnissen übereinstimmt. Die theoretische Vorhersage für einen kleinen Raum mit 50 m^3 Volumen zeigt eine Messunsicherheit, die bei tiefen Frequenzen etwa 1 bis 2 dB höher liegt als bei großen Räumen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass gerade Einzelkennwerte, die sehr tiefe Frequenzen berücksichtigen, mit großer Unsicherheit behaftet sind, und daher eventuell nur bedingt praktisch von Nutzen sind. Zum Beispiel wäre in kleinen Räumen der bewertete Trittschallpegel mit dem spektralen Anpassungswert ($L_{n,w} + C_1$ oder $C_{150-2500}$) mit einer Unsicherheit von etwa 0.5 dB messbar; mit dem Akulite Anpassungswert, der Daten bis 25 Hz bewertet, läge die Unsicherheit bei 2 dB. Der im kürzlich geschaffenen ASTM Standard E3207 [0] definierte tieffrequente Term LIIC («low-frequency impact insulation class») führt in kleinen Räumen sogar zu einer Messunsicherheit von 5.5 dB.

3.5. Ergebnisse des Hörversuchs

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Messdaten können nun mit den Lästigkeitsbewertungen der Probanden aus dem Hörversuch verglichen werden. Bei der Auswertung dieser Daten werden üblicherweise die Ergebnisse für eine bestimmte Kenngröße gegenüber den über die Probanden gemittelten Lästigkeitsbewertungen aufgetragen. Mittels einer Regressionsanalyse kann dann bestimmt werden, wie gut diese Kenngröße die empfundene Lästigkeit vorhersagen kann. Dies ist im Endeffekt das Ziel der Kenngrößen, gerade im Hinblick auf die Vorschriften in der Bauordnung.

Da in dieser Studie fünf verschiedene Trittschallquellen benutzt wurden, gibt es dementsprechend für jede der Quellen einen Satz an Ergebnissen. Beispielhaft ist in Abbildung 12 die Lästigkeit gegenüber der Kenngröße $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ für die Ergebnisse mit dem Gummiball aus 10 cm Höhe dargestellt. Die Regression wurde mit einer S-förmigen Funktion durchgeführt, die zusätzlich in der Abbildung gezeigt ist. Für die Regressionsanalysen wurde die S-Kurve auf den Wertebereich der Lästigkeit von 0 bis 100 beschränkt, so dass die einzigen freien Parameter der Zentralwert x_0 (bei dem eine Lästigkeit von 50 erreicht wird) und die Steigung k (um x_0) bleiben.

Es zeigt sich, dass in diesem Beispiel die standardisierte Kenngröße eine hohe Korrelation zu der empfundenen Lästigkeit aufweist. Dies ist auch an dem hohen Bestimmtheitsmaß von 0.94 zu erkennen.

Die Analyse, wie sie in Abbildung 12 zu sehen ist, muss nun für jede Trittschallquelle und jede Kenngröße, die untersucht werden soll, durchgeführt werden. Für eine kompakte Analyse der Daten, wird im Weiteren alleine das Bestimmtheitsmaß aus der Regressionsanalyse gezeigt.

12 Tiefe Frequenzen – ja, Sie sind wichtig! | M. Müller-Trapet, B. Zeitler

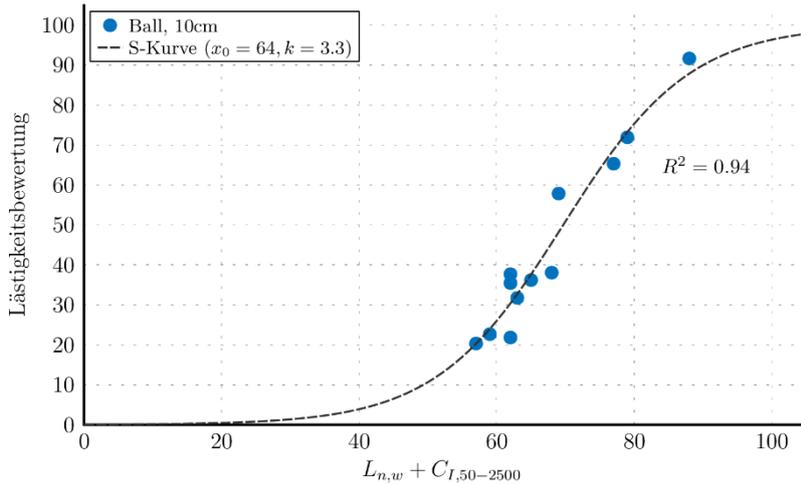


Abbildung 12: Empfundene Lästigkeit als Funktion der Kenngröße $L_{n,w} + C_{I,50-2500}$. Die S-förmige Regressionskurve ist ebenfalls dargestellt.

In ist das Bestimmtheitsmaß aus der Regressionsanalyse für die fünf untersuchten Trittschallquellen gezeigt. Die verschiedenen Balken zeigen hierbei die Ergebnisse für vier verschiedene Kenngrößen: der bewertete normalisierte Trittschallpegel für das Normhammerwerk $L_{n,w}$, ohne und mit spektralen Adaptionswerten $C_{I,50-2500}$ und $C_{I,50-80}$, und der maximale A-bewertete Schalldruckpegel für die Messung mit dem Gummiball, $L_{iA,Fmax}$ (siehe Tabelle 2). Hierbei muss betont werden, dass die Kenngröße $L_{n,w} + C_{I,50-80}$ als einzige in dieser Aufzählung nicht standardisiert ist.

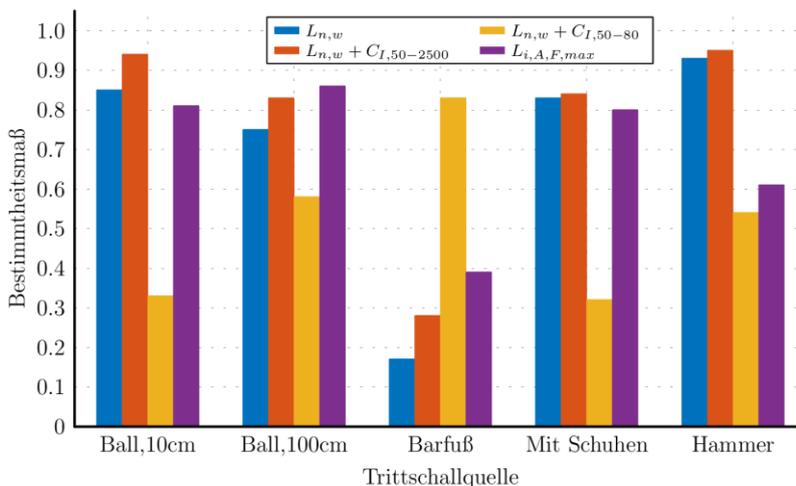


Abbildung 13: Bestimmtheitsmaß für die fünf untersuchten Trittschallquellen und für vier verschiedene standardisierte Kenngrößen

Man kann erkennen, dass die standardisierten Kenngrößen allgemein eine sehr gute Vorhersage der Lästigkeit bieten, da die Bestimmtheitsmaße fast alle bei über 0.8 liegen. Für die meisten Trittschallquellen ist die Kenngröße $L_{n,w} + C_{I,50-2500}$ am besten zur Vorhersage der empfundenen Lästigkeit geeignet, insbesondere für Hammerschläge mit dem Normhammerwerk und Ballwürfe aus einer Höhe von 10 cm. Für Ballwürfe aus 100 cm Höhe ist der Wert $L_{iA,Fmax}$ etwas besser geeignet. Die Ergebnisse für Gehen mit Schuhen sind für die drei standardisierten Größen statistisch nicht voneinander zu unterscheiden.

Die Ergebnisse für das Barfußgehen zeigen, dass keine der standardisierten Kenngrößen eine gute Vorhersage der empfundenen Lästigkeit bietet. Die Bestimmtheitsmaße sind alle kleiner als 0.4. Lediglich die Kenngröße mit dem spektralen Adaptionswert, der nur den Schalldruckpegel im Oktavband von 63 Hz beinhaltet, $L_{n,w} + C_{I,50-80}$, weist ein hohes Bestimmtheitsmaß von über 0.8 auf. Dies bedeutet, dass das dumpfe Dröhnen von Barfußgang, meist dominiert vom Auftreten mit der Ferse, nicht mit standardisierten Kenngrößen erfasst wird.

Zusätzlich zu den Kenngrößen in Abbildung 13 wurden die weiteren Kenngrößen aus Tabelle 2 untersucht. Die Ergebnisse für den IIC verhalten sich ähnlich wie die für $L_{n,w}$, wobei das Bestimmtheitsmaß für den IIC immer leicht niedriger ist. Das liegt an der 8-dB-Regel, die beim IIC nach wie vor berücksichtigt wird. Der hochfrequente IIC, HIIC, liefert sehr ähnliche Ergebnisse wie für den IIC. Der tieffrequente IIC, LIIC, führt zu exakt den gleichen Bestimmtheitsmaßen wie der $L_{n,w}+C_{I,50-80}$. Die ist nicht überraschend, da beide Werte direkt miteinander in Verbindung stehen: $LIIC = 160 - (L_{n,w}+C_{I,50-80})$.

Der spektrale Adaptionwert aus dem Akulite-Projekt [0] führte generell nicht zu einem höheren Bestimmtheitsmaß als andere Adaptionswerte, außer beim Gehen mit Schuhen, für das das Bestimmtheitsmaß um etwa 0.05 höher ausfällt. Als Beispiel für eine einfachere Bewertungsmethode hat sich der $L_{iA,L}$ -Wert, also der A-bewertete Summenpegel mit dem Normhammerwerk, als mindestens so gut wie der $L_{n,w}$ erwiesen.

Für die Kenngrößen aus den Messungen mit dem Gummiball bietet der C-bewertete Maximalpegel, $L_{iC,Fmax,H}$, eine ähnlich gute Vorhersage der Lästigkeit für Barfußgehen wie der tieffrequente Adaptionsterm für $L_{n,w}$.

Die gute Korrelation der $L_{n,w}$ -Kenngröße mit dem tieffrequenten Adaptionwert ist nicht überraschend, wenn man die effektiven Schalldruckpegel an der Hörposition für die verschiedenen Trittschallquellen als Funktion der Frequenz betrachtet. Diese Information ist in Abbildung 14 als Mittelwert über die Aufbauten zu sehen.

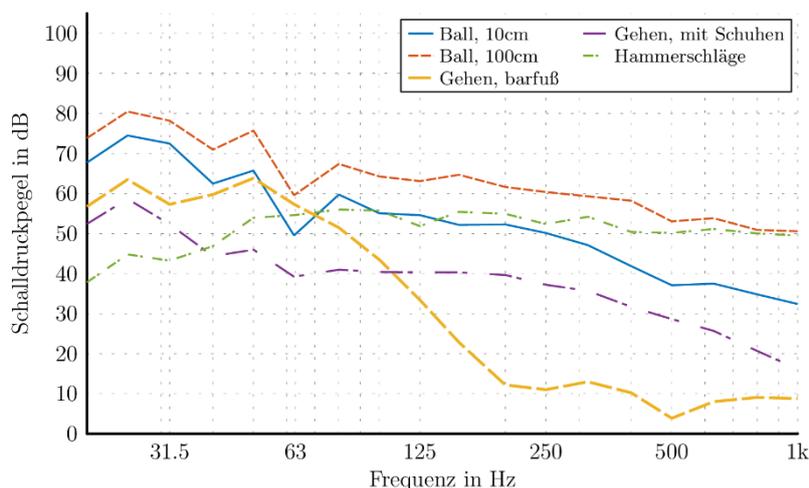


Abbildung 14: Schalldruckpegel an der Hörposition gemittelt über alle Aufbauten für die fünf untersuchten Trittschallquellen

Es zeigt sich, dass die Barfußgehgeräusche nur Pegel unterhalb von 200 Hz erzeugen, und sich der Großteil der Energie im Bereich unterhalb von 80 Hz befindet. Selbst die Pegel mit dem Gummiball, bei dem die Kraftanregung weitestgehend im tieffrequenten Bereich stattfindet, tragen noch so viel im Bereich über 100 Hz bei, dass der Einzahlkennwert mit A-Bewertung nicht gut mit der empfundenen Lästigkeit für Barfußgehen korreliert. Wie jedoch zuvor erwähnt, kann dies durch die C-Bewertung statt der A-Bewertung verbessert werden.

4. Maßnahmen und Empfehlungen

Wie schon in den Grundlagen erläutert benötigt es zur Erhöhung der Luft- und Trittschalldämmung eine ausreichende (flächenbezogene) Masse und eine möglichst tief abgestimmte Entkopplung durch Vorsatzschalen. Wie anhand der A-Bewerteten Innenraumpegel zu sehen war, ist mit dem gleichen Aufbau die Luftschalldämmung oft unkritischer als die Trittschalldämmung. Das heißt, dass wenn ausreichende Maßnahmen für den Trittschall erfüllt worden sind, der Luftschallschutz gewährleistet sein sollte.

Um im Holzbau eine ausreichend hohe flächenbezogene Masse zu erzielen, werden Schütungen verwendet [0]. Bei der Entkopplung ist darauf zu achten, dass sie wirklich genügend tief abgestimmt werden [0] ansonsten können sie mehr (akustischen) Schaden

anrichten als sie Vorteile bringen. Genauso ist darauf zu achten, dass wenn auf dem Übertragungsweg mehrere Vorsatzschalen verwendet werden, sie wenn möglich unterschiedliche Resonanzfrequenzen oder hohe Dämpfungen besitzen, sodass der Einbruch nicht noch stärker ausgeprägt wird. In einigen Fällen lassen sich auch abgestimmte Tilger [0] oder Helmholzabsorber [0,0] zur Schwingungsminimierung ansetzen.

Die Ergebnisse der objektiven und subjektiven Untersuchungen zeigen, dass die Qualität der Luft- und Trittschalldämmung von den Quellen abhängig ist. Für die meisten Trittschallquellen wird als objektive Größe $L_{n,w}+C_{I,50-2500}$ zur Charakterisierung der Decken empfohlen.

5. Literatur

- [1] Ljunggren, F.; Simmons, C.; Hagberg, K.; "Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound", *Applied Acoustics*, Vol. 85, p. 57 - 68, 2014
- [2] ISO 717-2: Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 2: Impact sound insulation
- [3] ASTM E989-18: Standard Classification for Determination of Single-Number Metrics for Impact Noise
- [4] ASTM E3222-20: Standard Classification for Determination of High-frequency Impact Sound Ratings
- [5] ASTM E3207-21: Standard Classification for Determination of Low-Frequency Impact Noise Ratings
- [6] JIS A 1419-2: Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Floor impact sound insulation
- [7] Davy, J. L., "The ensemble variance of random noise in a reverberation room", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 107, No. 3, p. 361 - 373, 1986
- [8] Pietruschka, D. et. al., *Energetische und akustische Sanierung von Wohngebäuden – vom Altbau zum akustisch optimierten Passivhaus*, 2011
- [9] Tachibana, H.; Tanaka, H.; Yasuoka, M.; Kimura, S.: Development of new heavy and soft impact source for the assessment of floor impact sound insulation of buildings. *Proceedings of Inter-Noise 98*, 1998
- [20] Scheck, J.; Fischer, H.-M.; Kurz, R.; *Anregevorgänge bei leichten Treppenkonstruktionen*, *Fortschritt der Akustik*, Hamburg, DAGA 2001
- [31] Blödt, A.; Rabold, A.; Halstenberg, M.; *Schallschutz im Hochbau – Grundlagen und Vorbemessung*, *Holzbau Deutschland-Institut e.V.*, 2019
- [42] Amiryarahmada, N., *Dissertation, A Virtual Design Studio for Low-Frequency Sound from Walking in Lightweight Buildings*, Chalmers University, Gothenburg, Sweden 2019
- [53] Cremer, L., Heckl, M., *Körperschall*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995
- [64] A. Rabold, C. Châteauvieux-Hellwig, S. Mecking, *Optimierung von Holzdecken in Bezug auf die DIN 4109*, 10. Europäischer Kongress EBH 2017
- [75] Zeitler, B.; Nightingale, T.; King, F.; *Methods to control low frequency impact noise in wood-frame construction*, *Acoustics 08*, Paris, 2008
- [86] DIN EN ISO 10140-5, *Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 5: Requirements for test facilities and equipment*, 2021
- [97] Link, U.; Schanda, U.; Schramm, M.; Wolf, M.; *Helmholtzresonatoren zur Absorption tieffrequenten Trittschalls*, 37. Deutsche Jahrestagung für Akustik – DAGA, Düsseldorf, 2011
- [108] Schanda, U.; *Resonant systems for the absorption of low frequency impact noise and for damping of low frequency vibrations*, *Forum Acusticum*, Aalborg, 2011
- [119] Schoenwald, S.; Zeitler, B.; Nightingale, T.; *Prediction of the Blocked Force at Impact of Japanese Rubber Ball Source*, *Acta Acustica united with Acustica* 97(4):590-598

Tiefe (Hör-)Einblicke in die tieffrequente Trittschallübertragung

Schöpfer Fabian
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Schanda Ulrich
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Tiefe (Hör-)Einblicke in die tieffrequente Trittschallübertragung

1. Hören wir, was wir planen?

1.1. Die Sache mit dem Hören

Das Motto des diesjährigen Akustik-Blocks A3 der Tagung ist eigentlich ein langgehegter Wunsch, wenn es um Trittschallübertragung geht. In der Tat wünscht man sich Hörbeispiele, um Trittschalldämmung verständlich zu machen. Diese sind aber schwierig in ein schriftliches Dokument aufzunehmen. Es gibt diese Hörbeispiele von verschiedenen Holzdecken mit unterschiedlichstem bewerteten Norm-Trittschallpegel, wenn diese Decken von Gehern begangen werden. Konkrete Hörbeispiele haben aber immer den Nachteil, dass sie nur spezifisch für genau den jeweiligen Deckenaufbau sind. Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass die Höraufnahme von den raumakustischen Verhältnissen des Aufnahme- und des Darbietungsraumes eine Rolle spielt. Ein Anhören erfordert eine hohe Qualität an der Schallwiedergabe und in der Regel nur mit Kopfhörer realisierbar. Inwieweit der subjektive Höreindruck dadurch beeinträchtigt ist, sei dahingestellt. Ein Anhören, bezeichnet als Auralisation, ist also doch nicht so einfach möglich. Und dann würde man ja gerne die bei unterschiedlichen Anregungen wie Gehern oder spielenden Kindern anhören. Eigentlich wäre die Auralisation ein Muss in der Schallschutzberatung von Endkunden. Um nun diese Schwierigkeiten zu umgehen, befasst sich dieser Artikel zuerst mit einem messtechnischen Zugang, um den konstruktiven Aspekten der tieffrequenten Trittschallübertragung auf die Spur zu kommen und zeigt dann noch kurz auf, wie man zu einer Auralisation kommen könnte. Zuletzt sei noch erwähnt, dass insbesondere unter dem Aspekt, die Trittschalldämmung diesen Kunden, die meist keine Einordnung von akustischen Pegeln machen können, eine dem menschlichen Empfinden lineare, akustische Größe, nämlich die Lautheit anbieten zu können.

1.2. Was man bei der Trittschallübertragung hört

Es ist mittlerweile ja kein Geheimnis mehr, dass vor allem die tiefen Frequenzen bei Geheranregungen dominieren; das hört jeder.

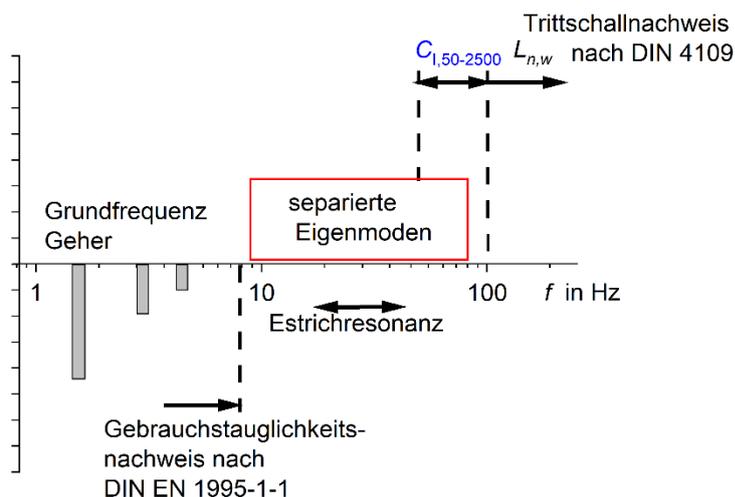


Abbildung 1: Übersicht des Frequenzbereiches im Hinblick auf Schwingungen und Trittschall

Abbildung 1 zeigt den tiefen Frequenzbereich unter 100 Hz. Der nach ISO 717-2 für die Bildung des bewerteten Norm-Trittschallpegels relevante Frequenzbereich liegt jedoch über 100 Hz. Dabei passiert hier aus akustischer Sicht jedoch sehr viel unter 100 Hz, sowohl durch die Schwingungen der Deckenkonstruktion, aber auch durch die typischen, wohnüblichen Anregungen wie Begehen, welche ihre Kräfte v.a bei tiefen Frequenzen einleiten. Abbildung 3 links soll an dieser Stelle noch einmal anhand von Terzspektren des Norm-Trittschallpegels die Relevanz des Frequenzbereiches unter 100 Hz verdeutlichen. Viele

Decken, und das gilt auch im Massivbau!, weisen hohe Norm-Trittschallpegel unter 100 Hz auf, welche nur durch den Spektrumanpassungswert $C_{I,50}$ in einer Planung berücksichtigt werden kann. Diese Problematik zeigt auch Abbildung 2 rechts anhand von 14 Reklamationsfällen von Massivbaudecken.

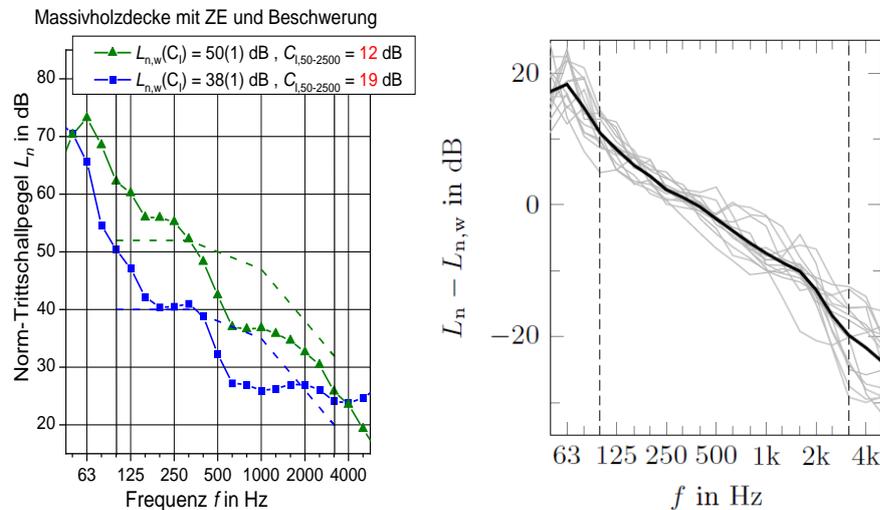


Abbildung 2: Links: Hohe Norm-Trittschallpegel bei tiefen Frequenzen (unter 200 Hz). Rechts: Auf den jeweiligen Einzahlwert bezogene Norm-Trittschallpegel von 14 Reklamationsfällen im Massivbau. Siehe [1]. Daten aus [2].

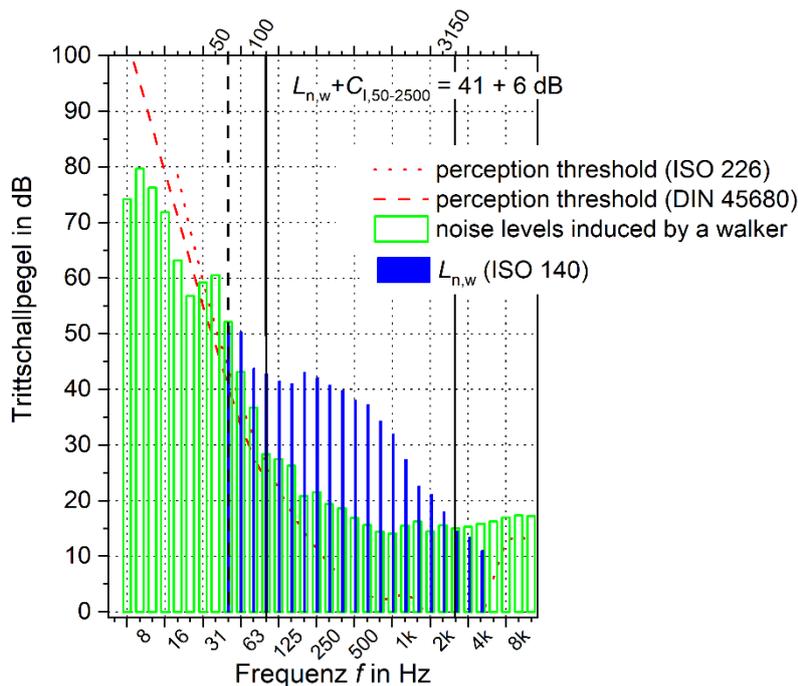


Abbildung 3: Hohe Norm-Trittschallpegel bei tiefen Frequenzen (unter 200 Hz). Beim Begehen von Decken liegen gerade die Trittschallpegel zwischen 40 Hz und 125 Hz über der Hörschwelle.

Abbildung 3 zeigt ein Terzspektrum einer Decke, und zwar für einen ausgedehnten Frequenzbereich von wenigen Hertz bis 8 kHz. Eingezeichnet ist hier zusätzlich die Hörwahrnehmungsschwelle nach ISO 226 bzw. nach der DIN 45680 für tieffrequente Geräusche. Konzentriert man sich auf die durch einen Geher verursachten Trittschallpegel, so sieht man, dass die Wahrnehmungsschwelle v.a. im Bereich von 40 Hz bis 125 Hz deutlich überschritten ist.

2. Übertragungsweg

2.1. Anregungen und deren Kräfte

Das bei der Messung des Norm-Trittschallpegels verwendete Norm-Hammerwerk ist die seit Jahrzehnten bewährte Anregungsquelle zur Untersuchung der Körperschallanregung von Decken.

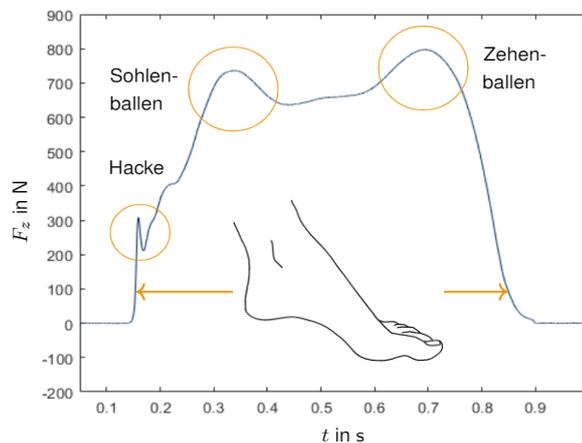
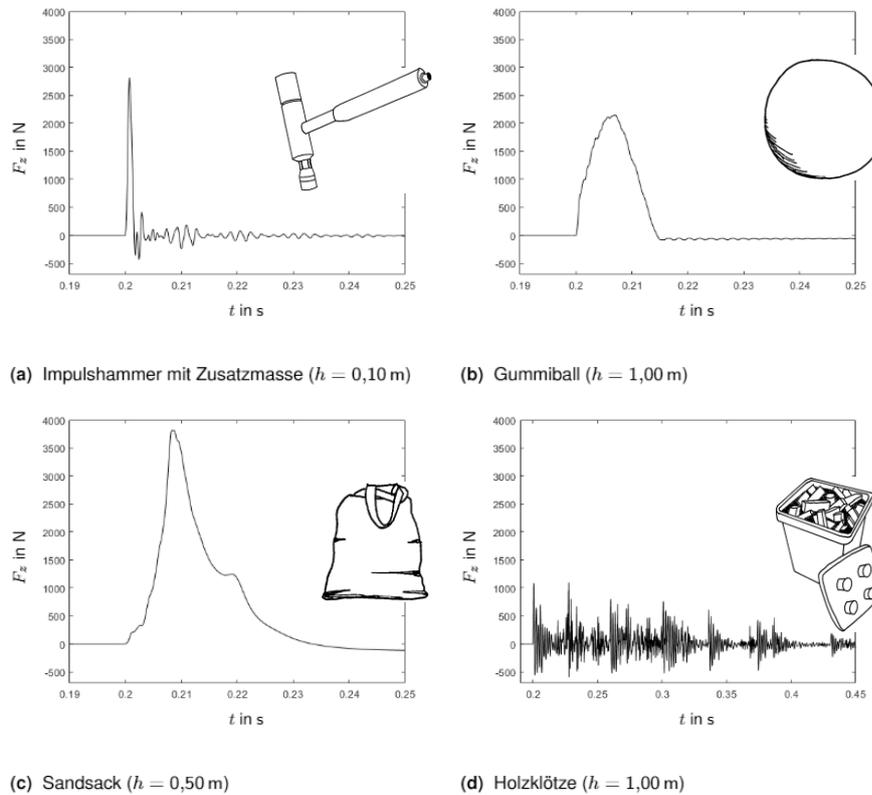


Abbildung 4: Kraft-Zeitverläufe von Anregungsquellen auf einer sehr schweren Betondecke. (a) Impulshammer (b) Gummiball ($h = 1\text{ m}$), (c) Sandsack (10 kg, $h = 1\text{ m}$) (d) Holzklötze (Bild unten) Geher mit Socken (75 kg, 100 Schritte/min) [3]

International gibt es als standardisierte Anregungsquelle auch einen genormten Gummiball. Unter Körperschallanregung fallen in der täglichen Nutzung von Trenndecken vielfältige Möglichkeiten: Die wichtigste ist dabei natürlich das Begehen der Decke, aber auch fallende Bauklötze oder spielende und hüpfende Kinder sind Körperschallquellen. Die folgende Abbildung 4 zeigt Kraft-Zeitverläufe derartiger Anregungsquellen, wenn diese auf einer sehr schweren Betondecke gemessen werden. Ebenfalls gezeigt ist ein Schlag mit einem Impulshammer. Der Gummiball und der Sandsack sind Anregungsquellen die mit hüpfen verglichen werden können.

Abbildung 5 zeigt Spektren des Kraftpegels von 5 Anregungsquellen, jedoch auf zwei unterschiedlichen Empfangsstrukturen (Tiefgaragenbodenplatte als sehr schwere Betonplatte, Holzbalkendecke mit entsprechender Nachgiebigkeit) [1]. Dabei ist zu erkennen, wie die Kraftpegel auf der Holzbalkendecke im Vergleich zur Tiefgaragenbodenplatte kleiner sind. Aufgrund des sehr hohen Widerstandes (Impedanz), den diese schwere Decke der Anregung entgegenbringt, spricht man von der blockierten Kraft (oder auch Leerlaufkraft). Eine Decke mit einer kleineren Impedanz gibt bereits während der Anregung nach, die eingeleitete Kraft wird damit geringer.

Aus der spektralen Charakteristik wird ersichtlich, dass die Anregung durch einen Geher im Wesentlichen bei Frequenzen unter 100 Hz stattfindet. Sowohl beim Geher als auch beim genormten Gummiball sind die Pegel der eingeleiteten Kraft bei beiden Empfangsstrukturen ähnlich; nicht jedoch beim Norm-Hammerwerk. Hier ist zu sehen, dass die eingeleitete Kraft (verursacht ja durch sehr kurzzeitige Hammerschläge) in den beiden Empfangsstrukturen doch deutlich unterschiedlich sind.

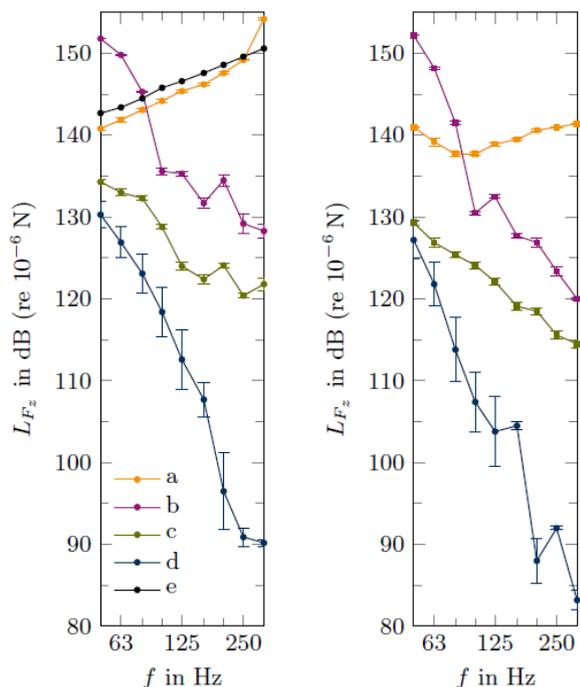


Abbildung 5: Kraftspektren gleicher Anregequellen auf unterschiedlichen Empfangsstrukturen. Links: Tiefgaragenbodenplatte als Beispiel für eine Empfangsstruktur mit sehr hoher Impedanz. Rechts: Holzbalkendecke als Beispiel für eine Empfangsstruktur mit einer kleineren Impedanz. (a) Norm-Hammerwerk, (b) Gummiball ($h = 1\text{m}$), (c) modifiziertes Norm-Hammerwerk, (d) Geher mit Socken, (e) Norm-Hammerwerk (Theorie elastischer Stoß) [1].

2.2. In die Decke eingeleitete Körperschalleistung

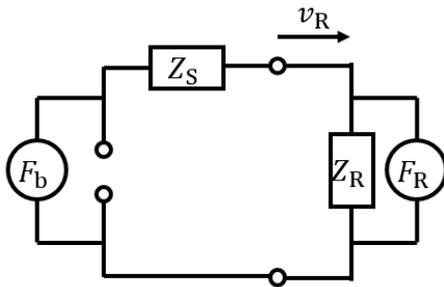
Der Nachweis der «Eignung» einer Wohnungstrennendecke wird nur über die Unterschreitung des erforderlichen Norm-Trittschallpegels (und auch nur für den Bewertungsbereich >100 Hz) erbracht. Im Folgenden wird die Körperschallanregung von Bauteilen in allgemeiner Form, d.h. bei beliebiger Anregung beschrieben und die Möglichkeiten aufgezeigt, die von diesen Anregungsquellen verursachte Schalldruckpegel vorherzusagen. Der Nutzen des Norm-Trittschallpegels zur Nachweisführung des Trittschallschutzes wird damit in keinsten Weise in Frage gestellt, sollte jedoch unter Berücksichtigung des Spektrumanpassungswertes $C_{1,50-2500\text{Hz}}$ erfolgen.

Die Trittschallanregung stellt allgemein betrachtet im Gebäude eine Körperschallanregung dar. Analog zur Luftschalleistung kann auch der Körperschall als Leistung, der sogenannten installierten Leistung [4] angegeben werden. Bei der Luftschalleistung ist die Angabe weitestgehend allgemein gültig, da die Eigenschaften der Luft als Medium, in das die Leistung abgegeben wird, in der Regel nur geringfügig schwanken. Bei der Körperschalleistung sind die Eigenschaften des Bauteils, an dem die Anregung stattfindet, sehr wichtig und

somit zwingend mit zu beachten. Zunächst kann die durch eine anregende Quelle eingeleitete Körperschalleistung aus der auf die Struktur (Receiver, Index «R») wirkende Kraft, \hat{F}_R und der Schwingschnelle, \hat{v}_R der Struktur an diesem Punkt beschrieben werden

$$P_R = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{\hat{F}_R \cdot \hat{v}_R^*\} \quad (1)$$

Hier ist eine Analogie zur Elektrotechnik zu erkennen, wo die Wirkleistung das Produkt aus Spannung und Strom ist. Ein Schaltbild der elektro-mechanischen Analogie 1. Art ist in Abbildung 6 dargestellt.



$$\hat{F}_R = \hat{F}_b \frac{Z_R}{(Z_S + Z_R)} = \hat{F}_b \frac{Y_S}{(Y_S + Y_R)}$$

Abbildung 6: Ersatzschaltbild (Spannung→Kraft, Strom→Schnelle)

Die Impedanz Z (komplexer Widerstand) ergibt sich aus dem Verhältnis der anregenden (eingeleiteten) Kraft \hat{F}_R als die Ursache für die Bewegung der Decke zur Reaktion der Decke, beschrieben mit der Schwingschnelle. Der Kehrwert der Impedanz Z wird als Admittanz, Y (Anregbarkeit) bezeichnet und ist ein Maß dafür, wie gut eine Decke durch eine Krafteinleitung angeregt wird. In Gleichung (2) ist die Impedanz bzw. Admittanz für die Decke (Receiver, Index «R») und die Impedanz bzw. Admittanz der Quelle (Source, Index «S») definiert.

$$Z_R = \frac{\hat{F}_R}{\hat{v}_R}; Y_R = \frac{\hat{v}_R}{\hat{F}_R} \quad \text{bzw.} \quad Z_S = \frac{\hat{F}_S}{\hat{v}_S}; Y_S = \frac{\hat{v}_S}{\hat{F}_S} \quad (2)$$

Mit Gleichung (2) kann die installierte (eingeleitete) Körperschalleistung aus Gleichung (1) allein mit der tatsächlich auf die Struktur wirkende Kraft und der Admittanz der Struktur ausgerückt werden.

$$P_R = \frac{1}{2} |\hat{F}_R|^2 \operatorname{Re}\{Y_R\} \quad (3)$$

Die tatsächliche Kraft ist aber abhängig von der Admittanz des angeregten Bauteils und der Admittanz der Anregungsquelle (s.u.).

Aus dem Schaltbild in Abbildung 6 wird ersichtlich, dass die blockierte Kraft eine Größe ist, welche die Anregungsquelle unabhängig von der angekoppelten Struktur beschreibt. Damit kann die installierte (eingeleitete) Körperschalleistung nun nur noch mit Größen beschrieben werden, die für die Struktur und die Quelle unabhängig voneinander ermittelbar bzw. messbar sind.

$$P_R \approx \frac{1}{2} |\hat{F}_b|^2 \cdot \frac{|Y_S|^2}{|Y_S|^2 + |Y_R|^2} \cdot \operatorname{Re}\{Y_R\} \quad (4)$$

Für den bereits erwähnten Fall einer sehr schweren Betondecke als Empfangsstruktur ist die Admittanz Y_R sehr klein. Damit ist der mittlere Faktor nahe Eins, Gleichung (4) geht damit in Gleichung (3) über, die eingeleitete Kraft entspricht der blockierten Kraft.

2.3. Übertragungsfunktion zur Prognose des Schalldruckpegels im Empfangsraum

Setzt man den Schalldruck im Empfangsraum ins Verhältnis zur Anregung, also zum Beispiel zur installierten Leistung, so erhält man eine sogenannte Übertragungsfunktion. Für ein lineares, zeitinvariantes System (von dem man im Gebäude i.d.R. ausgehen kann) ist diese Übertragungsfunktion ein konstanter Übertragungsfaktor zwischen Eingangsgröße und Ausgangsgröße. Das heißt aber auch im Umkehrschluss, dass alle Informationen der black box, also der gesamten Anregung, der Übertragung, der Abstrahlung, ja sogar der Eigenschaften des Empfangsraumes in dieser Übertragungsfunktion enthalten sind. Vor allem bei der tieffrequenten Trittschallübertragung sind nicht nur die Konstruktion der Decke, sondern auch der Ort der Anregung oder das Schallfeld im Empfangsraum Parameter die sich signifikant auswirken können. Vor allem in der Produktentwicklung stellen Übertragungsfunktionen somit ein wichtiges Werkzeug dar. Tatsächlich müssen die Übertragungsfunktionen nicht als Terz-, sondern als Schmalbandspektrum vorliegen, da nur dann konstruktive Informationen darin abzulesen sind.

Tatsächlich kann man den bekannten Norm-Trittschallpegel verwenden, um eine Übertragungsfunktion zwischen dem gemittelten und normierten Schalldruckpegel im Empfangsraum, $L'_{n,w}$ und dem tatsächlichen Kraftpegel des Norm-Hammerwerkes, $L_{F,R,NHW}$ auf der Decke in Pegelschreibweise als Differenz aufzustellen.

$$\text{Übertragungsfunktion} = L'_{n,w} - L_{F,R,NHW} \quad (5)$$

Theoretisch könnte man nun die Kraft des Norm-Hammerwerkes ersetzen, um für beliebige Anregekräfte, zum Beispiel durch eine gehende Person oder eine Waschmaschine, den resultierenden Schalldruckpegel zu berechnen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die tatsächliche Kraft des Hammerwerkes nicht immer als bekannt angenommen werden kann. Insbesondere dann nicht, wenn wie in Abschnitt 2.1 beschrieben die Admittanz der Decke nicht viel kleiner als die des Hammerwerkes selbst ist.

Alternativ kann die Decke aber auch mit einem Modalhammer angeregt werden, wodurch die anregende Kraft gemessen wird und somit bekannt ist. Wird zudem die Schwingschnelle nahe der Anregung und der Schalldruckpegel im Empfangsraum gemessen, kann eine Übertragungsfunktion zwischen dem resultierenden Schalldruckpegel und der Körperschalleistung aufgestellt werden. Diese beschreibt nun wiederum allgemeingültig die Übertragung von einer beliebigen Körperschallanregung und dem resultierenden Schalldruck. Der Schalldruck wird nun mit einem zusätzlichen Index «e» versehen, der für Equipment, also eine beliebige Anregungsquelle steht. Der Index «s» beim Leistungspegel steht für «structure-borne sound» (Körperschall). Für eine bekannte Anregung mit $L_{W,s,i}$ kann also der L'_{ne} gemessen werden. Für ein lineares zeitinvariantes System kann die Differenz nun auch für eine Bezugsleistung von 1 Watt ($L_{W,0} = 120$ dB) und den daraus resultierenden Schalldruckpegel $L'_{ne,0,s,i}$ [5] aufgestellt werden.

$$L'_{ne,0,s,i} - L_{W,s,0,i} = L'_{ne} - L_{W,s,i} \quad (6)$$

Durch Umstellen erhält man $L'_{ne,0,s,i}$ aus den beiden bekannten gemessenen Größen und der Bezugsleistung $L_{W,s,0,i}$ von 1 Watt bzw. 120 dB.

$$L'_{ne,0,s,i} = L'_{ne} - L_{W,s,i} + 120 \text{ dB} \quad (7)$$

Dieser Schalldruckpegel ist nun sehr ähnlich dem bekannten Norm-Trittschallpegel, beschreibt aber in allgemeiner Form den resultierenden Schalldruckpegel inklusive aller Übertragungswege für eine Körperschallanregung mit 1 Watt auf dem Bauteil i .

Hier zeigt sich neben der detaillierten Analyse der Übertragung eine zweiter vorteilhafter Aspekt der Übertragungsfunktion. Sie erlaubt es auf der Anregungsseite beliebige Quellen rechnerisch einzusetzen und den jeweiligen resultierenden Schalldruck zu bestimmen. Dies

zeigt aber auch die Nachteile der sonst sehr praktikablen Messung des Norm-Trittschallpegels mit dem Hammerwerk auf: Diese eignet sich sehr gut um über einen breiten Frequenzbereich die Körperschallübertragung verschiedener Decken miteinander zu vergleichen und Anforderungswerten gegenüberzustellen. Mit den Schalldruckpegeln, erzeugt von tatsächlichen Anregungsquellen wie dem Begehen einer Decke hat die Hammerwerksmessung, auch wenn es der Name «Trittschallpegel» vermuten lässt, wenig zu tun. Die übliche Hammerwerksmessung soll hier aber nicht infrage gestellt werden. Vielmehr soll an dieser Stelle aber auf die Möglichkeiten der allgemein formulierten Übertragungsfunktion zum Beispiel in der Produktentwicklung hingewiesen werden. Durch die Analyse von Übertragungsfunktionen im tiefen Frequenzbereich kann viel über die Konstruktion gelernt und diese daraus optimiert werden. Zudem erlaubt diese Formulierung eine Berechnung der zu erwartenden Schalldruckpegel für beliebige realistische Anregungsquellen neben dem Norm-Hammerwerk.

3. Analyse der tieffrequenten Körperschallübertragung

3.1. Übertragungsfunktion im Detail

In der Überschrift dieses Abschnittes wurde nun bewusst der Begriff Körperschallübertragung als allgemeine Form der Trittschallübertragung verwendet. Im Folgenden werden nun im Labor gemessene Übertragungsfunktionen für verschiedene Deckenkonstruktionen als schmalbandige Spektren im tiefen Frequenzbereich gezeigt. Dabei wurden folgende Deckenaufbauten betrachtet:

1. Rohdecke (**RD**) mit sichtbarer Balkenlage
2. Schüttung und Trockenestrich (**Estrich**) auf **RD**
3. **RD** mit Unterdecke an Federschiene (**UD**)
4. **Estrich + RD + DU**

Abbildung 7 zeigt den $L'_{ne,0,s,i}$ für diese vier Varianten. Dabei wurden 5 beliebige Anregungspositionen auf der Decke und 6 Mikrofonpositionen im Empfangsraum gemittelt.

Bei sehr tiefen Frequenzen < 10 Hz liegen die Daten der Decken sehr nahe zusammen. In diesem Bereich ist die Übertragung durch das modale Biegeverhalten der Gesamtkonstruktion geprägt. Schon bei tiefen Frequenzen wird aber der Effekt der Beschwerung durch die Schüttung sichtbar. Bei 26 Hz tritt ein deutlicher Effekt bei allen Konstruktionen auf. Die halbe Wellenlänge bei dieser Frequenz entspricht der Raumlänge des Empfangsraumes; damit handelt es sich um eine Resonanz des Empfangsraumes. Bis etwa 63 Hz ist die Wirkung der Unterdecke kaum zu erkennen, die Werte mit Unterdecke liegen bis hier im Bereich der Rohdecke. Dies zeigt den Einfluss verschiedener Einflussparameter auf den Schalldruckpegel im tiefen Frequenzbereich.

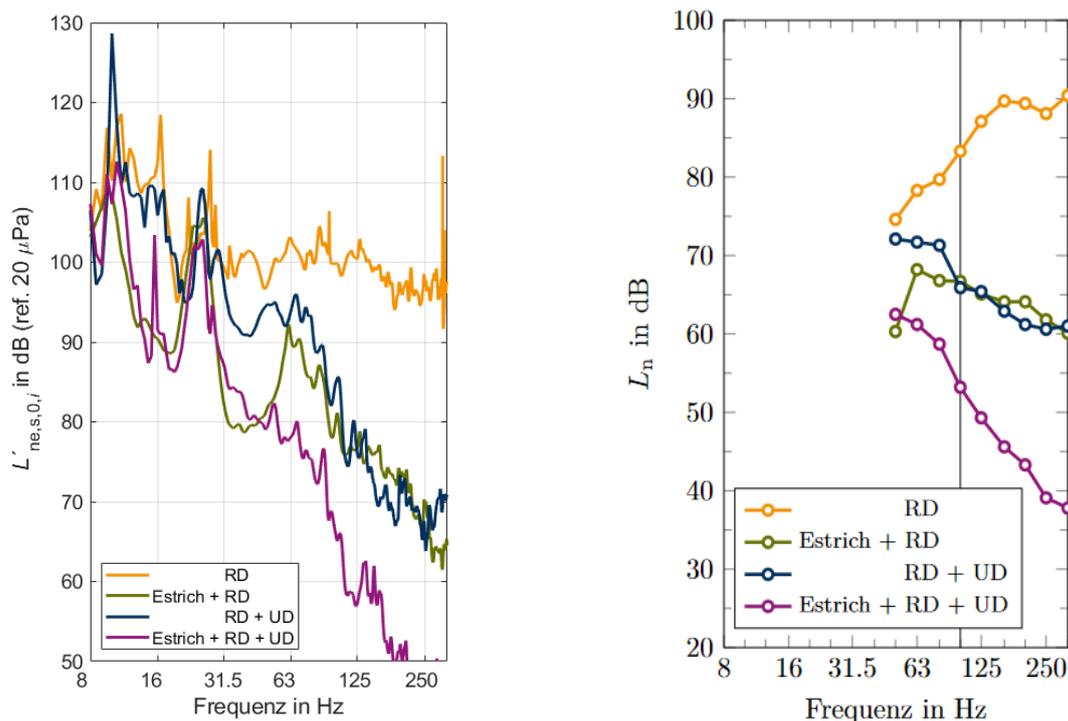


Abbildung 7: $L'_{ne,s,0,i}$ (s. Gleichung(8)) für die vier verschiedenen Varianten der Holzbalkendecke. Als Vergleich sind auch die Terzspektren des Norm-Trittschallpegels bis 315 Hz dargestellt (ab dem 50 Hz Terzband) [6].

3.2. Konstruktion der Decke

Holzdecken können vereinfacht als Masse-Feder-Systeme verstanden werden (s. Abb. 8).

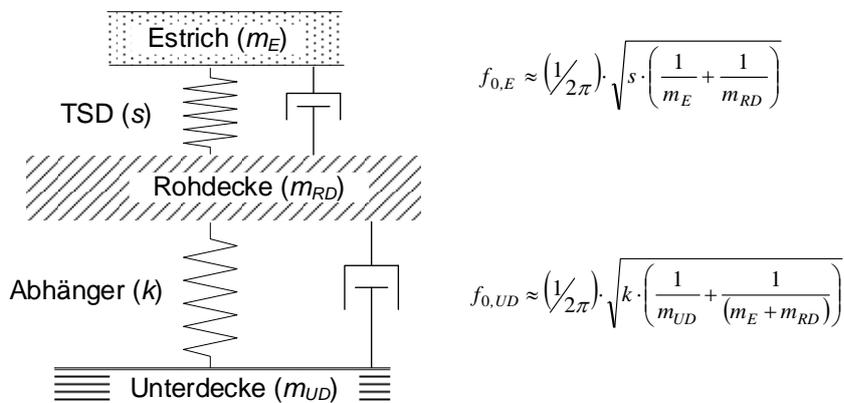


Abbildung 8: Schematische Skizze des mechanischen Systems einer Decke mit schwimmendem Estrich und Unterdecke.

Die konstruktiven Einflüsse können zusätzlich vertieft durch die Untersuchung der Biegeschwingungen bei tiefen Frequenzen untersucht werden. Hierzu sind im folgenden Schwingungsbilder für die unterschiedlichen Schalen einer Brettspertholzdecke mit schwimmendem Estrich und abgehängter Unterdecke gezeigt.

Bei tiefen Frequenzen schwingen alle 3 Schalen als ein gesamtes System. Mit zunehmender Frequenz entkoppeln die Schalen oberhalb der jeweiligen Resonanzfrequenzen und bilden Schwingformen aufgrund der eigenen Abmessungen, Randbedingungen und Materialeigenschaften aus.

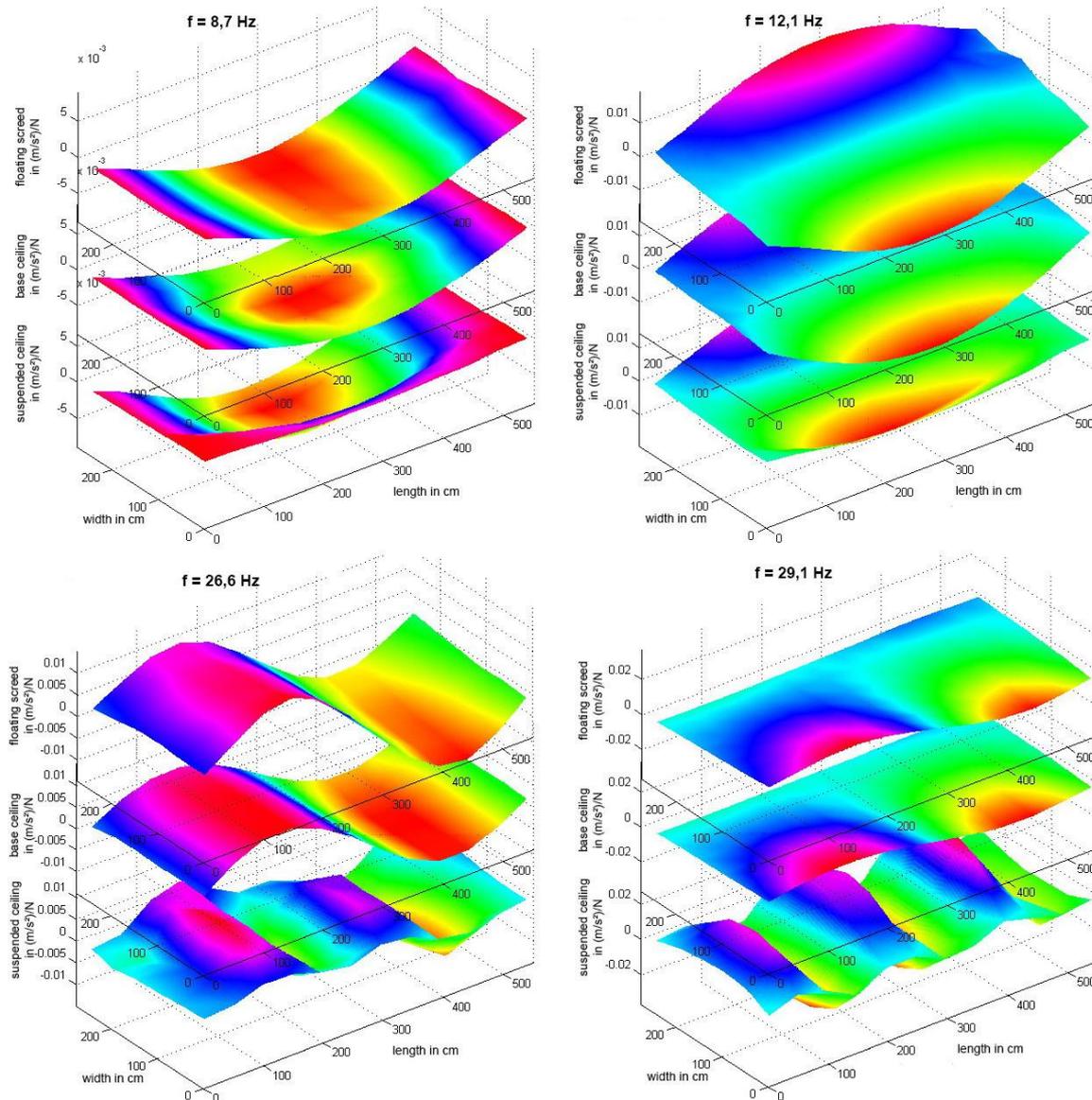


Abbildung 9: Die vier ersten Eigenmoden einer Brettsperrholzdecke; zu sehen sind jeweils die Schwingformen des schwimmenden Estrichs (oben), der tragenden Brettsperrholzdecke selbst (Mitte) sowie einer abgehängten Unterdecke aus Gipskarton (unten). Während bei den ersten beiden Eigenschwingungen bei 8,7 Hz und bei 12,1 Hz alle drei Deckenkomponenten noch konphas schwingen, hat sich bei den höheren Eigenmoden die Unterdecke «verselbstständigt». Für den übertragenen Schall in den unteren Raum ist natürlich das aus dem Gesamtsystem resultierende Schwingungsverhalten der Unterdecke maßgeblich [7].

4. Lautheit als bessere Bewertungsgröße

Der Norm-Trittschallpegel bei der Anregung durch das Norm-Hammerwerk oder auch andere akustische Bewertungsgrößen wie z.B. der A-bewertete, maximale Schalldruckpegel geben Unterschiede nicht linear skaliert mit der subjektiven Lautstärkewahrnehmung wieder. Nur bei 1 kHz ist die Aussage korrekt, dass eine Erhöhung von 10 dB einer Verdopplung in der Wahrnehmung bedeutet. Die Lautheit in Sone hingegen stellt eine lineare Skala der Lautstärkewahrnehmung dar. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Lautheit und Messungen des Trittschallpegels in einem funktionalen Zusammenhang stehen und ineinander überführt werden können [8] [9]. Vor allem in der Beratung stellt die Lautheit deshalb eine zu beachtende Größe dar, die durchaus als Ergänzung zum Norm-Trittschallpegel herangezogen werden kann.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Frage, ob wir hören was wir planen, muss bei einer Betrachtung des bewerteten Norm-Trittschallpegels tatsächlich mit «nein» beantwortet werden. Typische Anregungsquellen von Decken haben die maßgeblichen Anregungskomponenten im Frequenzspektrum unter 100 Hz und werden so vom Einzahlwert des Norm-Trittschallpegels nicht «erkannt». Abhilfe schafft die zusätzliche Berücksichtigung des Spektrumanpassungswertes $C_{1,50-2500\text{Hz}}$. Um nun vor allem in diesem tiefen Frequenzbereich die Entwicklung von Deckensystemen zu optimieren, können Übertragungsfunktionen herangezogen werden, die die Körperschallübertragung ganz allgemein abbilden. Das Norm-Hammerwerk ist dabei nur ein Spezialfall. So können beliebige Anregungsquellen betrachtet und der resultierende Schalldruckpegel rechnerisch abgeschätzt und bewertet werden. Gemessene Übertragungsfunktionen stammen eigentlich aus der Frequenztransformation der gemessenen Impulsantwort. Mit letzteren kann durch eine Faltung im Zeitbereich mit beliebigen Kraft-Zeitverläufen von Anregungen das Geräusch im Empfangsraum zu auralisieren, also hörbar zu machen. Das wäre der Schritt, wo wir die Frage ob wir hören was wir planen, mit «ja» beantworten können.

6. References

- [1] Schöpfer F, Schanda U (2021) Analyse der tieffrequenten Trittschallübertragung mittels Übertragungsfunktionen. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (ed) Fortschritte der Akustik - DAGA
- [2] Möller K (2019) Tieffrequenter Trittschall – Ermittlung eines Bewertungskriteriums auf Basis akustischer Daten. Studienarbeit, Technische Hochschule Rosenheim
- [3] Weinzierl J (2021) Messung und Vergleich von Kraftspektren unterschiedlicher Deckenanregungen. Studienarbeit, Technische Hochschule Rosenheim; Hochschule für Technik Stuttgart
- [4] DIN EN 15657:2017-10 Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen
- [5] prEN 12354-5:2022 Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 5: Installationsgeräusche
- [6] Silberbauer VE (2019) Analyse der Trittschalldämmung von Holzbalkendecken bei Anregung durch stationäre und instationäre Schallquellen. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Rosenheim
- [7] Völkl R, Schanda U, Kohrmann M et al. (2013) Simultaneous operational vibration analysis of different layers of lightweight timber floors. In: Proceedings of Inter-Noise 2013
- [8] Rabold A (2011) Trittschalldämmung richtig bewerten. In: Forum Holzbau (ed) 1. Internationale Schall & Akustiktag
- [9] Weber K (2021) Lautheit als Messgröße für die Trittschallübertragung. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Rosenheim

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien
Wärme & Feuchte

Feuchte Monitoring mit verschiedenen Messmethoden Fallbeispiel: Apartmenthaus

Anton Kraler
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck, Österreich



Feuchte Monitoring mit verschiedenen Messmethoden – Fallbeispiel Apartmenthaus

1. Einleitung

Bauen mit Holz, vom Einfamilienhaus bis zum Hochhaus, ist beliebter denn je. Die steigenden Preise, Anforderungen an die Qualität und die zeitliche Umsetzung wirkt sich auch auf die zeitgenössische moderne Architektur aus. Die Gründe sind weitläufig: Bieten doch einfache geradlinige Baukörper enorme Vorteile in Bezug auf die Systematisierung, Vorfertigung und Ausführung von Gebäuden. Daher hat sich z.B. beim Dach, der Trend vom geneigten Dach zum Flachdach entwickelt. Neben den genannten Gründen bieten flache Ebenen weitere Vorteile: das Einhalten der gesetzlichen Abstandsbestimmungen zu den Nachbargrundstücken ist leichter möglich, die Flächen können als Terrasse, Garten, sowie auch zum Aufstellen von Haustechnikgeräten, (Wärmepumpen, Lüftungsgeräte etc.) genutzt werden. Durch die Möglichkeit der Vorfertigung und schnellen Umsetzung von Bauwerken, mit dem Naturbaustoff Holz, stellt sich die Frage, ob unter diesen Bedingungen eine ausreichende und qualitativ hochwertige Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle möglich ist. Gerade in Bezug auf Feuchtigkeit ist mit Naturbaustoffen sehr sorgfältig umzugehen, um die Dauerhaftigkeit eines Bauwerks zu gewährleisten. Trotz großer Sorgfalt bei der Umsetzung von Bauwerken kommt es, begründet auch durch die Schnelligkeit des Bauablaufs, oft zu Fehlern in der Ausführung und dadurch zu unvorhersehbaren Feuchteproblemen im Bauwerk. Die langfristige Überwachung der Dichtheit von Abdichtungen, nicht zugänglichen Installationsleitungen im Fußbodenaufbau und die Kontrolle der Materialfeuchte wird daher immer wichtiger und soll sicherzustellen, dass es zu keinen Schädigungen der Bauteile durch Feuchtigkeit kommt.

Mit der Thematik des Feuchte Monitorings bzw. der Dichtheitsüberwachung von Abdichtungen und wasserführenden Leitungen haben sich in vergangenen Jahren vermehrt Institutionen und Firmen auseinandergesetzt. Das Ziel war und ist es, Systeme zur Überwachung der Feuchteentwicklung auf der Abdichtungsebene, in der Dämmebene und der Materialfeuchte auf den Markt bringen, um den Feuchteschutz zu erhöhen. In dieser Arbeit werden drei qualitätssichernde aktive Monitoring Systeme vorgestellt, mit denen feuchtegefährdete Bauteilbereiche überwacht werden können. Zu überwachende feuchtegefährdete Bauteile sind z.B. die Dach- und Terrassenabdichtungen, die Dämmebene im Warmdachaufbau sowie die Materialfeuchte (Holzfeuchte) der Tragkonstruktion. Weiter ist die messtechnische Überwachung von wasserführenden Leitungen im Bodenaufbau wichtig, um Undichtheiten bei den Installationen schon früh zu erkennen. Unter aktiver messtechnischer Überwachung versteht man Überwachungssysteme mit automatisierter Auswertung und Alarmierung bei einer definierten Grenzwertüberschreitung, mit ingenieurtechnischer Bewertung von Feuchtezuständen in Bauteilen.

Die Fragen, die sich im Rahmen von messtechnischen Dichtheits-, Feuchte- und Materialfeuchteüberwachung ergeben sind folgende: Welches Monitoring System ist für welche Überwachung am besten geeignet? Welche Gefahren entstehen durch den Einbau der Messsysteme? Wie funktionieren die Überwachungen und welche Lebensdauer haben die Monitoring Systeme? Damit auf solche und weitere Fragen Antworten gegeben werden können, entstand in Zusammenarbeit mit dem Holzbauunternehmen Ligna Construct aus St. Pankraz in Südtirol und mit finanzieller Unterstützung durch die Provinz Südtirol / Italien (Beratungs- und Dienstleistungsunterstützung) ein Forschungsprojekt, bei dem unterschiedliche aktive Monitoring-Messsysteme zu Einsatz kommen. Bereits in der Bauphase, bei den ersten Abdichtungsarbeiten, konnten hilfreiche Erfahrungen mit den verwendeten Monitoring Messsystemen erzielt werden. Kleinste Leckagen konnten aufgrund geringer Wassereintritte in kürzester Zeit geortet und beseitigt werden.

2. Feuchte- und Dichtheits- Monitoringsysteme

Feuchte- und Dichtheits- Monitoringsysteme werden hauptsächlich bei Bauteilen eingesetzt, wenn diese im nicht sichtbaren und nicht einfach kontrollierbaren Bereich liegen. Hauptanwendungsgebiete sind einerseits Flachdächer, Terrassen und sonstige Ebene Flächen. Der Einbau erfolgt zwischen dampfbremsenden und dampfsperrenden Schichten, im Regelfall auf der ersten Abdichtungsebene der Tragstruktur. Systemabhängig wird zwischen Flächen- und Punktsensoren unterschieden. Die Flächensensoren werden schon während der Bauphase eingebaut und verteilen sich je nach Konzept entweder über der gesamten ebenen Fläche oder nur über die feuchtekritischen Bereiche (Gully / Abfluss). Flächensensoren werden auch im Sanitärbereich, direkt auf dem Rohboden, eingebaut. Punktsensoren, die bei diesem Projekt zum Einsatz kommen, haben den Vorteil, dass sie im Regelfall erst nach Fertigstellung der Dachabdichtungen eingebaut werden. Punktsensoren können auch später noch nachgerüstet werden. Somit eignet sich dieses Monitoring System auch in der Sanierung und zur Qualitätssicherung von alten Dach- und Deckenkonstruktionen. Für die zwei genannten Monitoring Systeme gibt es noch eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten, hier werden nur diese aufgezählt die auch im Fallbeispiel vorkommen. Bei dieser Forschungsarbeit wird neben den genannten aktiven Feuchte- und Dichtheits- Monitoring Systemen auch ein aktives Materialfeuchte (Holzfeuchte) Monitoring System in Form der elektrischen Widerstandsmessung eingesetzt, welches unterhalb der Abdichtung in die Holztragstruktur eingebaut wird. Das Ziel ist bei allen drei gewählten Monitoring Systemen das Gleiche, es geht darum, Feuchteinträge jeglicher Art möglichst früh zu erkennen, um dadurch Schäden zu vermeiden bzw. so gering als möglich zu halten.

2.1. Messsystem 1: Elektrisches Widerstandsmessverfahren

Für die Überwachung der Holzfeuchte wird das elektrische Widerstandsmessverfahren der Firma Scantronik Mugrauer GmbH verwendet. Diese Methode ist in den Fachkreisen als Stand der Technik anerkannt und ermöglicht eine zerstörungsfreie Messung der Feuchtegradienten über den Holzquerschnitt. Für die Messung der Holzfeuchteverteilung werden Elektroden in Form von Nirosta Schrauben mit unterschiedlichen Längen verwendet. Der Schraubenschaft wird mit einer Schrumpfmanschette isoliert, sodass nur an der Schraubenspitze die Feuchtigkeit gemessen wird. Dadurch ist es möglich die Holzfeuchte gezielt in verschiedenen Tiefen des Holzes zu messen. Der Abstand der Elektroden beträgt nach Vorgaben des Herstellers 30 mm. Mit abgeschirmtem Koaxialkabel, die eine Maximallänge von 15 Metern haben dürfen, werden die Messelektroden an das Materialfeuchtemessgerät angeschlossen. Es können bis zu acht Messpunkte mit einem Gerät überwacht und je nach Voreinstellung im Sekunden-, Minuten- oder Stundentakt an einen Datenlogger weitergeleitet und gespeichert werden. Weiter besteht die Möglichkeit über einen Datenlogger in Kombination mit einer Sensoreinheit auch die Temperatur (Holz, Luft, etc.) und die relative Luftfeuchtigkeit aufzuzeichnen. Die mit dem Datenlogger gespeicherten Messwerte können je nach festgelegtem Zeitintervall per E-Mail erhalten, bzw. wenn ein Stromanschluss vorhanden ist jederzeit mittels Telefonnummer der verwendeten Sim-Karte abgerufen werden. Der Ausgabewert der Holzfeuchte wird in Prozent oder in Ohm als Widerstand angegeben.

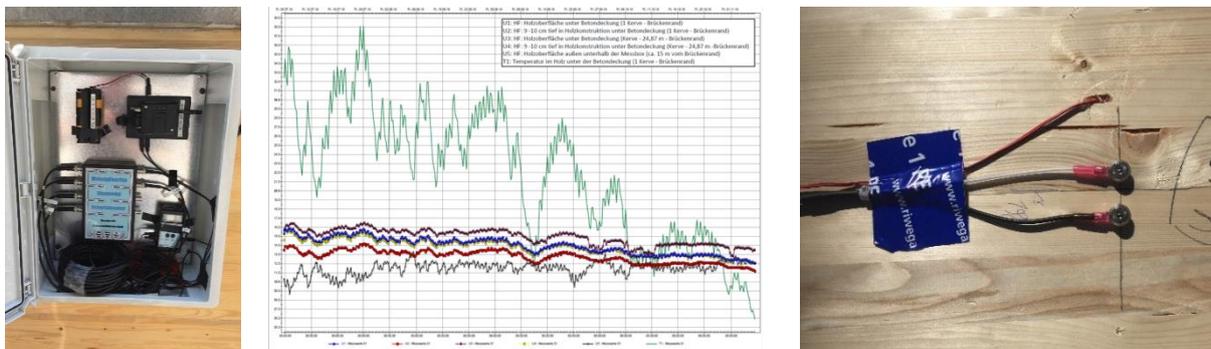


Abbildung 1: Scantronik Messtechnik – Holzfeuchte Messung mittels elektrischen Widerstandsmessverfahren

2.2. Messsystem 2: Flächensensoren

Das Optidry®-Monitoring-System (OMS) ist ein aktives Gebäude Monitoring- und Warnsystem zur Früherkennung und Detektion von verdeckten Wasserschäden. Dabei werden die Bandsensoren im Zuge der Flachdach-Eindeckung auf der diffusionshemmenden bzw. dampfsperrenden (Warmdach) Ebene verlegt. Vor der Verlegung der Bandsensoren wird das Dach in Rand-, Flächen- und Gefahrenzonen eingeteilt. Die Verlegung ist einfach und hängt von der verwendeten Abdichtungsbahn (Bitumen, Kunststoff, Rohdecke) ab, ob die Bandsensoren geklebt oder genagelt werden. Bis zu acht unabhängigen Überwachungsbereiche (Bandsensoreinheiten) können über ein Bussystem gespeichert und mit einer Zentrale verbunden werden. Bei Überschreitung der festgelegten Feuchteobergrenze, in Digits angegeben, wird von der Zentrale ein Alarm ausgelöst und an den Kunden weitergeleitet. Der aktuelle Feuchtezustand auf der Abdichtungsebene kann mit der OMS Inspektor-App direkt am Smartphone, Tablett oder PC abgerufen und ausgewertet werden. Ein Wassereintritt kann somit frühzeitig erkannt und örtlich eingegrenzt werden. Neben Flachdächern und Terrassen kommt das System auch in Nasszellen ab Nutzungsklasse W3 zum Einsatz. Das Optidry Monitoring System kann in Smarthome Systeme oder in die technische Gebäudeausstattung integriert werden.



Abbildung 2: Optidry Monitoring-System (OMS); Feuchte- und Dichtheitsmessung mittels Bandsensoren

2.3. Messsystem 3: Punktsensoren

Der RPM ROOF PROTECTOR ist eine einfache und effiziente Methode, um Feuchtigkeit in Dachkonstruktionen sofort zu erkennen und rechtzeitig zu handeln. Über die Dachfläche regelmäßig verteilte Indikatoren messen die Feuchtigkeit und die Temperatur. Dadurch ist es möglich, Aussagen über den Feuchtezustand eines Dachpaketes (Dämmpaketes) zu treffen. Das Messsystem kann mit allen handelsüblichen Dachschichten (Abdichtungen, Dämmungen, etc.) kombiniert werden. Das System erfüllt auch die in der ÖNORM B3691 geforderte Zusatzmaßnahme bei der Überwachung von Flachdächern der Nutzungskategorie 3. Die erfassten Messdaten werden auf einem Zentralserver der RPM Gebäude Monitoring GmbH gespeichert und können via Webbrowser permanent und zu jeder Zeit abgefragt werden. Der Messsensor befindet sich im Warmdachaufbau knapp oberhalb der Abdichtungsbahn (Dampfsperre). Neben der Messung der Feuchtigkeit, in Digit angegeben, wird auch die Temperatur im Bereich der Dampfsperre und außen an der Oberkante des Dachaufbaus gemessen. Der Einbau erfolgt im Regelfall erst nach dem Verlegen der obersten Abdichtungsebene. Mit einem sogenannten Dosenbohrer, der denselben Durchmesser wie der Punktsensor hat, wird der Dämmstoff im Warmdachaufbau herausgebohrt und der vullgedämmte Punktsensor dort eingesetzt. Das verwendete System wird mit Batterien betrieben und ist daher unabhängig und kann daher überall eingesetzt werden wo ein Funkkontakt für die Datenübertragung vorhanden ist.

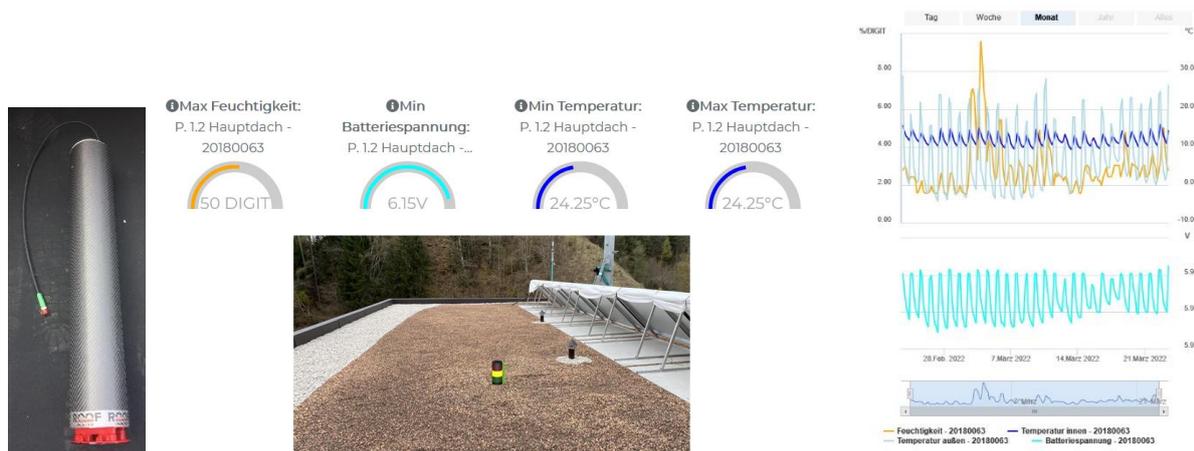


Abbildung 3: RPM Roof Protector; Feuchte- und Dichtheitsmessung mittels Punktsensoren

3. Fallbeispiel Apartmenthaus

Bei dem Apartmenthaus handelt es sich um ein neu errichtetes dreigeschossiges Gebäude mit fünf Wohneinheiten, mit integrierter Garage im Untergeschoss und einem an der Westseite angrenzenden eingeschossigen begrünten Bestandsgebäude welches als Fitness- und Wellnessbereich genutzt werden soll. Die zwei Obergeschosse und Teile der Decke über dem Untergeschoss wurden in Holzmassivbauweise ausgeführt. Durch die vielen ebenen Flächen (Flachdach, Terrassen, Balkon, Überdachungen, etc.) sowie der wechselten Materialien (Beton, Massivholz, Bitumenabdichtungen, Kunststoffabdichtungen, etc.) und aufgrund der exponierten Lage eignet sich dieses Gebäude besonders gut für Untersuchungen mit unterschiedlichen Feuchte-, Dichtheits- und Materialfeuchte Monitoring Systemen.



Abbildung 4: Apartmenthaus -Flachdach (rot) -Terrassen(blau); Bestandsgebäude -Begrünte Dachfläche (grün)

Im September 2020 begannen die ersten Beratungs- und Dienstleistungstätigkeiten zum Feuchte Monitoring – Wohnhaus in St. Pankraz der Firma Ligna Construct. Nach vorheriger Recherche wurden im ersten Schritt festgelegt, welche und wieviel Messsysteme im und am Gebäude zum Einsatz kommen sollen. Bei der Entscheidung wurde besonders darauf geachtet, dass vor allem die Gebäudebereiche mittels den gewählten Monitoringsystemen überwacht werden, bei denen eine höhere Gefahr von Feuchte bzw. Wassereintritt gegeben ist. Weiter wurde darauf geachtet, die Messsysteme und Anzahl der Systeme so einzubauen, dass die Dichtheits- und Feuchteüberwachung über einen Großteil der Dach-, Terrassen- und begrünten ebenen Flächen gegeben ist. Es wurde auch darauf geachtet, dass die Möglichkeit besteht, die Messergebnisse der verschiedenen eingebauten Monitoring Systeme mit einander zu vergleichen. Das Ziel war und ist, dass möglichst viele Ergebnisse und Erkenntnisse für zukünftige Holzbauten eruiert werden können. In Zusammenarbeit mit der Holzbaufirma Ligna Construct wurden drei Feuchte Monitoring Systeme festgelegt die zum Einsatz kommen.

Als erstes System wurden die Holzfeuchtemesssensoren von der Firma Scantronik Mugrauer eingebaut. Dabei handelt es sich um das elektrische Widerstandmessverfahren, welches auch als Standardmessverfahren für die Holzfeuchte in den Holzbaubetrieben verwendet wird. Der Unterschied zu den Einschlagelektroden ist, dass die Elektroden (Nirosta-Schrauben) in das Holz im Abstand von 30 mm eingedreht werden und über Koaxialkabel mit einem Datenlogger verbunden sind und aufgezeichnet werden. Mit diesem System kann die Holzfeuchte bei einem Holzbauteil von der Oberfläche bis zu ca. 10 cm in die Tiefe gemessen werden. Das hängt von der Länge der Schrauben sowie der Isolierung des Schraubenschaftes ab. D.h. wenn in 5 cm Tiefe des Holzes die Feuchte gemessen werden soll, werden 4 cm vom Schrauben-Schaft isoliert, dadurch wird die Holzfeuchte nur im Bereich der Schraubenspitze (ca. 1 cm) gemessen.

Die Elektroden für die Holzfeuchtemessung wurden am Flachdach an der Nord- und Südseite der Dachfläche bei den statisch benötigten Überzügen für den Vordachbereich unter der ersten Abdichtungsebene (Dampfsperre) eingebaut. Die Holzfeuchte in den Überzügen wird an der Oberfläche und in einer Holztiefe von ca. 40 mm gemessen. Die Messpunkte wurden so gewählt, dass die Holzfeuchte am Vordach und über dem Wohnraum überwacht werden kann. Damit sollen für zukünftige Holzbauten wichtige Erkenntnisse über das Feuchteverhalten von Verstärkungen und Aufdopplungen in der Dämmebene gewonnen werden. Das Wissen um die Materialfeuchte bei Überzügen im Warmdach, wird als besonders wichtig erachtet, da im Vergleich zur übrigen Dachfläche nur eine geringe Dämmstärke als Überdeckung vorhanden ist. Das bedeutet, dass an der Oberfläche der Holzverstärkungen die Temperatur bei niedrigen Außentemperaturen unter den Taupunktbereich absinkt, es zum Kondensatausfall in der Tragstruktur kommt und diese auf Dauer schädigt. Am Flachdach wurden 16 Messpunkte (acht auf der Südseite und acht auf der Nordseite) für die Holzfeuchtemessung und zwei Temperaturfühler im Holz eingebaut.

Bei dem System 2 den Flächensensoren von der Firma Optidry werden ca. 5 cm breite Gewebestreifen die zwei Nirosta Drähte beinhalten eingebaut. Über den Widerstand zwischen den zwei Drähten wird der Feuchtegehalt ermittelt. Der Abstand zwischen den Bandstreifen beträgt je nach Funktionsfläche (Dach, Terrasse, Bad, etc.) ca. 30 bis 100 cm. Die Anordnung der Bandsensoren wird in einer Art Schneckenform ausgeführt. Die zu überwachenden Bereiche werden in mehrere Felder unterteilt, um bei einem Feuchteintritt die Schadstelle durch die Begrenzung der Messkreise schneller orten zu können. Die Größe eines Feldes (Schneckenform) beträgt im Mittel ca. 5,0 x 5,0 Meter. Die Flächensensoren wurden am Flachdach, im 1. Obergeschoss auf der Terrasse und im Erdgeschoss eingebaut. Am Flachdach erfolgte der Einbau der Bandsensoren zuerst auf der Massivholzdecke und in weiterer Folge auf der aufgebrachten (Kunststoffbahn) Dampfsperre. Im 1. Obergeschoss auf der Terrasse wurden die Bandsensoren auf der Bitumenabdeckung montiert. Bei der Terrasse im Erdgeschoss gibt es zwei Materialkomponenten. Im südlichen Bereich sind die Deckenelemente in Massivholz und im nördlichen und westlichen Bereich des Gebäudes in Stahlbeton ausgeführt. Dies ermöglicht einen Überblick über das Feuchteverhalten der beiden Materialien zu erhalten. Im Innenbereich bei den sechs Sanitärbereichen werden ebenfalls Flächensensoren eingebaut. Gesamt (Innen- und Außen) wurden bei diesem Projekt 23 Messkreise der Bandsensoren eingebaut.

Als drittes System werden zwei Punktsensoren von der Firma RPM Gebäude Monitoring eingebaut. Ein Punktsensor wird in die Dämmebene des Flachdachs und der zweite Punktsensor in die Dämmebene des eingeschossigen Bauteils mit der begrünter Dachfläche eingebaut. Das System misst die Feuchtigkeit und Temperatur in der Dämmebene und auch auf der Abdichtungsebene der Rohdecke. Dieses System wurde zusätzlich zu den Flächensensoren eingebaut, um feststellen zu können, inwieweit die Ergebnisse vergleichbar sind bzw. welches System effizienter in der Erkennung und Auswertung der Feuchtigkeit ist.

Vor dem Einbau der Feuchte-Monitoring-Systeme wurde ein detaillierter Verlegeplan für alle drei Messsysteme erstellt und mit dem Projektpartner vor Ort besprochen und auf Vollständigkeit überprüft. Alle drei Messsysteme sind mit einem Fernüberwachungssystem ausgestattet, sodass das Überwachen und Auslesung der Daten jederzeit möglich ist.

3.1. Mess-Sensorik am Flachdach

In der Abbildung 5 wird der Grundriss vom Flachdach mit den Anordnungen der Messkreise und Messpunkte gezeigt. Um einen besseren Überblick zu geben werden die zusammengehörigen Systeme und Messbereiche einzeln in den Grundrissen dargestellt.

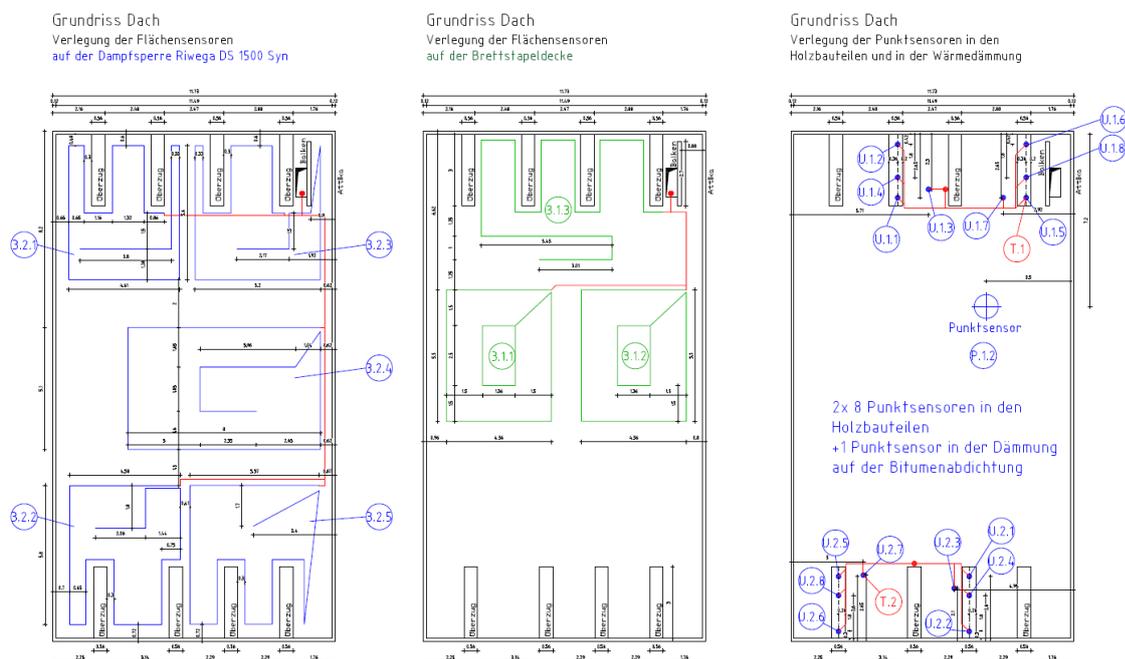


Abbildung 5: Bandsensoren auf der Abdichtungsebene (linker GR), auf der Massivholzdecke (GR Mitte), Punktsensor und Messpunkte der Holzfeuchte- und Temperaturmessung (rechter GR)

Im rechten Grundriss sind die Messpunkte für die Holzfeuchtemessung ersichtlich, von denen je acht Messstellen (Bezeichnung U) an der Süd- und der Nordseite des Daches montiert wurden. Die zwei verwendeten Temperaturfühler sind mit der Bezeichnung T in roter Farbe dargestellt. Weiter ist auf diesem Grundriss auch der Punktsensor eingezeichnet. Die Positionierung wurde etwas außerhalb der Mitte der Dachfläche, im Nordostbereich festgelegt. Die Gründe liegen darin, dass das Dach nach Osten geneigt ist (Wasserableitung) und im Nordosten ein Installationsschacht das Dach durchdringt. Somit ist dieser Bereich als am gefährdetsten in Bezug auf mögliche Undichtheiten zu betrachten.

Am Grundriss in der Mitte sind drei Messkreise mit Bandsensoren abgebildet die direkt auf der Massivholzdecke des Daches montiert wurden. Die Anordnung wurde so gewählt, da im mittleren Bereich der Dachfläche die Durchbiegung am größten ist, d.h. bei Wassereintritt es in diesem Bereich vermutlich am schnellsten zur Durchfeuchtung der Oberfläche kommt. Der Messkreis an der Nordseite wurde in einem geringen Abstand zu den statisch benötigten Holzüberzügen verlegt. Die Überzüge haben auf der Fläche oben nur eine geringe Überdämmung, d.h. die Gefahr des Kondensatausfall bei niedrigen Außentemperaturen unterhalb der Abdichtung ist sehr groß. Daher soll überwacht werden, ob dies auch einen Feuchteinfluss auf die Oberfläche der mit den Überzügen verschraubten Tragstruktur (Brettsperrholz) hat. Im linken Grundriss sind fünf Messkreise mit Bandsensoren auf der ersten Abdichtungsebene (Dampfsperre) dargestellt. Die Anordnung wurde, einerseits aufgrund der Dachneigung (Richtung Osten) und andererseits um möglichst die gesamte Dachfläche feuchtetechnisch zu überwachen, festgelegt.

3.2. Mess-Sensorik 1. Obergeschoss

Im 1. Obergeschoss wurde auf den Terrassen und in den Sanitärbereichen Bandsensoren eingebaut. Drei Messkreise sind auf der Terrasse (Westseite) über einen darunter befindlichen Wohnraum auf einer Bitumenabdichtung aufgebracht. Weitere Messkreise (grün dargestellt) sind in den drei Sanitärräumen direkt auf die Rohdecke aus Brettsperrholz installiert worden. Bei dem Messkreis an der Nordseite, auch auf einer Bitumenabdichtung befestigt, wird unterhalb als Durchgang und überdachte Terrasse verwendet. Somit sind die Temperaturunterschiede im Bauteil deutlich geringer und durch die nordseitige Lage ist

in den Wintermonaten mit wenig Sonneneinstrahlung zu erwarten. Das Ziel auf dieser Geschossebene ist ebenfalls eine gesamtheitliche Feuchte- und Dichtheitsüberwachung. Weiter soll die Überwachung auch Informationen über den Einfluss der verschiedenen thermischen Situationen geben.

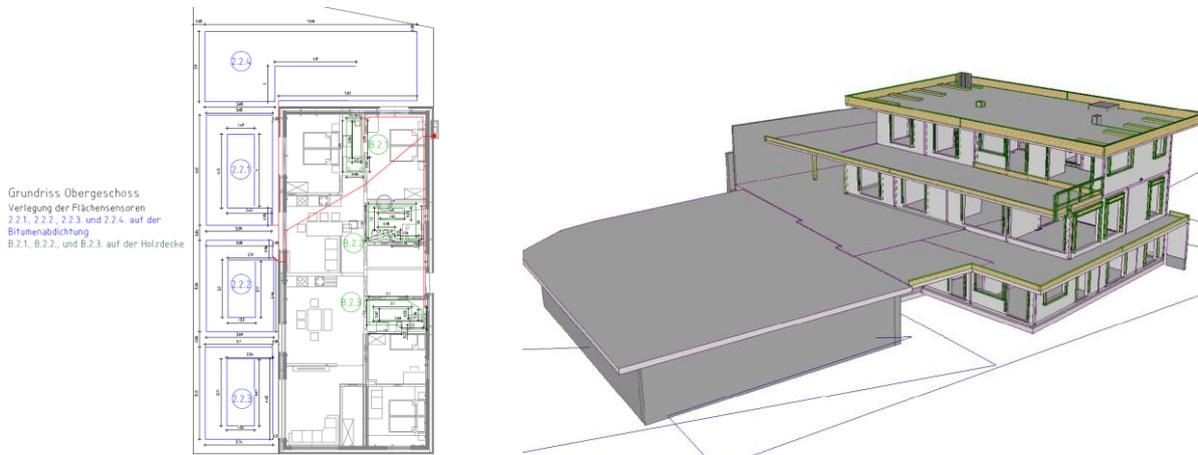


Abbildung 6: Obergeschoss - Bandsensoren auf Bitumen (blau) – Sanitärbereiche Sensoren auf Massivholz (grün)

3.3. Mess-Sensorik Erdgeschoss

Im Erdgeschoss wurden die drei Sanitärbereiche ebenfalls mit Bandsensoren ausgestattet. Die Sensoren wurden an den zwei nordseitig gelegen Bädern auf einer Stahlbetondecke und bei dem südlich gelegenen Bad auf einer Brettsperrholzdecke montiert. Die Bandsensoren im Außenbereich wurden so angeordnet, dass sie wiederum eine flächendeckende Überwachung des Hauptgebäudes ermöglichen. Die Messkreise 1.2.2, 1.2.3 und 1.2.4 sind auf der ersten Abdichtungsebene aus Bitumen montiert. Die Messkreise 1.2.2 und 1.2.4 befindet sich über einem überdachten Eingang und auf einen auskragenden Balkon. Bei dem Messkreis 1.2.3 sind die Bandsensoren teilweise über dem Wohnbereich und teilweise im auskragenden Bereich der Geschosdecke verlegt. Die Rohdecke bei diesen drei Messkreisen ist in Brettsperrholzbauweise ausgeführt. Der Messkreis 1.1.1 ist direkt auf die Stahlbetondecke verlegt worden. Unterhalb dieses Messkreises befindet sich die Tiefgarage. Der Messkreis 1.2.1 wurde auf dem begründeten eingeschossigen Bestandsgebäude auf einer Kunststoffbahn (Dampfsperre) verlegt. In der ursprünglichen Nutzung befand sich unterhalb im Innenbereich ein Schwimmbad. Zum Zeitpunkt der Festlegung der Messsensoren war noch nicht entschieden, ob das Schwimmbad wieder in Betrieb genommen wird oder ob er als Fitnessbereich genutzt wird. Neben dem Flachdach wurde ein weiterer Punktsensor an der Westseite des neu errichteten Warmdaches auf der Westseite des eingeschossigen Bestandsgebäudes eingebaut. Die Position wurde gewählt, da dieser Bereich der begründeten Fläche durch die Geländeform im Winter meist verschattet ist.

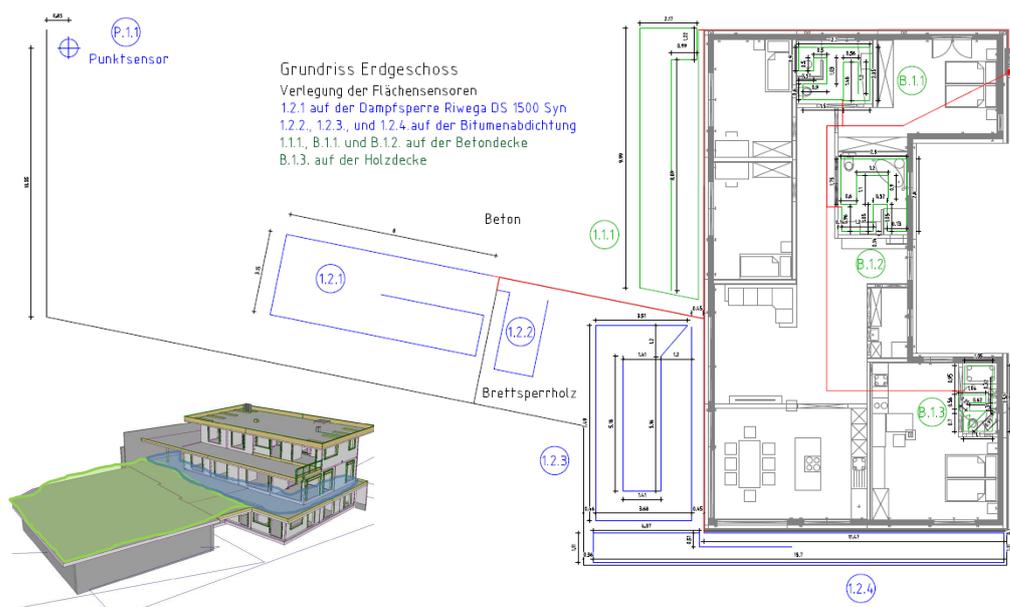


Abbildung 7: Erdgeschoss – Bandsensoren auf Abdichtungsbahnen (blau) – auf den Rohdecken (Stahlbeton und Brettsperrholz; grün) Punktensensor – eingeschossiges Bestandsgebäude

4. Erkenntnisse aus dem Feuchte- und Dichte Monitoring

Die Diagramme und Messergebnisse zeigen einen Überblick über den bisherigen Messverlauf. Dazu ist zu erwähnen, dass aufgrund der in den Untersuchungszeitraum fallenden Lockdowns, sich der Baufortschritt und daher die Inbetriebnahme der Messsysteme und das bewohnen des Gebäudes um ca. ein Jahr nach hinten verschoben hat. D.h. die vollständige Inbetriebnahme aller Messsysteme erfolgte erst im April 2021. Vom September 2021 bis Jänner 2022 gab es zum Teil keine Datenübertragung da die Internetverbindung am Standort des Gebäudes zu schwach war und die Verlegung und der Anschluss der Glasfaserkabel sich um mehrere Monate verzögerte. Daher gibt es bis dato noch keine durchgängigen Messresultate über den gesamten Jahresverlauf. Zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichtes ist nur die Wohnung im Erdgeschoss bewohnt, die im Herbst 2021 bezogen wurde. Somit sind noch keine aussagekräftigen Ergebnisse bzgl. des Feuchteverhaltens in den Sanitärbereichen, auf dem Dach und den Terrassen vorhanden. D.h. inwieweit neben der reinen Dichtheitsüberwachung der Abdichtungsbahnen auch das Bewohnen und das Nutzen der Räumlichkeiten durch unterschiedliche Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit, Auswirkung auf das Feuchteverhalten in den überwachten Bereichen hat, kann noch nicht beantwortet werden.

Die bisherigen Aufzeichnungen zeigen deutliche Unterschiede des Feuchteverhaltens zwischen den Sommer und Winter. In den folgenden Diagrammen wird ein gesamtheitlicher Überblick über den vorhandenen Messzeitraum gegeben und auf einzelnen Besonderheiten hingewiesen.

4.1. Materialfeuchtemessung

Das Messdiagramm von der Südseite des Flachdaches (Abb. 8) zeigt den Holzfeuchteverlauf der acht Messpunkte (U 2.1 – U 2.8) sowie den Temperaturverlauf im Holz (T 2.1) und im Innenbereich vom 1. OG (T 2.3) in dem sich der Datenlogger befindet. An der Y-Achse des Diagramms ist die Temperatur und Holzfeuchte und an der X-Achse der Zeitverlauf angegeben. Alle weiteren Diagramme sind gleich aufgebaut. Das Messsystem wurde am 08.04.2021 in Betrieb genommen. Die Messdaten im Diagramm zeigen den Verlauf der Holzfeuchte von der Inbetriebnahme bis 20. März 2022. Der Verlauf der Holzfeuchte liegt im Normbereich zwischen ca.8% und 15%. Die Abweichungen bei den Holzfeuchten sind, durch die verschiedenen Tiefen der eingebrachten Messelektroden erklärbar. Bei dem Messpunkt U 2.6 ist vom Mai 2021 bis Anfang Oktober 2021 ein stetiger Anstieg der Holzfeuchte bis 15% zu erkennen, die in den Wintermonaten wieder absinkt. Bei niedrigen

Temperaturen fällt auf, dass es bei dem Messsystem immer wieder zu Störungen bei der Datenspeicherung kommt, wie bei Messpunkt U 2.7 von ca. Mitte Dezember 2021 bis ca. Mitte Februar 2022 sichtbar ist. Der Messwert hat eine hohe Schwankungsbreite. Auffällig ist auch, dass in den Wintermonaten die Temperatur im Brettsperrholz trotz der Außen-dämmung auf unter 10°C, d.h. in den Taupunktbereich, absinkt.

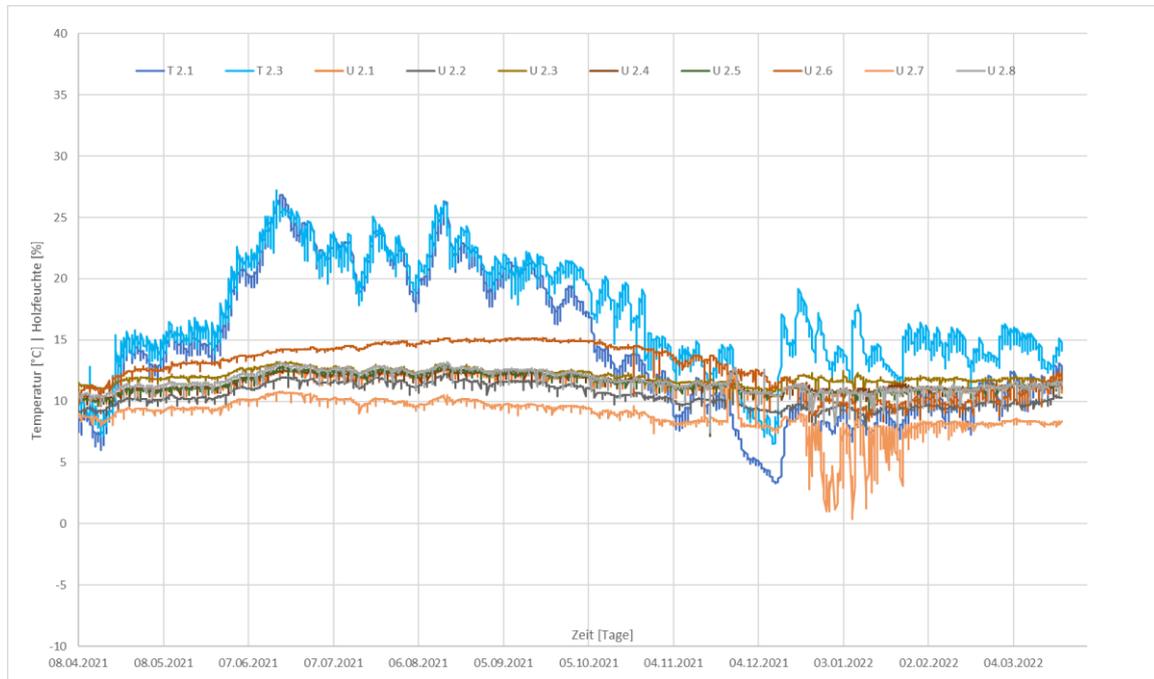


Abbildung 8: Flachdach (Südseite) – Holzfeuchtemessung U 2.1 – U 2.8; Temperatur im Brettsperrholz - T 2.1; Temperatur Innenraum 1. OG – T 2.3;

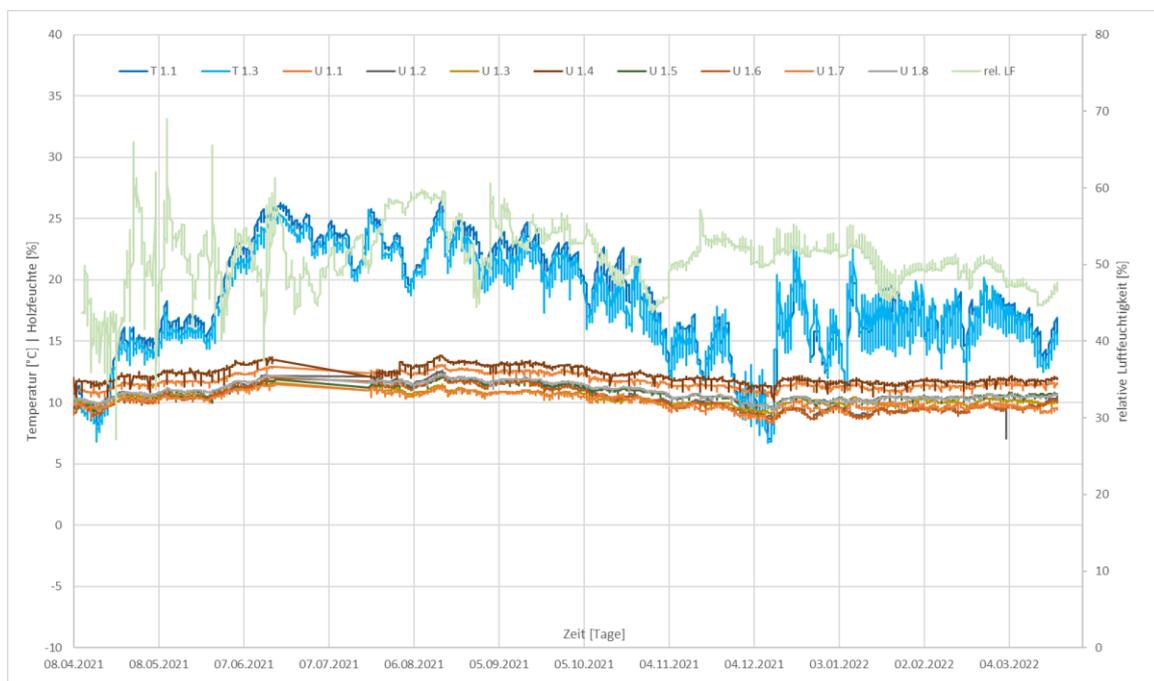


Abbildung 9: Flachdach (Nordseite) – Holzfeuchtemessung U 1.1 – U 1.8; Temperatur im Brettsperrholz - T 1.1; Temperatur und relative Luftfeuchte im Innenraum 1. OG – T 1.3 und rel. LF;

Der Messzeitraum an der Nordseite des Flachdaches ist derselbe wie an der Südseite beschrieben (Abb.9). Der Holzfeuchteverlauf ist über dem gesamten Messzeitraum sehr gleichmäßig und unauffällig. Bei dieser Messstation wird im Vergleich zur Südseite zusätzlich die relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum des Obergeschosses mitgemessen. Im Zeitraum vom 16.06.2021 bis 15.08.2021 gab es eine Unterbrechung der Messaufzeichnungen, da bei den Bauarbeiten bei diesem Messgerät unabsichtlich ein Kabel gelöst wurde.

4.2. Flächensensoren



Abbildung 10: Flachdach- Bandsensoren 3.1.1 – 3.1.3 auf der Brettsperrholzdecke; Bandsensoren 3.2.1 – 3.2.5 auf der ersten Abdichtungsebene (Dampfsperre – Kunststoffbahn)

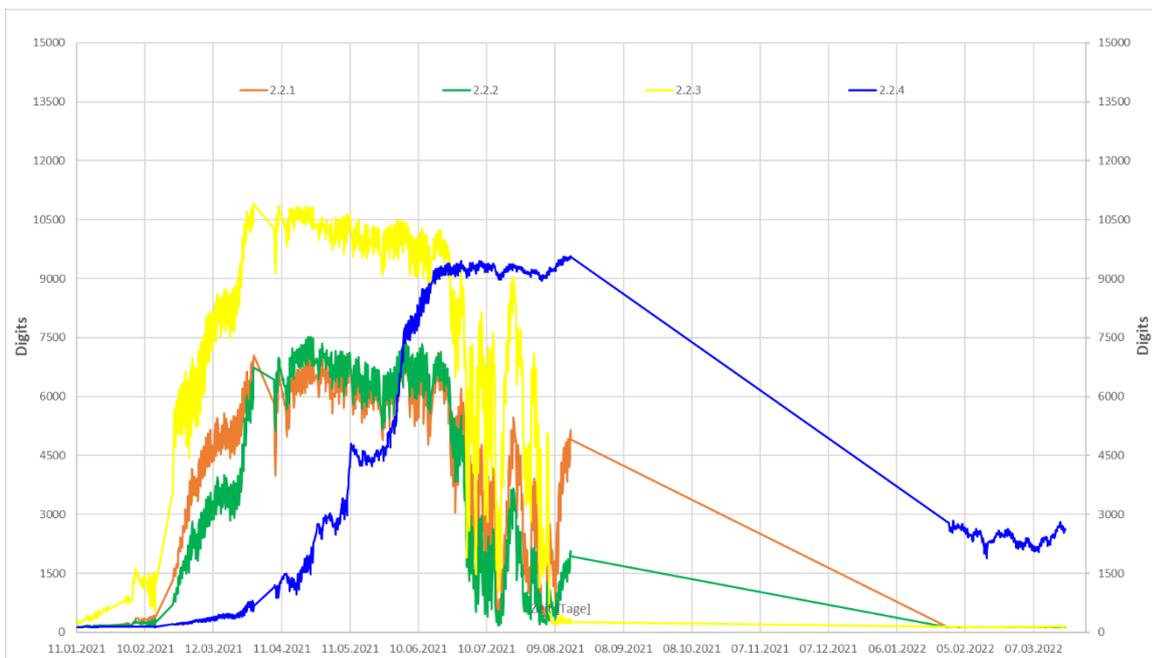


Abbildung 11: 1. Obergeschoss - Bandsensoren 2.2.1 – 2.2.4 auf Bitumenbahnen montiert



Abbildung 12: Erdgeschoss - Bandsensoren 1.1.1 auf der Stahlbetondecke montiert; 1.2.1 – 1.2.3 auf Bitumenbahnen montiert; 1.2.4 auf einer Kunststoffbahn – Dampfsperre montiert

Die Flächensensoren auf dem Flachdach, im 1. OG und im Erdgeschoss konnten aufgrund des Baufortschritts nicht alle gleichzeitig eingebaut und in Betrieb genommen werden. Dies erklärt, dass bei einigen Messkreisen die Grundspannung bei 120 Digits liegt. Bei der Inbetriebnahme ist dann zum Teil ein steiler Anstieg, wie am Messkreis 1.2.1 in der Abb. 12, der Feuchte zu erkennen. Bei jedem der drei Diagrammen (Abb. 10-12) ist erkennbar, dass es bei jeder überwachten Geschossebene ein bis mehrere Messkreise gibt, bei denen bereits von Beginn an ein hoher Feuchtegehalt auf der Abdichtungsebene vorhanden ist. Der Grund liegt darin, dass es beim Einbau der Dachaufbauten durch Regen und Schneefall zu Wassereintritten kam und daher teilweise der festgelegte Grenzbereich von 11500 Digits überschritten wurde. Weiter ist bei den Diagrammen zu erwähnen, dass es von Mitte September 2021 bis Ende Jänner 2022 keine Netzwerkverbindung gab und daher keine Onlinenabfrage zur Verfügung stand. Es zeigt sich aber, dass der Feuchtegehalt in den Bauteilen über den Winter deutlich geringer wurde.

4.3. Punktsensoren



Abbildung 13: Punktsensor 1.2. auf dem Flachdach

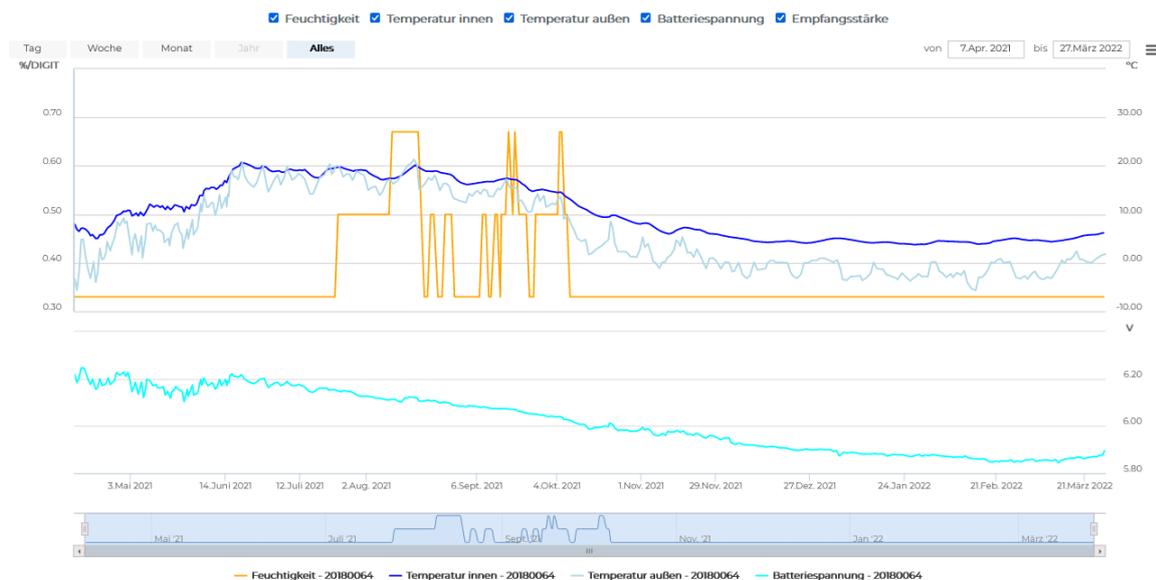


Abbildung 14: Punktsensor 1.1 auf der begründeten Dachfläche des eingeschossigen Bestandsgebäudes

Der Punktsensor am Flachdach 1.2 (Abb. 13) ist in der Nähe des Messkreises 3.2.3 eingebaut. Im Bereich dieser Messkreises kam es beim Abdichten der obersten Abdichtungsebene zu einem Feuchteintritt. Der erhöhte Feuchtegehalt wird auch vom Punktsensor angezeigt. Mit Ende Jänner 2022 ist jedoch ein sehr schneller Feuchteabfall d.h. eine Trocknung im Aufbau ersichtlich. Wie es zu dieser doch sehr schnellen Austrocknung kommen kann, muss noch genauer eruiert werden. Beim Punktsensor 1.1 sind in den ersten Monaten keine Feuchteänderungen bzw. Feuchteauffälligkeiten zu erkennen. Von Mitte Juli 2022 bis Mitte Oktober 2022 kommt es allerdings zu nicht nachvollziehbaren Feuchteauschlägen. Auch hier muss noch untersucht werden, ob dies am Messgerät liegt bzw. was sonst Ursache dafür sein kann. Ansonsten sind keine weiteren Auffälligkeiten im Aufbau zu erkennen.

5. Zusammenfassung

Nach dem bisherigen Untersuchungsstand kann folgendes festgestellt werden:

- Der Aufwand für die Planung, dem Einbau und die Inbetriebnahme der verwendeten Messsysteme war einfach und gut händelbar.
- Kurz nach Inbetriebnahme der Flächensensoren konnten Leckstellen in der Abdichtung durch erhöhte Feuchte eruiert werden. Durch das schnelle Abdichten wurden zukünftige Feuchteschäden verhindert.
- Die Interpretation der Messwerte ist aufgrund der unterschiedlichen Skalierung bei den Messgeräten etwas schwierig. Dazu kommt, dass sich bei der Verwendung auf verschiedenen Materialien auch die Messwerte (Bandsensoren) ändern.
- Bei einigen Messkreisen mit erhöhten Feuchtwerten in den Sommermonaten ist nicht klar nachvollziehbar, ab wann mit Trocknungsmaßnahmen begonnen werden soll.
- Von den fünf Wohneinheiten ist erst seit Herbst 2021 die Wohnung im Erdgeschoss bewohnt. Daher fehlen noch aussagekräftige Messwerte von den Sanitärbereichen sowie den Messkreisen auf dem Flachdach, die auf den Brettsperrholzelement verlegt wurden.
- Klarere Aussagen über die Messwerte und der Vergleich der Messwerte und Messsysteme können erst nach einer gesamten Jahresperiode gemacht werden und wenn das Gebäude gesamtheitlich bewohnt wird.

6. Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wird aus Mitteln der Provinz Südtirol für Beratungs- und Dienstleistungsinnovation und vom Holzbauunternehmen Ligna Construct finanziell unterstützt. Wir bedanken uns für die Bereitschaft zur Unterstützung dieses Projektes. Das ist für den Holzbau ein weiterer wichtiger Beitrag für die Qualität und Langlebigkeit von Holzbauten.

7. Literatur

- [1] IFB-Institut für Flachdach und Bauwerksabdichtung; Richtlinie: Dichtheits- und Feuchtemonitoring; Gebäudeassistenzsysteme innerhalb der Gebäudehülle in Bauteilen; Ausgabe 1/2018].
- [2] ÖNORM B 3691: Planung und Ausführung von Dachabdichtungen, Wien 2019
- [3] ÖNORM B 3692: Planung und Ausführung von Bauwerksabdichtungen, Wien 2014
- [4] <https://www.optidry.at/de/>; 25.03.2022
- [5] <https://www.scantronik.de/>; 25.03.2022
- [6] <https://www.gebaeudemonitoring.at/>; 25.03.2022

PCM-Kühldecken im Energy Efficiency Center – ein Praxisbericht

Dr. Helmut Weinländer
ZAE Bayern
Würzburg, Deutschland



PCM-Kühldecken im Energy Efficiency Center – ein Praxisbericht

1. Einführung

Weltweit wird in den kommenden Jahren ein erheblicher Anstieg des Energieverbrauchs im Gebäudebereich durch Kühlung erwartet [1]. Gründe hierfür sind neben dem Klimawandel vor allem das Bevölkerungswachstum sowie die in vielen Ländern teilweise rasant zunehmende wirtschaftliche Entwicklung. Um den hierdurch drohenden Anstieg der Treibhausgasemissionen und die Belastung der Stromnetze durch die hauptsächlich elektrisch betriebenen Kälteanlagen zu verringern oder idealerweise ganz zu vermeiden werden effiziente und netzdienliche Kühlstrategien benötigt.

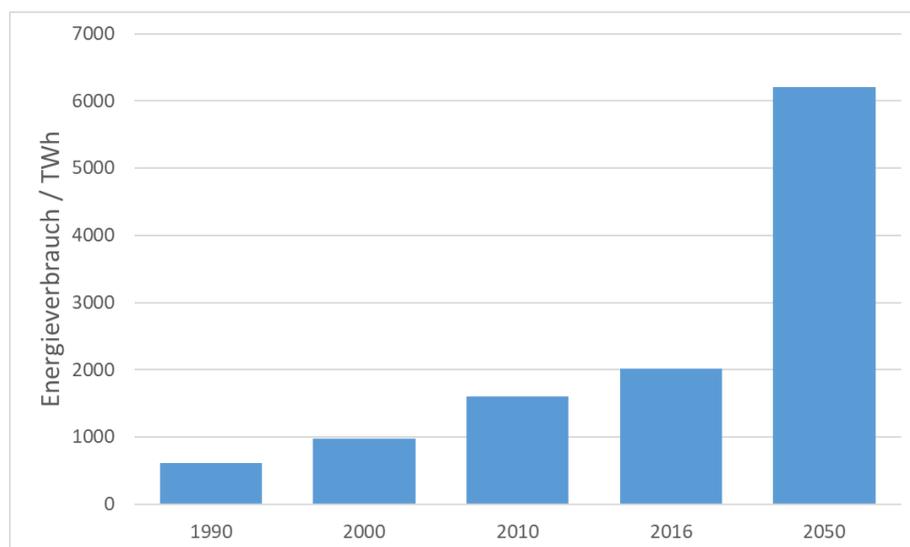


Abbildung 1: Weltweiter Energieverbrauch für Gebäudekühlung und Prognose für das Jahr 2050 nach [1].

Ein möglicher Lösungsansatz zur Realisierung von Spitzenlastverschiebung und Spitzenlastreduktion in der Gebäudekühlung ist die Integration thermischer Speicher in die Kühlsysteme. Im Energy Efficiency Center (EEC), dem Institutsgebäude des ZAE Bayern in Würzburg, wurden deshalb Kühldecken mit Phasenwechselmaterialien (PCM) in den Büroräumen installiert [2]. Praktische Erfahrungen mit solchen Systemen sind noch wenig vorhanden. PCM-Kühldecken werden derzeit kaum kommerziell angeboten und finden vor allem in Forschungs- und Demonstrationsprojekten Anwendung [3]. Im EEC sind die PCM-Kühldecken seit 2013 in Betrieb. Sie werden seit 2014 einem intensiven Monitoring unterzogen und die Regelstrategie zur möglichst energieeffizienten Nutzung des PCM wird kontinuierlich optimiert. Im vorliegenden Beitrag werden die bisherigen Praxiserfahrungen mit diesem innovativen Kühlsystem präsentiert.

2. Grundlagen und Systembeschreibung

2.1. Phasenwechselmaterialien (PCM)

Als PCM bezeichnet man Materialien, bei denen die Änderung des Aggregatzustandes (Phasenwechsel) zur Wärme- und Kältespeicherung genutzt wird. Während des Phasenwechsels – im Gebäudebereich wird üblicherweise der Phasenwechsel fest \leftrightarrow flüssig genutzt – können PCM große Mengen an Energie aufnehmen bzw. abgeben. Die Temperatur des PCM bleibt dabei nahezu konstant, man spricht deshalb von latenter Energiespeicherung. Die Nutzung dieser Methode zur Energiespeicherung ist nicht grundsätzlich neu. So wird der Phasenwechsel Wasser \leftrightarrow Eis bereits seit Jahrhunderten zur Kühlung genutzt. Allerdings sind mittlerweile immer mehr speziell für eine spezifische Anwendung entwickelte Phasen-

wechselmaterialien am Markt verfügbar, deren thermische Eigenschaften wie Schmelzenthalpie und Phasenwechseltemperatur gezielt optimiert wurden. Typische Stoffklassen, die im Gebäudebereich zum Einsatz kommen sind Paraffine und Salzhydrate.

In den PCM-Kühldecken am ZAE Bayern kommt das kommerzielle Salzhydrat «SP22A17» der Firma Rubitherm Technologies GmbH zum Einsatz, das seinen Phasenwechsel im Temperaturbereich von 22 °C - 24 °C aufweist. Das PCM wird in Metallbehältern – sogenannten CSM-Makroverkapselungen (CSM = compact storage module, s. Abbildung 2 links) – angeboten, mit denen beispielsweise eine Integration in Kühldecken möglich ist. Die gemessene Enthalpiekurve ist in Abbildung 2 rechts dargestellt. Diese beschreibt die temperaturabhängige massenspezifische Wärmespeicherfähigkeit des Materials. Viele PCM und insbesondere Salzhydrate weisen häufig eine Hysterese in den Enthalpiekurven für den Aufheiz- und Abkühlvorgang auf. Die zuvor im Phasenwechseltemperaturbereich, hier 22 °C bis 24 °C, aufgenommene Wärme wird dadurch teilweise erst bei niedrigeren Temperaturen mit der beginnenden Kristallisation des Materials wieder freigesetzt.

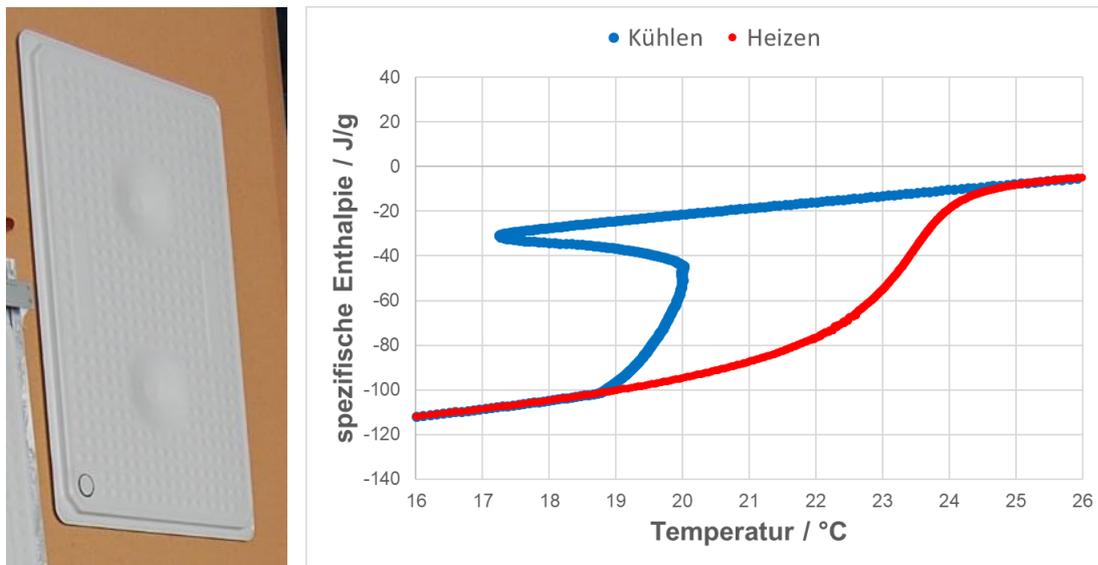


Abbildung 2: CSM-Makroverkapselung gefüllt mit SP22A17 (links) und spezifische Enthalpie eines solchen Moduls (rechts), gemessen mit der T-History-Methode am ZAE Bayern, für das Aufheizen (rote Kurve) und Abkühlen (blaue Kurve).

2.2. PCM-Kühldecken im EEC

Die PCM-Kühldecken wurden vom ZAE Bayern zusammen mit der Firma Lindner Group KG entwickelt und für die Installation im EEC als Prototypen bei diesem Unternehmen gefertigt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.

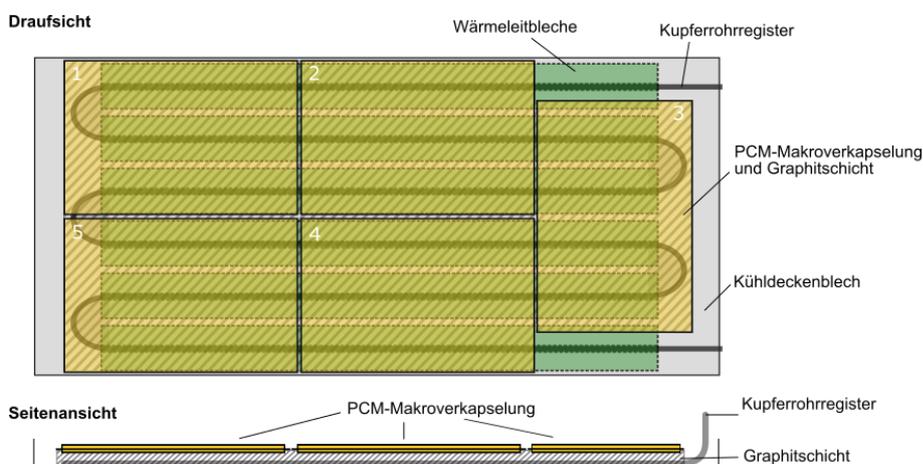


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der PCM-Kühldecken am ZAE Bayern.

Die PCM-gefüllten CSM-Makroverkapselungen werden auf herkömmliche Kühldeckenpaneele aufgelegt und zur besseren thermischen Ankopplung in eine Zwischenschicht aus expandiertem Graphit eingepresst. Pro Kühldeckenpaneel finden 5 CSM-Makroverkapselungen Platz, was einer PCM-Massenbelegung von rund 15 kg pro m² Kühldecke entspricht.

Die PCM-Kühldecken können anschließend wie herkömmliche Kühldecken installiert und angeschlossen werden. Am EEC wurden nahezu alle Büroräume sowie die Seminarräume mit den PCM-Kühldecken ausgerüstet, lediglich in einigen Referenzräumen wurden konventionelle Kühldecken ohne PCM installiert. Vier Büroräume auf der Südseite des EEC - drei davon mit PCM, einer ohne - wurden zusätzlich zur ohnehin zum Zweck der Gebäudeautomation vorhandenen Sensorik mit umfangreicher Messtechnik ausgerüstet.



Abbildung 4: PCM-Kühldecken in den Büroräumen des EEC, links im geöffneten, rechts im geschlossenen Zustand.

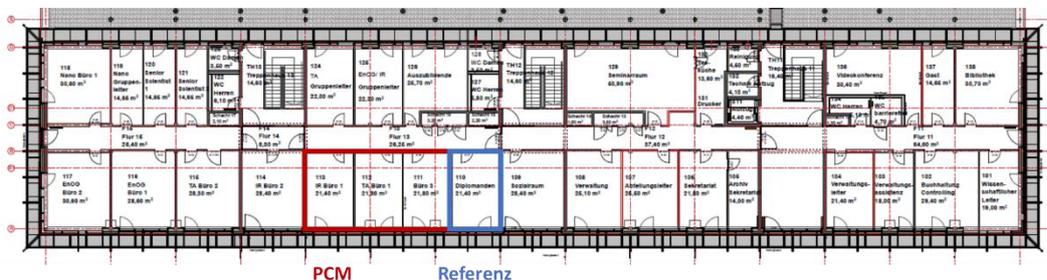


Abbildung 5: Außenansicht der Süd- und Ostfassade des EEC (oben) sowie Raumplan mit den südorientierten Messräumen (unten).

Die vier Messräume sind nahezu baugleich, besitzen eine Grundfläche von knapp 22 m² sowie jeweils 12 Kühldeckenpaneele mit einer Fläche von 10 m². Im Fall der PCM-Räume entspricht dies einer Gesamtmenge an PCM von 150 kg pro Raum mit einer Wärmespeicherkapazität von 4,3 kWh zwischen 19,5 °C und 26,5 °C. Die relativ geringe Kühldeckenfläche ist den baulichen Gegebenheiten in den Büroräumen geschuldet, da ein Teil der Decke mit transluzenten Tageslichtelementen sowie mit Akustikelementen belegt ist.

2.3. Regelstrategie

Die grundlegende Idee der PCM-Kühldecken ist, die Raumkühlung tagsüber rein passiv über das Aufschmelzen und die Temperaturpufferwirkung des PCM sicher zu stellen. Sobald die Raumtemperatur über die Phasenwechseltemperatur des PCM steigt, beginnt dieses zu schmelzen und entzieht dem Raum dabei Wärme. Bei idealem Wärmeaustausch zwischen Raumluft und PCM würde die Raumtemperatur dabei während des Aufschmelzvorganges nicht über die PCM-Temperatur ansteigen. Während des Phasenwechsels bleibt die PCM-Temperatur nahezu konstant und hält somit auch den Raum auf nahezu konstanter Temperatur. Erst wenn das PCM komplett aufgeschmolzen ist steigt die Temperatur weiter an. In der Realität muss ein Temperaturgradient zwischen Raumluft und PCM vorliegen, je größer dieser ist, desto größer ist die Kühlwirkung des PCM. In der Nacht wird das PCM dann über die Kühldecken aktiv regeneriert, es erstarrt und steht wieder für den nächsten Tag zur Verfügung. Die PCM-Menge ist dabei so ausgelegt, dass im Sommer die an einem Tag anfallende Wärmemenge nahezu komplett im PCM gespeichert werden kann.

Auf diese Weise wird eine Verschiebung der Kühllasten vom Tag in die Nacht sowie eine Minderung der Kühllastspitzen erreicht. Da nachts in der Regel kühlere Außentemperaturen vorliegen, kann die Kälteerzeugung zur Regeneration des PCM zusätzlich energetisch effizienter erfolgen als bei einer konventionellen Raumkühlung, bei der die Kälte zeitgleich, also tagsüber, erzeugt werden muss. Aufgrund der Konstruktion der PCM-Kühldecken können diese auch tagsüber aktiv betrieben werden, sollte die passive Kühlleistung des PCM nicht ausreichen, oder dieses bereits komplett aufgeschmolzen sein.

Zu Beginn des Gebäudebetriebes wurde für die PCM-Kühldecken eine Standardregelung implementiert, die um eine einfache zeitgesteuerte Regenerationsphase während der Nacht ergänzt wurde. Es zeigte sich, dass die Regelung der PCM-Kühldecken deren Energieeffizienz stark beeinflusst, so dass im Lauf der Messjahre verschiedene Optimierungen durchgeführt wurden. Dabei konnten zwei Haupteinflüsse identifiziert werden:

- die Kühlgrenztemperatur, also die Raumtemperatur, ab der die Kühldecken aktiv durchströmt werden und
- die Regenerationsstrategie, also wie das PCM nachts wieder in den festen Zustand überführt wird.

Bei der anfangs implementierten Standardregelung war die Kühlgrenztemperatur auf 24 °C eingestellt, d.h. immer wenn die Raumtemperatur 24 °C überschreitet, schalten die Kühldecken aktiv. Dieser Wert kann von den Nutzern über ein Bedienfeld im Raum um ± 3 K angepasst werden. Da der Phasenwechsel des verwendeten PCM hauptsächlich zwischen 22 °C und 24 °C stattfindet und eine gewisse Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und PCM zur Ausbildung einer Kühlwirkung benötigt wird, führte dies dazu, dass das passive Kühlpotential des PCM kaum genutzt wurde: die Kühldecken wurden aktiv, bevor das PCM aufschmelzen konnte. Deshalb wurde die Kühlgrenztemperatur in den PCM-Räumen auf 26 °C angehoben.

Bei der Regenerationsstrategie muss der Ladezustand des PCM berücksichtigt werden. Dieser gibt an, wie viel PCM bereits aufgeschmolzen ist und somit nicht mehr nennenswert zur Wärmespeicherung bzw. Kältebereitstellung beitragen kann. Eine zeitgesteuerte Regeneration mit festeingestellten Regenerationsdauern stellte sich als energetisch ineffizient heraus, da hier entweder in der Übergangszeit, in der das PCM tagsüber nur wenig aufschmilzt, unnötig lange, oder in der Sommerperiode zu kurz regeneriert wurde. Deshalb wurde eine bedarfsgeregelte PCM-Regeneration implementiert, bei der über die Temperatur-Enthalpie-Korrelation (s. Abbildung 2 rechts) der Ladezustand des PCM ermittelt und abhängig von diesem dann die Zieltemperatur des PCM während der aktiven nächtlichen Regeneration festgelegt wird. Ist diese erreicht, wird die Regeneration gestoppt. Um die

klimatischen Randbedingungen zu berücksichtigen wird das PCM nicht notwendigerweise vollständig regeneriert, sondern kann in einem teilaufgeschmolzenen Zustand verbleiben. Ist noch genügend Restkapazität im PCM für den nächsten Tag vorhanden wird gar nicht regeneriert. Die Regeneration findet generell nachts statt, um die dann kühleren Außentemperaturen zu nutzen. Zunächst wurde mit der Regeneration immer um 22 Uhr abends begonnen. Da zu diesen Zeiten aber oft noch relativ warme Außentemperaturen vorliegen startet die Regeneration seit 2019 erst um 1 Uhr nachts.

Mit diesen beiden Optimierungen werden die PCM-Kühldecken im EEC nun seit 2018 betrieben. Die Kühldecken ohne PCM im Referenzraum werden mit der ursprünglichen Standardregelung betrieben, d.h. die Kühlgrenztemperatur beträgt 24 °C und nachts erfolgt kein Regenerationsbetrieb.

3. Ergebnisse

Für die nachfolgenden Betrachtungen wurden die Daten der vier Messräume vom 14.7.-22.9.2018, vom 19.7.-8.9.2019 und vom 30.7.-15.10.2021 ausgewertet. Einen Überblick der Wetterbedingungen dieser drei Sommerperioden gibt Abbildung 6.

Die Außentemperaturen lagen in der Messperiode 2018 und 2019 deutlich höher als in 2021, so lag die mittlere Außentemperatur 2018 bei 20,2 °C, 2019 bei 19,6 °C und 2021 nur bei 16,4 °C. 2018 traten deutlich häufiger Außenlufttemperaturen im Bereich 26 bis 32 °C auf als 2019, 2019 weist dagegen etwas mehr sehr warme Zeiträume mit Temperaturen um die 34 °C auf als 2018. Während 2019 warme Zeiträume nur wenige Tage andauerten waren die Wärmeperioden 2018 länger mit bis zu 2 Wochen Dauer.

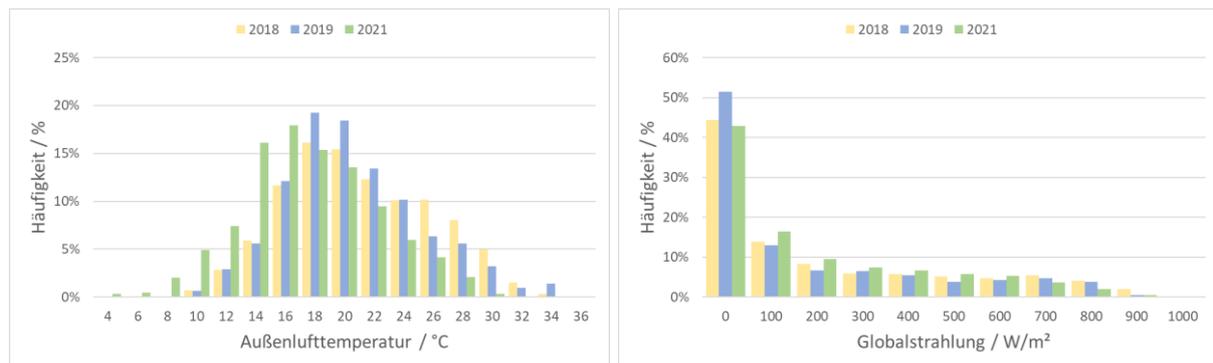


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der Stundenwerte von Außenlufttemperatur (links) und Globalstrahlung auf die Horizontale (rechts) für die Messzeiträume 2018, 2019 und 2021.

Bei der Solarstrahlung zeigt sich ein ähnliches Bild: 2021 traten hohe solare Einstrahlungen von 700 W/m² oder mehr deutlich seltener auf; sehr hohe solare Einstrahlungen von 900 W/m² traten fast nur 2018 auf. Der Tagesmittelwert der Globalstrahlung lag 2018 bei 4,5 kWh/(m²d), während er 2019 und 2021 mit 3,7 kWh/(m²d) bzw. 3,8 kWh/(m²d) niedriger lag.

3.1. Nutzereinfluss und thermischer Komfort

Da bei Realdaten der Nutzereinfluss eine große Rolle spielt, wird zuerst untersucht, wie sich die Kühlgrenztemperaturen der Messräume, die ja von den Nutzern individuell angepasst werden können, unterscheiden. Hierzu wurden die eingestellten Kühlgrenztemperaturen sowie die operativen Raumtemperaturen während der Anwesenheitszeit der Nutzer, die von der GLT über Präsenzdetectoren erfasst wird, ausgewertet. Die Mittelwerte der Größen sind in Abbildung 7 dargestellt.

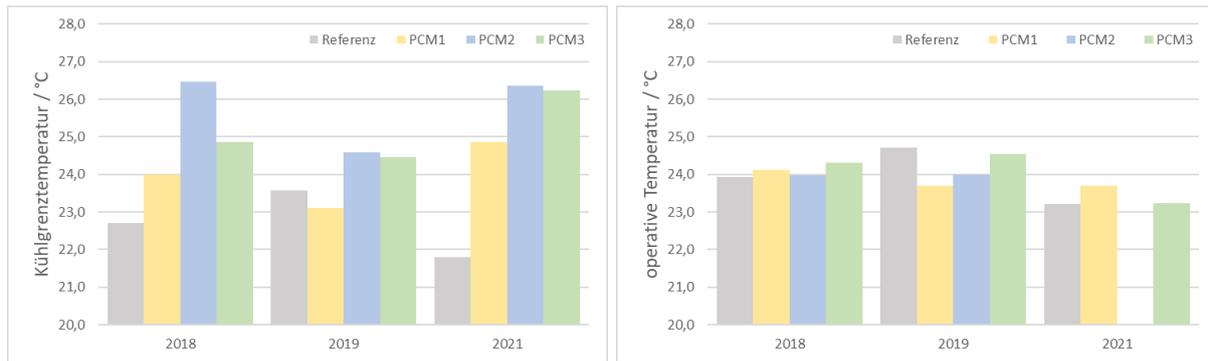


Abbildung 7: Mittlere Kühlgrenztemperaturen (links) und mittlere operative Raumtemperaturen (rechts) der vier Messräume während der drei Messperioden bei Anwesenheit der Nutzer. Aufgrund eines Sensorausfalls liegen für 2021 keine Messdaten der operativen Raumtemperatur im Raum PCM2 vor.

Bei den eingestellten Kühlgrenztemperaturen liegen die Werte des Referenzraumes meist tiefer als in den PCM-Räumen, vor allem 2021 gibt es hier eine große Differenz. Vergleicht man die tatsächlichen Kühlgrenztemperaturen mit den Sollwerten (24 °C im Referenzraum und 26 °C in den PCM-Räumen) zeigt sich, dass die Raumnutzer die Sollwerte häufig kühler einstellen. Trotz der teilweise sehr unterschiedlichen Kühlgrenztemperaturen liegen die mittleren operativen Raumtemperaturen in allen vier Räumen recht ähnlich. Insbesondere wirken sich die teilweise recht hohen Kühlgrenztemperaturen in den PCM-Räumen aufgrund der passiven Kühlwirkung der PCM-Kühldecken nicht nachteilig auf die operativen Raumtemperaturen aus, so dass die thermische Behaglichkeit in allen vier Messräumen vergleichbar ist.

3.2. Energieverbrauch

In den Messräumen wird der Kälteverbrauch der Kühldecken über Wärmemengenzähler erfasst. In Abbildung 8 ist dieser für die drei Messperioden dargestellt. Da die Messperioden unterschiedlich lang sind wurde jeweils der Tagesmittelwert bestimmt.

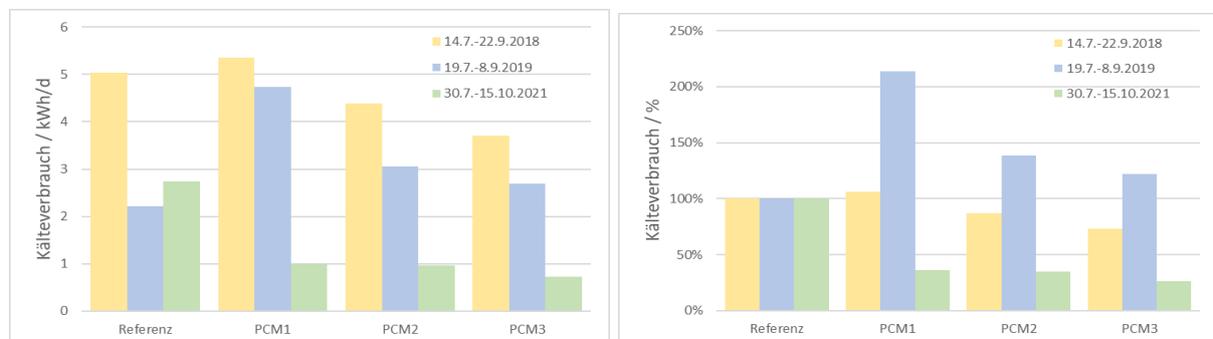


Abbildung 8: Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs in den vier Messräumen (links) für die Messzeiträume 2018, 2019 und 2021 sowie relativer Kälteverbrauch der PCM-Räume bezogen auf den Verbrauch des Referenzraumes (rechts).

Im Referenzraum ohne PCM lagen die Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs 2018 bei 5,0 kWh/d, 2019 bei 2,2 kWh/d und 2021 bei 2,7 kWh/d. Konform zu den Wetterdaten liegt der Kälteverbrauch hier 2018 am höchsten, der unerwartet geringe Wert für 2019 sowie der relativ hohe Wert für 2021 lassen sich durch die mittlere Kühlgrenztemperatur erklären, die im Referenzraum 2019 mit 23,6 °C deutlich höher eingestellt war als in den beiden anderen Messperioden, während sie 2021 mit 21,8 °C am tiefsten lag. Bei den drei PCM-Räumen liegen die Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs konform zu den Wetterdaten, d.h. die Werte sind 2018 am höchsten, gefolgt von 2019 und liegen 2021 am tiefsten.

Vergleicht man die Verbrauchswerte der PCM-Räume mit dem Referenzraum, ergeben sich für die einzelnen Messperioden generelle Unterschiede. 2018 liegt der Kälteverbrauch in Raum PCM1 etwas höher als im Referenzraum, während er für die beiden anderen PCM-Räume niedriger liegt. Ursache hierfür ist die niedrige Kühlgrenztemperatur in Raum PCM1, die im Mittel bei 24,0 °C lag, so dass die passive Kühlwirkung des PCM wenig genutzt

wurde. 2019 liegen die Verbräuche der PCM-Räume immer über den Werten des Referenzraumes. Während dieser Messperiode lagen die Kühlgrenztemperaturen in allen PCM-Räumen relativ niedrig. In Raum PCM1 lag sie im Mittel bei 23,1 °C und damit sogar niedriger als im Referenzraum. 2021 lagen die Kühlgrenztemperaturen der PCM-Räume dann deutlich höher, was den signifikant geringeren Kälteverbrauch im Vergleich zum Referenzraum erklärt. Trotzdem war die operative Raumtemperatur in Raum PCM1 nur minimal höher und die in Raum PCM3 nahezu identisch mit der im Referenzraum (s. Abbildung 7 rechts). In Raum PCM2 war 2021 der operative Temperatursensor ausgefallen, so dass keine Messwerte vorliegen. Eine Auswertung der mittleren Raumtemperaturen zeigte hier keine Unterschiede zwischen Raum PCM2 und dem Referenzraum.

Summiert man die Verbrauchsdaten aller drei Messperioden und mittelt zusätzlich über die drei PCM-Räume ergibt sich ein Kälteverbrauch von 3,4 kWh/d für den Referenzraum und von 2,8 kWh/d für die PCM-Räume (s. Abbildung 9). Man erhält somit eine mittlere Energieeinsparung durch die PCM-Kühldecken von 17 %.

Wie erwähnt ist bei gezeigter Analyse der Nutzereinfluss enthalten, was einen direkten Vergleich erschwert. Aus diesem Grund wurden zusätzlich spezielle Messungen an drei Wochenenden ohne Nutzereinfluss bei identischen und definierten Randbedingungen durchgeführt. Hierzu wurden die Räume möglichst thermisch von der Umgebung abgekoppelt – Jalousien geschlossen, Lüftung aus – und interne Lasten definiert über Kühllastsimulatoren (elektrische Heizer) eingebracht. Der Regelbetrieb erfolgte wie gehabt mit einer Kühlgrenztemperatur im Referenzraum von 24 °C und in den PCM-Räumen von 26 °C. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt.

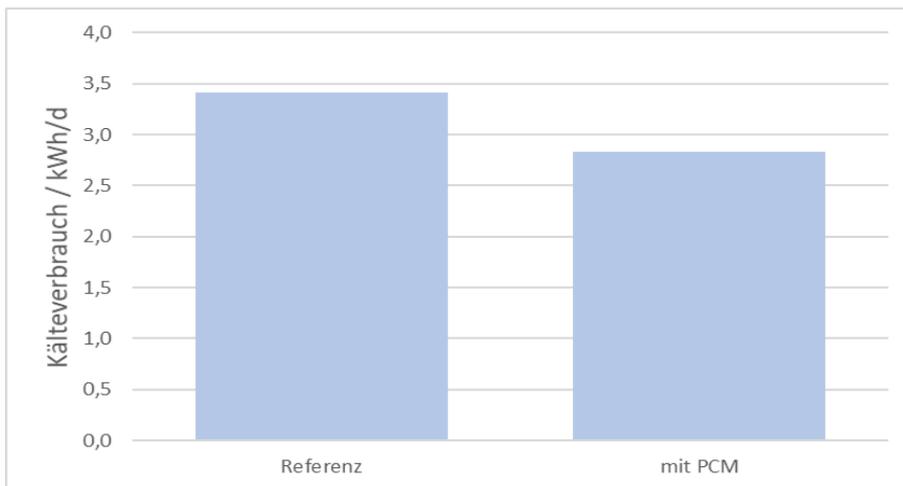


Abbildung 9: Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs für den Referenzraum sowie über alle drei PCM-Räume gemittelt für die gesamten Messperioden 2018, 2019 und 2021 mit Nutzereinfluss unter Realbedingungen.

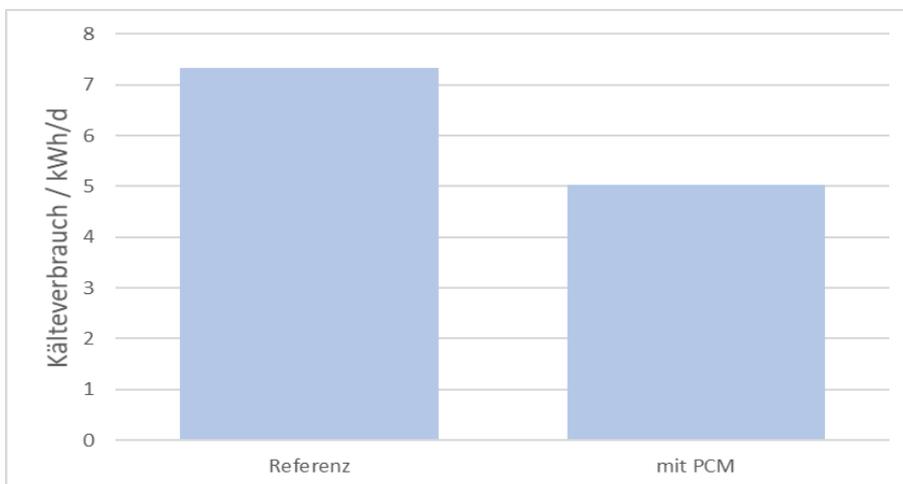


Abbildung 10: Tagesmittelwerte des Kälteverbrauchs für den Referenzraum sowie über die PCM-Räume gemittelt für drei Messwochenenden im Juli und August 2018 ohne Nutzereinfluss unter definierten Bedingungen.

Die Ergebnisse der Messungen ohne Nutzereinfluss zeigen einen deutlich höheren Kälteverbrauch, was an der Höhe der künstlich eingebrachten internen Lasten liegt. Die Energieeinsparung der PCM-Kühldecken beträgt hier 31 %.

3.3. Kühllastverschiebung

Neben der Reduktion der Kältemengen im Raum sollen die PCM-Kühldecken auch die Kühllasten in die Nacht verschieben. Hierzu sind in Abbildung 11 die Volumenströme der Kühldecken der Messräume für die Messperiode 2018 aufgetragen. Im Referenzraum (oben links) sind die Kühldecken mit Ausnahme weniger Nächte während einer zweiwöchigen Hitzeperiode vom 23.7. bis 10.8. nur tagsüber aktiv. In den PCM-Räumen fällt der Kältebedarf aufgrund der stattfindenden aktiven PCM-Regeneration auch nachts an. Abhängig vom Raum und den eingestellten Kühlgrenztemperaturen können hierdurch mehr oder weniger Kühllasten vom Tag in die Nacht verschoben werden. In Raum PCM2 funktioniert dies extrem gut, hier lag die mittlere Kühlgrenztemperatur bei 26,5 °C, in den beiden anderen PCM-Räumen hat man tagsüber zeitweise noch signifikanten Kältebedarf, da die mittleren Kühlgrenztemperaturen hier deutlich tiefer lagen – 24,9 °C in Raum PCM3 und 24,0 °C in Raum PCM1.

2021 lagen die mittleren Kühlgrenztemperaturen in den PCM-Räumen näher an den Sollwerten – 24,9 °C in Raum PCM1, 26,4 °C in Raum PCM2 und 26,2 °C in Raum PCM3 – was sich vorteilhaft auf die Lastverschiebung auswirkt. In Raum PCM1 mit der niedrigsten Kühlgrenztemperatur treten tagsüber noch vereinzelt aktive Kühlperioden auf, in den beiden anderen PCM-Räumen können diese vollständig vermieden werden (s. Abbildung 12). Der Referenzraum wird dagegen tagsüber sehr intensiv aktiv gekühlt.

Wertet man alle drei Messperioden aus, so fallen im Referenzraum 88 % der Volumenströme tagsüber von 7 bis 18 Uhr an; bei den PCM-Räumen kann dies im Mittel auf 31 % gesenkt werden. Die Schwankungsbreite innerhalb der PCM-Räume ist dabei recht groß und reicht von 4 % in Raum PCM2 bis zu 56 % in Raum PCM1.

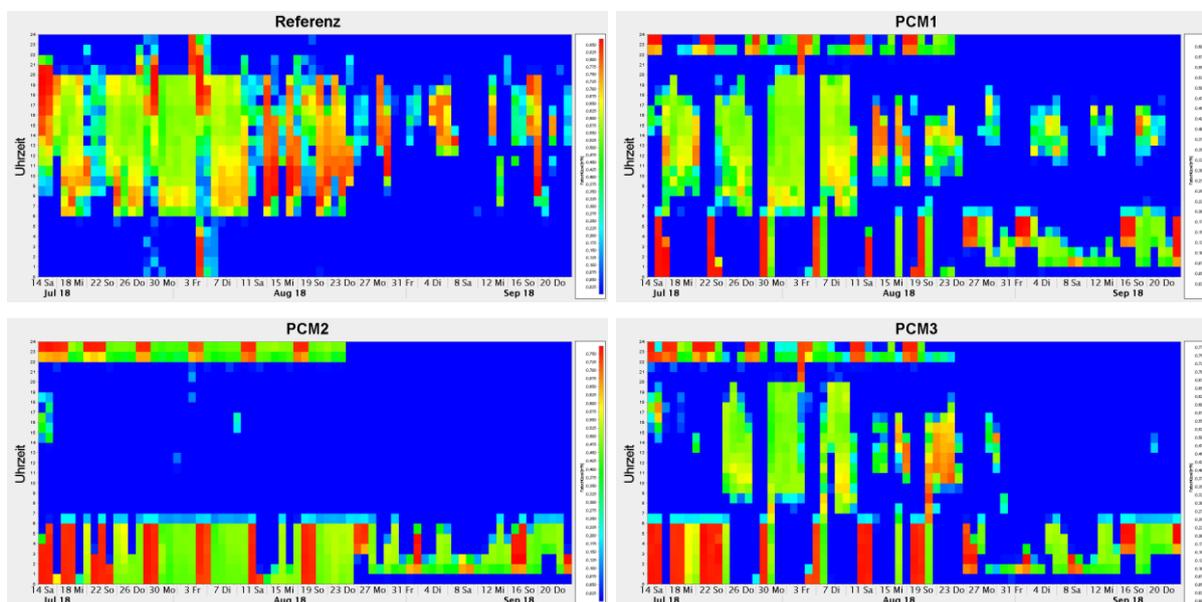


Abbildung 11: Carpetplots der Volumenströme V (dunkelblau: $V = 0$, rot: $V = \max$) der Kühldecken in den Messräumen für die Messperiode 2018 mit relativ niedrigen Kühlgrenztemperaturen in den Räumen PCM1 und PCM3.

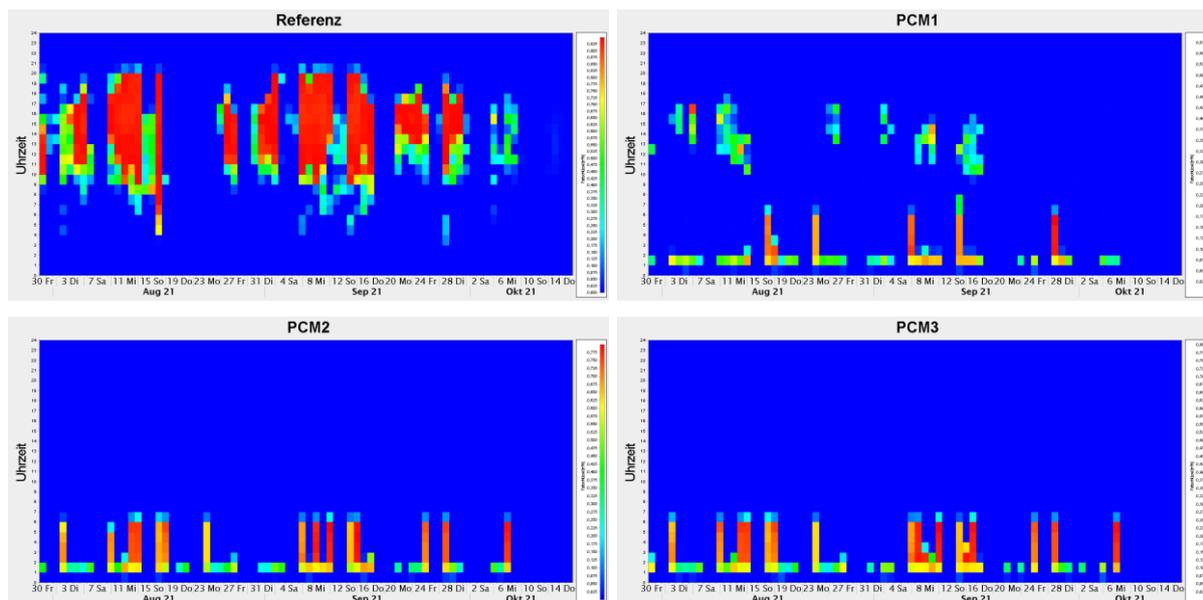


Abbildung 12: Carpetplots der Volumenströme V (dunkelblau: $V = 0$, rot: $V = \max$) der Kühldecken in den Messräumen für die Messperiode 2021 mit höheren Kühlgrenztemperaturen in den PCM-Räumen.

3.4. Optimierungspotenzial und Besonderheiten

Zusätzlich zur Reduktion der in die Räume einzubringenden Kältemenge erlauben die PCM-Kühldecken aufgrund der Lastverschiebung in die Nacht außerdem die Nutzung kühlerer Randbedingungen zur Kälteerzeugung. Hierdurch kann die Effizienz des gesamten Kältesystems weiter erhöht und Energie eingespart werden. Außerdem sind hierdurch auch regenerative Kältequellen erschließbar, die bei konventionellen Kühldecken nicht genutzt werden können. Anhand von Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, dass mit einem PCM-Kühldeckensystem mit Kompressionskältemaschine in warmem Klima (z.B. Athen) Energieeinsparungen von rund 20 % verglichen mit konventionellen Kühldecken möglich sind. Werden regenerative Kältequellen eingesetzt erhöht sich der Wert auch für moderatere Standorte (z.B. Würzburg) auf rund 40 %. Zusätzliches Energieeinsparpotenzial besteht in der Einbindung einer Wetterprognose in die Regenerationsregelung des PCM.

Generell besteht durch die gezielte Anpassung des PCM weiteres Optimierungspotenzial. Hier sind ein schmaler und auf die Zieltemperatur abgestimmter Schmelzbereich, eine geringe Unterkühlung, sowie eine möglichst hohe Enthalpie vorteilhaft.

Eine Besonderheit beim Einsatz von PCM-Kühldecken ist die Tatsache, dass der Phasenwechselbereich des PCM auf die gewünschte Raumtemperatur abgestimmt werden muss. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass nach Installation des PCM hiervon abweichende Raumtemperaturen unter Umständen nicht mehr energetisch sinnvoll eingeregelt werden können. Wird das PCM z.B. wie im EEC auf Sollraumtemperaturen von 24 – 26 °C ausgelegt, kann dies nachträglich nicht mehr bzw. nur durch Austausch des PCM für niedrigere Sollraumtemperaturen eingesetzt werden.

Dieser Umstand verdeutlicht die Verantwortung, die den Raumnutzern bei Verwendung eines solchen Systems zukommt; sie können die Energieeffizienz des Systems extrem beeinflussen. Werden z.B. zu tiefe und nicht mit dem Phasenwechselbereich des PCM kompatible Sollraumtemperaturen eingestellt, wird die passive Wirkungsweise der PCM-Kühldecken komplett ausgehebelt: die PCM-Kühldecken werden dann wie ein konventionelles Kühldeckensystem immer tagsüber aktiv betrieben.

Weiterhin ist anzumerken, dass die passive Kühlleistung des PCM immer geringer sein wird als bei einem aktiven Kühldeckenbetrieb. Bei einer aktiven Kühldecke kann die Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Vorlauftemperatur, z.B. 16 °C, voll genutzt werden. Da der Phasenwechselbereich des PCM aber zwischen Vorlauftemperatur und

gewünschter Raumtemperatur liegen muss – es muss ja über die Vorlauftemperatur regeneriert werden können – reduziert sich im passiven Kühlbetrieb die nutzbare Temperaturdifferenz und damit die Kühlleistung. Deshalb sollte bei der Planung von PCM-Kühldecken idealerweise eine größere Fläche als bei Kühldecken ohne PCM vorgesehen werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

PCM-Kühldecken stellen bei entsprechender Regelung eine sehr energieeffiziente Möglichkeit zur Raumkühlung dar. Monitoringdaten am EEC belegen ein Energieeinsparpotenzial der PCM-Kühldecken von 17 % im Vergleich zu einem konventionellen Kühldeckensystem bei gleicher thermischer Behaglichkeit. Zusätzlich kann die benötigte Kälte energieeffizienter erzeugt werden, da die Kühllasten durch das PCM vom Tag in die Nacht verschoben werden. Hierdurch erlauben PCM-Kühldecken die Nutzung regenerativer Verfahren zur Kälteerzeugung, was die Energieeffizienz solcher Systeme weiter erhöht und Energieeinsparungen von bis zu 40 % in moderaten Klimata prognostiziert.

Herausfordernd für PCM-Kühldeckensysteme ist die Festlegung der Sollraumtemperaturen auf einen relativ engen Temperaturbereich bei Installation des PCM sowie der hieraus entstehende extreme Einfluss der Raumnutzer auf die Energieeffizienz.

Am deutschen Markt sind momentan keine Anbieter kommerzieller Lösungen wasserdurchströmter PCM-Kühldecken bekannt. Eine gute Übersicht der Hersteller von PCM-Materialien und PCM-Komponenten bietet die RAL Gütegemeinschaft PCM e.V. [4]. Vor dem Hintergrund zunehmender Klimaerwärmung sowie der aus unterschiedlichen Perspektiven dringend notwendigen Steigerung der Energieeffizienz wäre es wünschenswert, dass diese Technologie eine verbreitete Umsetzung in die Praxis erfährt.

5. Danksagung

Die Arbeiten wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Projektes MoniResearch (FKZ: 03ET1245).

- [1] International Energy Agency: The Future of Cooling - Opportunities for energy-efficient air conditioning, OECD/IEA 2018
- [2] ZAE Bayern: Abschlussbericht zum Projekt «DEENIF»; doi: <https://doi.org/10.2314/GBV:834628120>
- [3] ZAE Bayern: Abschlussbericht zum Projekt «PCM-DEMO II: PCM in Demonstrationsanwendungen»; doi: <https://doi.org/10.2314/KXP:1691569607>
- [4] RAL Gütegemeinschaft PCM e.V.; www.pcm-ral.org

Prebound, Rebound, Performance Gap – Was stimmt nicht zwischen dem Energiebedarf und dem Energieverbrauch von Wohngebäuden?

Caroline Hoffmann
Coautor: Achim Geissler
Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau/
Fachhochschule Nordwestschweiz
Muttenz, Schweiz



Prebound, Rebound, Performance Gap – Was stimmt nicht zwischen dem Energiebedarf und dem Energieverbrauch von Wohngebäuden?

1. Einführung

Für die Berechnung des Heizwärmebedarfs bei Neubauten und für die Energieanalyse von unsanierten Bestandsgebäuden wird in der Regel ein einfaches Berechnungsverfahren verwendet. In der EU ist dies z. B. das Monatsbilanzverfahren gemäss EN ISO 13790 [1] mit nationalen Kennwerten. Die Berechnung des Heizwärmebedarfs (Nutzenergie) dient bei Neubauten dazu das Gebäude energetisch einzuordnen. Bei Bestandsbauten gilt es zusätzlich dazu mögliche Sanierungsmassnahmen zu bewerten.

Sowohl bei Neubauten als auch bei Bestandsbauten können berechneter Heizwärmebedarf (HWB) und tatsächlicher Verbrauch (HWV) voneinander abweichen. Bei unsanierten Bestandsgebäuden ist die Tendenz feststellbar, dass der berechnete Energiebedarf (HWB_{St}) im Vergleich zum gemessenen Verbrauch überschätzt wird [2]. Tendenziell wird dieses Missverhältnis umso grösser, je schlechter die energetische Qualität des Gebäudes ist [3], [4], [2] und je weniger Wohneinheiten es gibt [3].

Betrachtet man energieeffiziente Neubauten, oder Sanierungen, so ist hier die Tendenz festzustellen, dass der berechnete Energiebedarf im Vergleich zum gemessenen Verbrauch unterschätzt wird, die Gebäude also mehr verbrauchen als gedacht [2], [5], [4]. Das unterschiedliche Verhalten von Neubauten und Bestandsgebäuden zeigt Abbildung 1 grafisch.

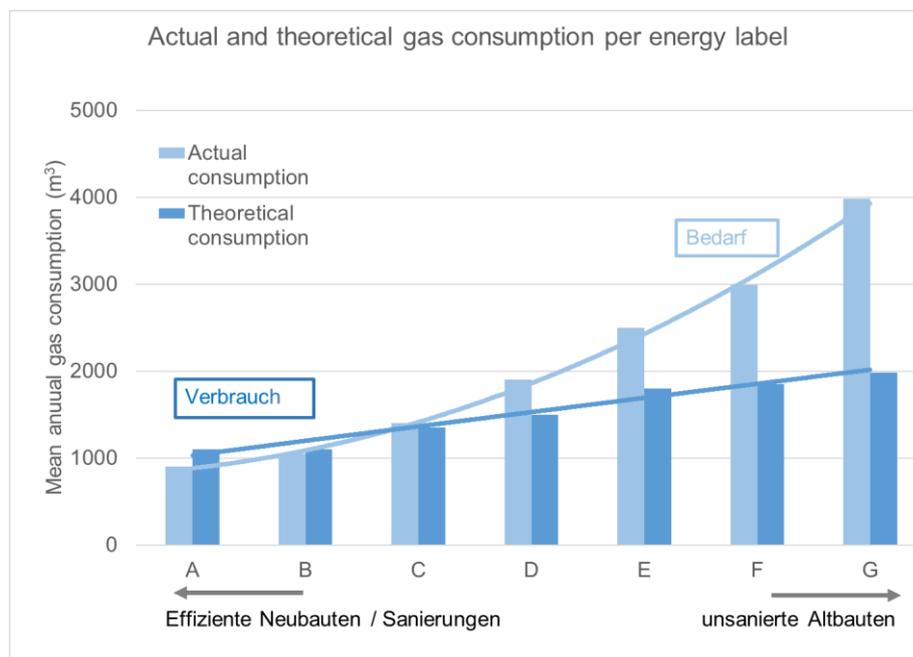


Abbildung 1: Verbrauch versus Bedarf bei Neubauten und Bestandsgebäuden. Grafik basiert auf: Gasbedarf versus Verbrauch von 200'000 EFH, MFH in den Niederlanden.

Anmerkung: Der jeweils verwendete Gaskesseltyp (konventioneller Kessel oder Brennwertkessel) werden in der niederländischen Berechnungssystematik sehr unterschiedlich bewertet, um so den Einsatz von Brennwertkesseln zu fördern [6]. In der Veröffentlichung wird nicht darauf eingegangen, wie diese Tatsache in der Untersuchung berücksichtigt wurde.

Datenquelle Grafik (Werte abgelesen, Ergänzungen durch Autoren): [4].

Für die eben geschilderten Phänomene gibt es Begriffe, die allerdings in der Literatur nicht ganz einheitlich definiert sind [7]. Tabelle 1 zeigt die gängigen Begriffe in der Übersicht.

Tabelle 1: Begriffsdefinitionen und Beispiele. Anmerkung:

Begriff	Prebound	Rebound	Performance Gap
Alternativbegriffe			Energie-Performanz-Lücke
Definition	Der tatsächliche Energieverbrauch liegt unter dem zu erwartenden/kalkulierten Energiebedarf.	Mass, in dem durch Verhaltensreaktionen eine technische Effizienzsteigerung und eine damit einhergehende kostengünstigere Energiedienstleistung die kalkulierten Einsparungen konterkariert.	Mass für die Differenz zwischen tatsächlichem Verbrauch und errechnetem Bedarf
Beispiel	Der berechnete HWB liegt bei 60 kWh/(m ² a), der gemessene HWV liegt bei 45 kWh/(m ² a), z.B. infolge einer Teilbeheizung im realen Betrieb.	Durch eine Sanierung können 10 kWh/(m ² a) eingespart werden, durch zusätzlichen Energieverbrauch (z. B: erhöhte Raumtemperatur) werden real nur 5 kWh/(m ² a).	Nach einer Sanierung liegt der HWB _{st} (Def. siehe Kap. 2.1) bei 30 kWh/(m ² a), der HWV liegt bei 40 kWh/(m ² a). (HWB-HWV)/HWV = -25 % Die Formel kann auch (HWV-HWB)/HWB lauten.
Bezug auf	Bestandsgebäude	Sanierte Bestandsgebäude und Neubauten	Neubauten und Bestandsgebäude
Auswirkung	Zu optimistische Prognosen	Die erwartete Einsparung bleibt aus	
Quelle	[7], [2]	[7], [2]	[7], [2]

1.1. Berechnungsverfahren HWB Schweiz und Deutschland

Grundlage der Berechnung in der Schweiz und in Deutschland ist das in EN ISO 13790 [1] vorgegebene Monatsbilanzverfahren. Dabei werden die Berechnungsansätze der europäischen Norm übernommen, aber landesspezifische Kenndaten bezüglich Konstruktionen, Klimadaten und z. T. Benutzerkenndaten verwendet. Diese finden sich in den nationalen Normen zur Berechnung des Heizwärmebedarfs wieder. In der Schweiz ist dies SIA 380/1 [8], in Deutschland gibt die EnEV als Berechnungsnormen alternativ DIN 18599 oder DIN V 4106-6 [9] in Verbindung mit DIN V 4701-10 [10], [11] vor.

Mögliche Abweichungen zwischen Berechnung und Messdaten bei Bestandsgebäuden sind sowohl den Verfassern der DIN 18599 als auch jenen der SIA 380/1 bewusst. Ein Abgleich der Berechnungsdaten an die Messdaten ist grundsätzlich mit jedem Berechnungsverfahren möglich. Allerdings entspricht das Berechnungsergebnis - sobald keine normativen Eingangsdaten mehr verwendet werden - nicht mehr einem behördlichen Nachweis.

2. Prebound Effekt bei Bestandsgebäuden

In diesem Kapitel werden das Vorgehen und die Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt wiedergegeben, dass die Ursachen für den Prebound Effekt bei Bestandsgebäude in der Schweiz detailliert analysiert. Der Forschungsbericht [12] kann unter <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36891> heruntergeladen werden.

2.1. Methodik

Bezogen auf das (in der Schweiz) verwendete Monatsbilanzverfahren ist zu klären, ob der Prebound Effekt bei Bestandsgebäuden aufgrund des Berechnungsverfahrens auftritt, oder ob er auf die mangelhafte Berücksichtigung von nutzungsbedingten oder verlustbedingten Einflussfaktoren zurückzuführen ist. Dazu wird eine Liste der möglichen Gründe für die Abweichungen aufgestellt (siehe Abschnitt 2.2). Die Fragen werden anhand von drei Gebäudegruppen beantwortet, für die mit unterschiedlich grossen Messdatenintervallen bzw. Ablesezeiträumen Verbrauchsdaten zur Verfügung stehen. Alle verwendeten Verbrauchsdaten sind bereinigt (Abzug Warmwasser, Nutzungsgrad Wärmeerzeugung, Leitungs- bzw.

Verteilverluste, Klimabereinigung). Mit Ausnahme von zwei Gebäuden liegt eine Wohnnutzung vor. Die untersuchten Gebäude sind grossteils unsaniert (Ausnahme: teilweise Fensterersatz oder Dämmung von Einzelbauteilen). Ihre Bauweise ist schwer. Die drei Gebäudegruppen sind im Einzelnen:

- Feinanalyse (FA): Für zwei Gebäude (1 x MFH Wohnen, 1 x Büro) liegen detaillierte Messdaten ab Mai 2015 (Lufttemperatur innen, Luftqualität, Luftwechsel, Verschattung), bzw. ab Juni 2015 (Stromverbrauch Büro, interne Lasten) bis April 2016 vor. Die Benutzung Sonnenschutz wurde im März, Mai und August 2015, sowie im Januar 2016 im Bürogebäude aufgezeichnet. Die mittleren U-Werte der Gebäude liegen bei 1.44 resp. 1.10 W/(m² K). Zusätzlich zur Berechnung gem. SIA 380/1 gibt es Simulationsmodelle im Stundenverfahren. Die Gebäude stammen aus den Jahren 1894 (Wohnen) und 1951 (Büro).
- Grobanalyse 1 (GA1): Für 11 Gebäude (8 x MFH Wohnen, 2 x EFH Wohnen und 1 x Mischnutzung) sind monatliche Messdaten/Ablesedaten vorhanden, sowie Bedarfsberechnungen gem. SIA 380/1. Die mittleren U-Werte der Gebäude liegen zwischen minimal 0.66 W/(m² K) und maximal 2.5 W/(m² K). Der mittlere U-Wert aller Gebäude liegt bei 1.15 (± 0.16) W/(m² K). Fünf der Gebäude wurden zwischen 1879 und 1935 erbaut, sechs der Gebäude zwischen 1951 und 1975.
- Grobanalyse 2 (GA2): Für 20 Gebäude (5 MFH Wohnen, 15 EFH Wohnen) liegen jährliche Ablesedaten sowie GEAK Berechnungen (Gebäudeenergieausweis der Kantone, CH) vor. Fünf Gebäude wurden vor 1935 erbaut, zwei in den Jahren 1936-1950 und 13 in den Jahren 1951 bis 1988.

Innerhalb des Projektes wird die Abweichung wie folgt definiert:

$$\text{Abweichung (A)} = \frac{(\text{Heizwärmebedarf (HWB)} - \text{Heizwärmeverbrauch (HWV)})}{\text{HWV}} 100 [\%]$$

Ist der Heizwärmebedarf mit Standardwerten berechnet, so wird die Abkürzung HWB_{St} verwendet, sind Werte angepasst, gilt die Abkürzung HWB_{Kor}.

Sowohl die Berechnung des HWB als auch die Ermittlung der Verbrauchswerte sind mit Unsicherheiten behaftet. Da die Verbrauchswerte als Mess- oder Ablesedaten i.d.R. als Endenergieverbrauch Heizung und Warmwasser vorliegen, muss eine Bereinigung vorgenommen werden. Hier gibt es Ermessensspielräume und Fehlerquellen, wie z. B. die Abspaltung WW, der Nutzungsgrad Kessel, Leitungsverluste, Zirkulationsleitungsverluste usw. Aufgrund der genannten Unsicherheiten werden in dieser Studie nur Abweichungen von mehr als ±15 % als «signifikante Abweichung» bewertet.

2.2. Resultate

Verbrauchs- und Bedarfsdaten Gebäude

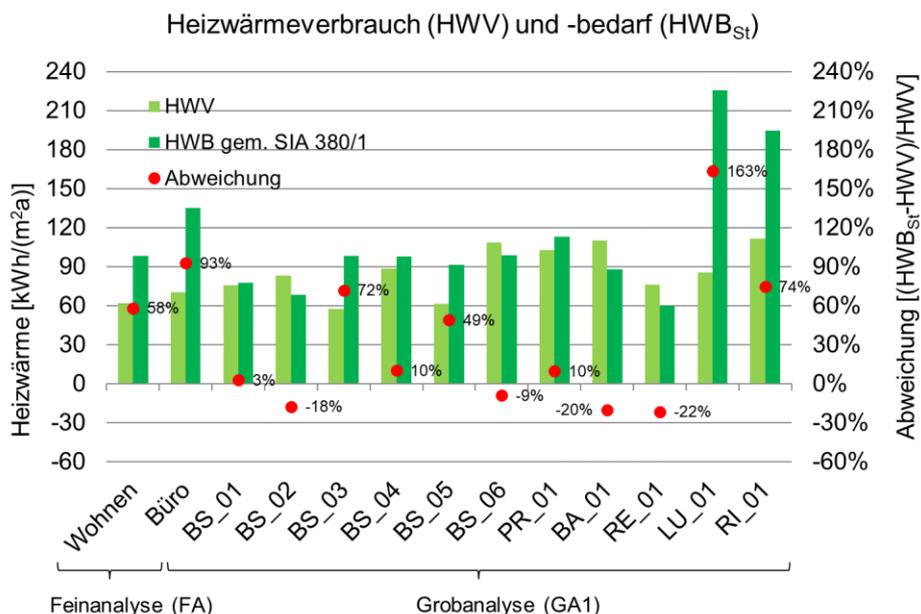


Abbildung 2: HWV und HWB_{St} (gem. SIA 380/1) für die beiden Gebäudegruppen FA und GA1. MFH: «Wohnen», BS_01, BS_02, BS_03, BS_04, BS_05, PR_01, BA_01 und RE_01. Das Gebäude BS_06 umfasst eine Mischnutzung mit Verkauf, Büro und Wohnen. EFH: LU_01 und RI_01 Flächenbezug: Energiebezugsfläche, A_E (früher EBF), gem. [13].

Abbildung 2 zeigt die Abweichungen der Gebäude mit stündlichen Messdaten (FA) und diejenigen mit monatlichen Messdaten (GA1).

Es wird deutlich, dass von den 13 Gebäuden bei sechs die Prognose nach SIA 380/1 den Verbrauch überschreitet. Die Abweichungen liegen für MFH zwischen +49 % und +72 %. Sehr hohe Überschreitungen weisen die beiden (freistehenden) EFH und das Büro auf: 74 % bis 163 %. Drei Gebäude, von denen zwei teilsaniert sind und relativ tiefe mittlere (BS_02: 0.84 W/(m² K), RE_01: 0.66 W/(m² K)) U-Werte aufweisen, verbrauchen mehr Heizwärme als berechnet (zwischen -18 % und -22 %). Bei vier Gebäuden stimmen HWB_{St} und HWV hinreichend überein (-9 % bis +10 %).

Aus der Gruppe mit den jährlichen Daten (GA2) überschreitet die Berechnung den Messwert bei 14 Gebäuden (Abweichung zwischen +17 % und +167 %). Bei sechs Gebäuden stimmen HWB_{St} und HWV genügend gut überein (-5 % bis -14 %).

Der HWV (exkl. WW) aus allen 17 EFH (GA1 und GA2) liegt im Mittel bei 97 kWh/(m²_{EBF} a), der Mittelwert für die 14 MFH (FA, GA1 und GA2) liegt bei 74 kWh/(m²_{EBF} a).

Bei fünf von 11 Wohngebäuden (FA, GA1) wurde der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung gemessen. Der Mittelwert liegt bei 29.4 kWh/(m²_{EBF} a), die Einzelwerte weichen stark voneinander ab.

Gründe für die Abweichung

Tabelle 2 fasst die betrachteten möglichen Ursachen für Abweichungen zwischen Verbräuchen und Berechnungen gemäss SIA 380/1 zusammen. Im Verlauf der Analyse kann durch Testberechnungen eine (qualitative) Eingrenzung vorgenommen werden, wie wichtig der jeweilige Faktor für die Abweichung ist. Im weiteren werden nur diejenigen Faktoren behandelt, welche einen Einfluss von mehr als ±5 % auf das Berechnungsergebnis haben.

- Vergleich dynamische Simulation versus Berechnung im Stundenverfahren und Monatsverfahren:

In der Literatur finden sich Abweichungen zwischen ±10 – 12 % [14], [15], [16]. Eigene Untersuchungen zeigen, dass bei zwei Gebäuden (FA) zwischen Monatsverfahren und Stundenverfahren ein Unterschied zwischen -6 % und -10 % auftritt (Basis des Vergleichs: Monatsverfahren, HWB_{St}).

- Bilden ältere Berechnungsverfahren Bestandsgebäude besser ab?
Beispielrechnungen mit vier Gebäuden (BS_02, BS_03, PR_01 und RE_01, alle GA1) zeigen, dass die alte SIA 380/1:1988 die Bestandsgebäude nicht grundsätzlich passender abbildet als SIA 380/1:2009. Bei Verwendung von SIA 380/1:1988 kommt es gegenüber der Verwendung von SIA 380/1:2009 zu Abweichungen zwischen -12 % und +7 % (Basis SIA 380/1:2009). Beide Berechnungen wurden mit Standardeingabeparametern durchgeführt (HWB_{St}).
- Berücksichtigung Teilbeheizung und Nachtabsenkung.
Teilbeheizung: Gemäss [17] kann bei einem EFH von 41 % unbeheizter Fläche ausgegangen werden, bei MFH von 9 %. Werden die Minderungsfaktoren gem. [17] bei zwei EFH (LU_01 und RI_01, beide GA1) verwendet, liegt die Reduktion des HWB_{Kor} zwischen -19 % und -21 % (nicht beheizte Fläche 43 %), bei zwei MFH (BS_01 und BS_02, beide GA1) bei -1 % (nicht beheizte Fläche: 9 %).
Nachtabsenkung: Je schlechter die Gebäudehülle gedämmt ist, desto wirksamer ist eine Nachtabsenkung. Im Projekt bewirkt bei vier Gebäuden (BS_02, BS_03, PR_01 und RE_01, alle GA1) eine Nachtabsenkung eine Minderung des HWB zwischen -9 % und -12 %.
Anmerkung: Bei einer Kombination der drei Faktoren können sich die Werte teilweise gegenseitig aufheben.
- Nutzerverhalten bezüglich Raumtemperatur, Sonnenschutz und interne Wärmeeinträge:
Raumtemperatur: Für Bestandsgebäude zeigen die verfügbaren Angaben keine klare Richtung auf. In [18] wird die Tendenz verzeichnet, dass bei älteren, unsanierten Wohnbauten (erbaut vor 1977) die mittlere Raumlufttemperatur tiefer ist, als bei Neubauten (erbaut ab 2002). Die Medianwerte lagen in beheizten Räumen zwischen 19.2 °C und 19.5 °C. In [19] werden für 70 Gebäude mit Baujahr ab 2000 Mittelwerte von 20 °C angegeben, in [20] werden für ca. 70 Neubauten 21 °C angegeben. In 124 Reihenhäusern (Baujahr 70er Jahre) wurden in den Wohnräumen im Mittel 21 °C gemessen (in den Schlafräumen 17 °C) [21]. Für die zwei Gebäude der Feinanalyse wird jedoch eine mittlere Raumlufttemperatur von 21 °C aus den Messungen abgeleitet. In den Berechnungen bewirkt eine Temperatursteigerung um 1 K einen Mehrbedarf (HWB_{Kor}) zwischen +10 % und +12 % (Bürogebäude FA, BS_02, BS_03, PR_01 und RE_01, alle GA1). Von der Grössenordnung her deckt sich dies mit der Literatur [22], [19].
Sonnenschutz: Die Benutzung des Sonnenschutzes wird beim Bürogebäude mittels Kamerabildern ausgewertet. Für das Winterhalbjahr ergibt sich eine Korrektur des g-Wertes von 0.70 auf 0.68. Beim Wohngebäude werden Sichtkontrollen durchgeführt. Die Klappläden standen den Winter über offen. Beim Bürogebäude sind die internen Lasten real 25 % höher als normativ, beim Wohngebäude unterschreiten sie die Normwerte dagegen um 67 %. Wird all dies berücksichtigt, so erhöht sich der HWB_{Kor} im Vergleich zur Berechnung mit Standarddaten um +13 % (Wohnen), bzw. und +12 % (Büro).
- Berücksichtigung von Lüftungswärmeverlusten:
Eine Literatursauswertung zeigt, dass die Messwerte zum Luftwechsel von Wohngebäuden mit Fensterlüftung im Bereich zwischen 0.25 1/h und 0.66 1/h liegen ([23], [24], [25], [25], [26], [27], [28], [29], [30]). Die Vorgabe von SIA 380/1 für die Wohnnutzung liegt bei 0.29 1/h. Bezieht man die Angabe auf das Nettoluftvolumen (NGF* h_R), dann kommt man auf einen Wert von ca. 0.38 1/h (Umrechnungsfaktor BGF -> NGF * 1.3, h_R 2.4 m). Im Vergleich zu DIN 1946-6 [31] ist dies ein eher tiefer Wert (0.70 1/h für Gebäude ohne, 0.60 1/h für solche mit bestandener Luftdichtigkeitsprüfung). Die Halbierung des normativen Aussenluftvolumenstroms reduziert den Bedarf zwischen -8 % und -15 %. Eine Verdoppelung erhöht den HWB_{Kor} zwischen +19 % und +30 % (BS_02, BS_03, PR_01 und RE_01, alle GA1).

- Zu «schlechte» U-Werte für bestehende Bauteile als Eingabe:
Eine Literaturrecherche zeigt, dass gerade bei ungedämmten, schweren Bestandskonstruktionen als Tendenz eher eine Überschätzung des U-Wertes durch die Berechnung festgestellt werden kann (im Vergleich zur Messung). Untersuchungen im Rahmen des Projektes zeigen das Folgende: Es werden die U-Werte von neun Bestands-Konstruktionen gemessen und diese jeweils von zehn Energieberatern berechnet. Die Standardabweichung aus zehn Einzelwerten liegt für die Berechnungen zwischen $0.04 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und $0.34 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Bei sieben von neun Konstruktionen liegen die berechneten U-Werte über den gemessenen. Die Abweichungen der Messwerte von den Mittelwerten aus den Berechnungen (B) liegen zwischen 12 % und 111 % $((B - MW)/MW)$. Auf 95 %-Basis ist die Abweichung zwischen dem Messwert und dem Mittelwert der Berechnung allerdings nur bei zwei U-Werten signifikant. Die eigenen Untersuchungen bestätigen die Annahme, dass die U-Werte bei ungedämmten Bestandskonstruktionen eher höher (d. h. schlechter) angenommen werden, als dies eine Messung ergibt.
- Wärmebrücken zu hoch eingeschätzt?
Aufgrund der schlechter gedämmten thermischen Gebäudehülle fallen bei Altbauten Wärmebrücken in der Regel weniger stark ins Gewicht. In der Literatur wird der Wärmebrückenanteil bei den Transmissionsverlusten von Bestandsgebäuden mit Werten zwischen 10 % und 30 % veranschlagt ([32], [33], [34], [35]). Für die Gebäude GA1 liegt der Anteil zwischen 3 % und 22 %. Lässt man die Wärmebrücken in der Berechnung ausser Acht, so ergeben sich um -1 bis -19 % tiefere HWB_{Kor} -Werte.
- Zu tiefe Temperaturen für Keller angenommen (b-Werte):
Fasst man Messungen aus sieben Kellern mit ungedämmter Decke zum EG zusammen, so liegt die minimale Kellertemperatur bei rund $13 \text{ }^\circ\text{C}$. Dies entspricht einem b-Wert (in Deutschland: Temperatur-Korrekturfaktor F_x) von ca. 0.5. Werden bei vier Gebäuden (BS_02, BS_03, PR_01 und RE_01, alle GA1) die Kellerdecken mit einem b-Faktor von 0.5 beaufschlagt, so ergeben sich Minderungen des HWB_{Kor} zwischen -2 % und -12 %. Bei den Gebäuden FA liegt der anhand der gemessenen mittleren Kellertemperatur ermittelte b-Wert der Kellerdecke im Bereich von 0.15 bis 0.25. Die Reduktion des HW_{Kor} wäre also nochmals höher.
- Keine Berücksichtigung des lokalen und des auf das Messjahr bezogenen Klimas:
Messwerte, bzw. abgelesene Werte des Heizwärmeverbrauchs werden immer mit der Einwirkung realer Klimadaten erfasst. Um den temperaturbedingten Mehr- oder Minderverbrauch im Vergleich zu den Standard-Klimadaten berechnen zu können, wird die Heizgradtagsbereinigung angewendet. Diese berücksichtigt allerdings nicht die Strahlung und das lokale Klima (z. B: Hitzeinselpänomen in Städten). Für die beiden Gebäude der FA wird die Bedarfsberechnung mit den Klimadaten (Station SMA Zürich) für 2015 durchgeführt. Weiter wird berücksichtigt, dass der Standort der beiden Gebäude in Zürich bei autochthonen Wetterlagen eine Temperaturerhöhung gegenüber der Messstation aufweist [36] (vereinfachte Annahme der Verfasser ganzjährig $+2 \text{ }^\circ\text{C}$). Damit sinkt der HWB_{Kor} um -35 % bzw. -39 %. Bei den Gebäuden GA1 werden die Klimadaten der nächstgelegenen Messtation (Basel-Binningen, ca. 35 m höher gelegen als Basel) für drei Gebäude mit Standort Basel für die Jahre 2011/12, 2012/13, 2013/14 (Juli - Juni) verwendet (BS_02, BS_03 und RE_01). In Abhängigkeit von dem jeweils betrachteten Jahr sinkt bzw. steigt der HWB_{Kor} im Mittel zwischen -7 %, +6 % und -17 %. Dieses Verhalten lässt sich anhand von den mittleren Aussentemperaturen für die jeweilige Heizperiode (Oktober - April) nachvollziehen. Hier weichen die mittleren Temperaturen von den Standard-Klimadaten um +5 %, -7 % und +30 % ab. Die Korrektur der Klimadaten bringt eine deutliche Annäherung an den HWV, kann aber nicht die gesamte Abweichung überbrücken.

Tabelle 2: Übersicht zu den untersuchten Fragestellungen und welchen Einfluss eine Veränderung des Parameters auf den HWB hat. Für die Untersuchung wurde die Standardberechnung (HWB_{St}) mit der um den fraglichen Parameter veränderten Variante (HWB_{Kor}) verglichen.

Ablesebeispiel «Berücksichtigung Raumtemperatur 21 °C»: Werden als Raumtemperatur 21 °C statt 20 °C angenommen, so hat dies einen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse und führt dazu, dass der HWB_{Kor} um mehr als 10 % steigt.

Mit Ausnahme der Punkte 1.1, 1.2, 2.1, 2.4 und 3.5 wurden die Testrechnungen mit den Gebäuden BS-02, BS_03, PR_01 und RE_01 durchgeführt. Für die Punkte 1.1 und 1.2 werden Werte aus einer Literaturrecherche gegeben. Punkt 1.2 wird ausserdem bei den Gebäuden aus FA analysiert. Punkt 2.1 und 2.4 wurde für die Gebäude LU_01 und RI_01 (Punkt 2.1 auch für BS_02 und BS_03) berechnet und Punkt 3.5 wurde exemplarisch für das Bürogebäude (FA) untersucht.



2.3. Einordnung Abweichung Verbrauch und Bedarf Gebäude

In der Literatur werden Abweichungen zwischen dem Bedarf und dem Verbrauch von Bestandsgebäuden zwischen +18 % und +105 % angegeben.

Eine Studie [37], [38], die mehr als 1000 Wohngebäude in der Schweiz analysiert, kommt zu differenzierten Ergebnissen, die sich auf die jeweilige Klasse im Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK) bezieht. Grundsätzlich gilt beim GEAK, dass die Klasse A die höchste Energieeffizienz aufweist und die Klasse G die tiefste. Unsanierte Bestandsgebäude sind in der Klasse G, F, E oder auch D zu finden. Danach unterschreitet in der Klasse G der Verbrauch Endenergie den Bedarf um 37 %, in der Klasse F um 23 %, in der Klasse E um 9 % und in der Klasse D um 6 %.

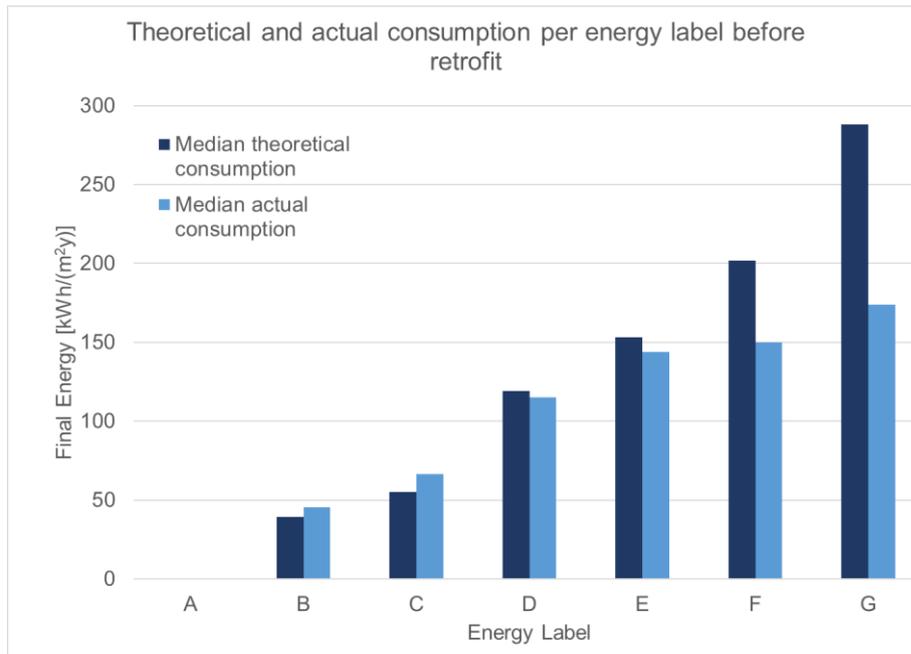


Abbildung 3: Theoretischer und tatsächlicher Endenergiebedarf, bzw. -verbrauch vor der Gebäudesanierung. Die Werte für die Grafik sind aus [38] entnommen. Das Label bezieht sich auf die Gesamtenergie.

Im Projekt, über das hier schwerpunktmässig berichtet wird, überschreitet der HWB_{St} der Mehrzahl (20 von 33 Gebäuden) den HWV. Die Überschreitungen liegen dabei im Bereich zwischen +17 % und +167 %. Drei der Gebäude weisen eine negative Abweichung auf (zwischen -18 % und -22 %). Bei 10 der Gebäude stimmen HWB_{St} und HWV genügend gut überein ($-15 \% \leq A \leq +15 \%$). Bei der Mehrheit, aber nicht bei allen Gebäuden der Stichprobe, konnte eine Überschreitung festgestellt werden, der Median des HWB_{St} aller 33 Gebäude liegt 46 % über dem HWV. Damit liegen die hier gefundenen Zahlen über denen aus [37], wenn man davon ausgeht, dass nicht alle Gebäude in die Klasse G des GEAK fallen. Die Untersuchung zeigt, dass es in SIA 380/1 keine massgebliche, systematische Fehlannahme gibt, die alleine für die festzustellenden Abweichungen verantwortlich ist. Die Abweichungen liegen auch nicht an der Art des Berechnungsverfahrens. Bei der Mehrheit der Objekte sind es einige Standardeingabeparameter, die für die Abweichungen nach oben verantwortlich sein können. Neben möglichen Unschärfen bei der Bereinigung von Messwerten und projektspezifischen Eigenheiten (z. B: ungewöhnlich hoher Wärmebrückenanteil) sind als Hauptursachen für die Abweichungen zu nennen: Klimadaten, Nutzerverhalten und konstruktionsbezogene Rechenwerte.

Die Analyse der möglichen Ursachen für die in diesem Projekt festgestellten Abweichungen auf Basis der beiden mit hohem Detaillierungsgrad untersuchten Gebäude FA zeigt dabei zwei Tendenzen:

- Die Berücksichtigung des realen Nutzerverhaltens führt primär aufgrund höherer Raumtemperaturen und einer Reduktion der solaren Wärmegewinne durch den Sonnenschutz zu einer Zunahme des berechneten Heizwärmebedarfs und damit bei nicht wärmedämmten Bestandsgebäuden zu einer grösseren Abweichung zum gemessenen Heizwärmeverbrauch.
- Eine messgestützte Anpassung der Kellertemperaturen, U-Werte und der lokalen Aussentemperaturen führen hingegen zu einer Reduktion der Transmissionswärmeverluste und damit zu einer deutlichen Verringerung der Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch.

Da die im Projekt verwendete Stichprobe nicht gross ist, kann eine Übertragung der hier gemachten Aussagen auf einen grossen Gebäudebestand nur mit Zurückhaltung erfolgen.

3. Rebound Effekt

In der bereits erwähnten Studie, die sich auf über 1000 Wohngebäude in der Schweiz bezieht, können auch Aussagen zum Rebound Effekt nach einer Gebäudesanierung gefunden werden. Es wird deutlich, dass in der Klasse A, die sehr effiziente Gebäude enthält, kein Rebound Effekt auftritt und der tatsächliche Verbrauch sogar 7 % niedriger ist, als der prognostizierte. Dies widerspricht den vorhandenen Studien (z. B. [4]), könnte aber darauf hinweisen, dass sehr energieeffiziente Gebäude gegenüber unvorteilhaftem Nutzerverhalten robuster sind. Ein Rebound Effekt tritt in Klasse B (10 %) und Klasse C (6 %) auf.

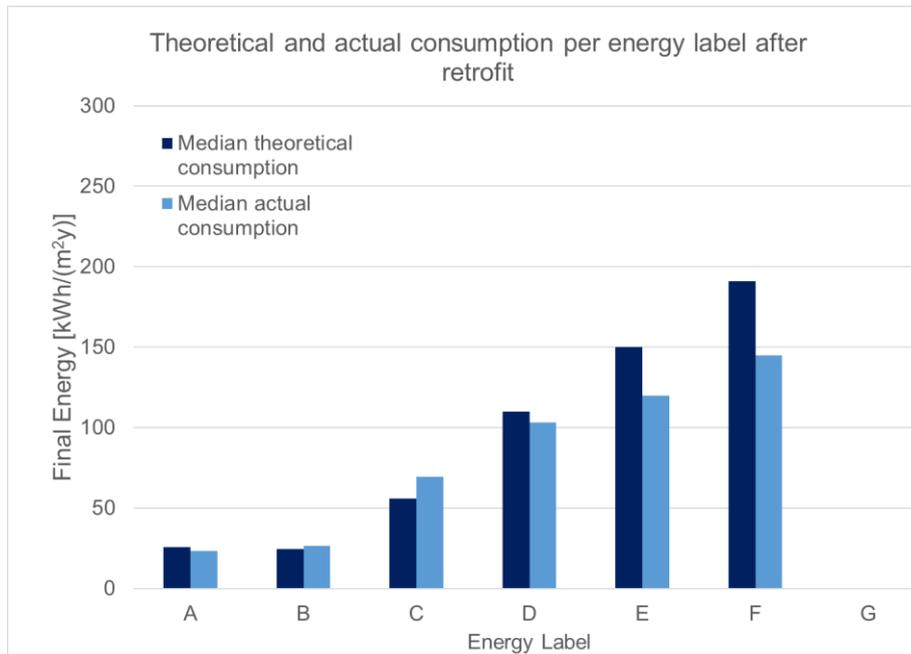


Abbildung 4: Theoretischer und tatsächlicher Endenergiebedarf, bzw. -verbrauch nach der Gebäudesanierung. Die Werte für die Grafik sind aus [38] entnommen. Das Label bezieht sich auf die Gesamtenergie.

4. Vorgehen beim Abgleich HWV und HWB_{Kor}

Grundsätzlich ist beim Messwertabgleich, also dem Vergleich des HWB_{St}, bzw. HWB_{Kor} mit dem HWV wie folgt vorzugehen.

1. Datenbereinigung vornehmen (siehe Abschnitt 4.1)
2. Wo Abweichungen zu Standarddaten bekannt sind, entsprechende Anpassungen bei der Berechnung vornehmen. Dies beinhaltet z. B.:
 - a. Innentemperaturen (messgestützt) anpassen
 - b. Beim Nutzerverhalten eine Nachtabsenkung oder nachweisbare Teilbeheizung des Gebäudes berücksichtigen
 - c. Verwendung von Klimadaten (Temperatur- und Strahlungsdaten), die der Messperiode zeitlich entsprechen
3. Prüfung:
 - überschreitet HWB_{Kor} den HWV um mehr als 15 %? Dann weiter gemäss Abschnitt 4.2,
 - unterschreitet HWB_{Kor} den HWV um mehr als 15 %? Dann weiter gemäss Abschnitt 4.3
4. Wir empfehlen, Differenzen, die nicht über plausible Anpassungen von Annahmen zu verringern sind, als solche zu belassen

Achtung: mit den vorgeschlagenen Anpassungen entspricht die Berechnung nicht mehr den Anforderungen an einen behördlichen Nachweis.

4.1. Datenbereinigung der Mess- oder Ablesewerte

Bei der Datenbereinigung gilt es, folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Nutzungsgrad Wärmeerzeugung
Ermittlung Verluste Wärmeverteilung ausserhalb der thermischen Hülle
Informationen z.B. [39], Tabelle 2-1, Bericht downloadbar unter:
<http://www.iwu.de/publikationen/>
- Abspaltung Warmwasserbereitung
Wenn keine Messwerte vorliegen, so kann gem. SIA 380/1 bei EFH ein Wert von 13.9 kWh/(m²_{EBF} a) und bei MFH ein Wert von 20.8 kWh/(m²_{EBF} a) angesetzt werden.
Da verglichen mit der Literatur der Bedarfswert für EFH niedrig scheint, kann hier ein höherer Wert in Abzug gebracht werden, z. B. 16.9 kWh/(m²_{EBF} a).
- Heizgradtagsbereinigung

4.2. HWB_{Kor} überschreitet den HWV

Anpassung Transmissionswärmeverluste

Wenn die Decke zum Keller nicht gedämmt ist, so ist von höheren Kellertemperaturen auszugehen (im Idealfall sollte dies durch eine kurzzeitige Messung überprüft werden). In diesem Fall wird für Keller im Erdreich die Verwendung eines b-Wertes von 0.5 vorgeschlagen. Weiter können die U-Werte mit der entsprechenden Verwendung eines verminderten äusseren Wärmeübergangskoeffizienten h_e etwas «weniger streng» berechnet werden. Zeigt eine Analyse der vorhandenen Wärmebrücken, dass der Anteil bei einer Standardberücksichtigung für ein Bestandsgebäude zu hoch ist (z. B. Anteil < 15 %), so können diese entsprechend dem planerischen Sachverstand reduziert werden.

- Prüfung, ob eine Berücksichtigung des Hitzeinselphänomens gerechtfertigt ist.

4.3. HWB_{Kor} unterschreitet den HWV

Hier empfiehlt es sich, nochmals die Eingabeparameter zu kontrollieren.

5. Danksagung

Das Projekt wurde vom Bundesamt für Energie, BFE, unter dem Vertrag a SI/501282-01 gefördert. Den Mitautoren des Berichts, Martin Ménard und Lara Carisch danken wir für die Messung und Analyse der Gebäude FA1.

Der Dank für die Gebäudemessdaten GA1 geht an folgende Firmen und Personen:
BS_01, BS_02, BS_03, BS_04, BS_05 und PR_01: Informationen Gebäude: CPV/CAP
Pensionskasse Coop, Messdaten: Rapp Enserv AG, CH
BA_01, BS_06: pom+ Consulting AG, CH
LU_01: Thomas Marti
RI_01: Beat Rothweiler

Der Dank für die Gebäudemessdaten GA2 geht an folgende Person: Christoph Siebold, (INEB, FHNW)

6. Literatur

- [1] EN ISO 13790:2008-03, *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*. 2008, pp. 1–161.
- [2] M. Sunikka-Blank and R. Galvin, «Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption,» *Build. Res. Inf.*, vol. 40, no. 3, pp. 260–273, 2012.
- [3] J. Knissel, R. Alles, R. Born, T. Loga, K. Müller, and V. Stercz, «Vereinfachte Ermittlung von Primärenergiekennwerten zur Bewertung der wärmetechnischen Beschaffenheit in ökologischen Mietspiegeln,» Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2006.

- [4] D. Majcen, L. Itard, and Visscher, «Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications,» *Energy Policy*, vol. 54, pp. 125–136, 2013.
- [5] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, and R. Born, «Deutsche Wohngebäudetypologie Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden - zweite erweiterte Auflage -,» Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2015.
- [6] S. Rieder and W. Eichhammer, «Internationaler Vergleich von Energiestandards im Baubereich,» Institut für Politikstudien Interface GmbH und Fraunhofer ISI im Auftrag des BFE, Luzern, 2005.
- [7] R. Madlener, «Von Rebound, Prebound und Performanzlücken,» *factory*, vol. 3, pp. 11–15, 2014.
- [8] SIA 380/1, *Heizwärmebedarf*. Schweiz, 2016, pp. 1–60.
- [9] DIN V 4108-6:2003-06, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*. 2003, pp. 1–110.
- [10] DIN V 4701-10:2003-08, *Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung*. 2003.
- [11] DIN SPEC 4701-10/A1:2016-05, *Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung; Änderung A1*. 2016.
- [12] C. Hoffmann, A. Geissler, M. Ménard, and L. Carisch, «PRO380: Offene Fragen beim Einsatz der SIA 380/1 als Prognoseinstrument bei Bestandsgebäuden (Wohnbauten),» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2017.
- [13] SIA 380:2015, *Grundlagen für energetische Berechnung von Gebäuden*. 2015.
- [14] D. L. R. Vollaro *et al.*, «Building energy performance analysis: A case study,» *Energy Build.*, vol. 87, pp. 87–94, 2015.
- [15] M. Graetzl-Michlmair, R. Heimrath, and H. Schranzhofer, «Einflussparameter auf Heizwärmebedarf und Kühlbedarf von Gebäuden in verschiedenen Berechnungsmethoden von EN ISO 13790,» *Bauphysik*, vol. 32, no. 5, pp. 296–302, 2010.
- [16] T. Frank, S. Carl, H. Simmler, H. Manz, and B. Binder, «Überarbeitung Programm HELIOS-XP - Schlussbericht,» EMPA im Auftrag des BFE, Dübendorf, 2006.
- [17] T. Loga and U. Imkeller-Benjes, «Energiebilanz-Toolbox, Arbeitshilfen und Ergänzungen zum Energiepass Heizung/Warmwasser,» Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2001.
- [18] F. Schröder, O. Papert, T. Boegelein, H. Navarro, and B. Mundry, «Reale Trends des spezifischen Energieverbrauchs und repräsentativer Wohnraumtemperierung bei steigendem Modernisierungsgrad im Wohnungsbestand,» *Bauphysik*, vol. 36, no. 6, pp. 309–324, 2014.
- [19] W. Richter, T. Ender, T. Hartmann, A. Kremonke, B. Oschatz, and J. Seifert, «Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Niedrigenergie- und Passivhäusern,» Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003.
- [20] F. Schröder, C. Ohlwärter, H. Erhorn, and J. Reiss, «Reale Raumtemperaturen in Mehrfamilienhäusern - Korrelation mit Gebäudeenergiekennzahlen,» *EnEV aktuell*, no. 2, 2010.
- [21] H. Hend, W. Parijs, and M. Deurinck, «Energy consumption für heating and rebound effects,» *Energy Build.*, vol. 42, pp. 105–110, 2010.
- [22] «Der Heizkompass für Hauswartinnen und Hauswarte,» Energie Schweiz, Bern, 2012.

- [23] O. Kah, S. Peper, W. Ebel, B. Kaufmann, W. Feist, and B. Zeno, «Untersuchung zum Aussenluftwechsel und zur Luftqualität in sanierten Wohnen mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung - Endbericht IEA SHC Task 37 Subtask C,» Passivhaus Institut, Darmstadt, 2010.
- [24] H. Künzle, *Wohnungslüftung und Raumklima*, 2. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009.
- [25] W. Hässig, A. Primas, D. Gerber, H. Huber, T. Weber, and C. Hauri, «Untersuchung zur Lüftung von sanierten Mehrfamilienhäusern,» Basler und Hofmann Ingenieure und Planer, Zürich, 2005.
- [26] R. Kriesi, «Reales Lüftungsverhalten in Wohnen mit unterschiedlichen Lüftungssystemen - Schlussbericht,» Kriesi Energie GmbH, Wädenswil, 2012.
- [27] A. Maas, «Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung,» Universität Gesamthochschule Kassel, Kassel, 1995.
- [28] G. Bekö, J. Toftum, and G. Clausen, «Modeling ventilation rates in bedrooms based on building characteristics and occupant behaviour,» *Build. Environ.*, vol. 46, pp. 2230–2237, 2011.
- [29] G. Bekö, T. Lund, F. Nors, J. Toftum, and G. Clausen, «Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children,» *Build. Environ.*, vol. 45, pp. 2289–2295, 2010.
- [30] C. Dimitroulopoulou, «Ventilation in European dwellings: A review,» *Build. Environ.*, vol. 47, pp. 109–125, 2012.
- [31] DIN 1946-6:2009-05, *Raumlufttechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung*. Deutschland, 2009, pp. 1–125.
- [32] W. Leuthard, «Wärmebrücken vermeiden - ein Energiesparpotential ausnützen,» *Umwelt Aargau*, vol. 23, pp. 21–23, 2004.
- [33] C. U. Brunner and J. Nänni, «Verminderung von Wärmebrücken bei Neubauten. Teil 1: die Bedeutung von Wärmebrücken,» *Schweizer Ing. und Archit.*, vol. 107, no. 11, pp. 293–298, 1989.
- [34] C. Richarz and C. Schulz, *Energetische Sanierung - Grundlagen, Details, Beispiele*. München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2011.
- [35] Z. Bastian, *EnerPHit Planerhandbuch - Altbauten mit Passivhaus-Komponenten fit für die Zukunft machen*, 1st ed. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2012.
- [36] E. Parlow, D. Scherer, and U. Fehrenbach, «Klimaanalyse der Stadt Zürich (KLAZ) - Wissenschaftlicher Bericht,» Umwelt- und Gesundheitsschutz der Stadt Zürich (Hg.), Zürich, 2010.
- [37] S. Cozza, J. Chambers, C. Deb, J. L. Scartezzini, A. Schlüter, and M. K. Patel, «Do energy performance certificates allow reliable predictions of actual energy consumption and savings? Learning from the Swiss national database,» *Energy Build.*, vol. 224, p. 110235, 2020.
- [38] S. Cozza, J. Chambers, A. Geissler, and K. Wesselmann, «GAPxPLORE: Energy Performance Gap in existing, new, and renovated buildings - Learning from large-scale datasets,» BFE, Genf, 2019.
- [39] T. Loga and U. Imkeller-Benjes, «Energiepass Heizung/Warmwasser - Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem,» Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1997.

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien
Energiebedarfsoptimierung durch
Automation und intelligente Systeme

Potenzial KI-basierter Verfahren hinsichtlich Optimierung des Raum bzw. Gebäudeenergiebedarfs

Prof. Dr. Michael Krödel
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Potenzial KI-basierter Verfahren hinsichtlich Optimierung des Raumenergiebedarfs

1. Einleitung

Der Begriff «KI – Künstliche Intelligenz» ist in aller Munde und wird auch im Umfeld von Gebäuden bzw. der Gebäudeautomation zunehmend verwendet. Dabei stellt sich die Frage, was das ist und welcher konkrete Nutzen damit ermöglicht wird. Ebenso sollte man sich vor Augen führen, welcher Aufwand mit der Einführung von KI verbunden ist – aufgrund von Konsequenzen an Systemarchitekturen sowie den Planungs- und Betriebsprozess. Denn erst bei gleichzeitiger Betrachtung von Aufwand und Nutzen kann individuell für eine Liegenschaft oder ein Bauvorhaben entschieden werden, ob die Einführung von KI sinnvoll ist.

Gebäude werden üblicherweise sehr «statisch» betrieben. Beispielhaft erfolgt der Betrieb von Komponenten der TGA (Technische Gebäudeausrüstung) wie z.B. Pumpen, Ventilatoren, Stellantriebe etc. oft auf Basis einfacher Regelparameter oder gemäß fester Zeitprogramme; die Raumtemperaturregelung orientiert meist an einem über den ganzen Tag identischen Sollwert; die Beleuchtung wird oft manuell oder auf Basis von einfachen Präsenzschaltungen betrieben; Jalousien und Rollläden werden über feste Zeitprogramme angesteuert. Das alles ist nicht wirklich «intelligent» und führt bei Nutzern oft zu Verärgerung und Abneigung gegenüber automatischen Vorgängen in Gebäuden. In der Anlagenautomation schaut es nicht besser aus. Pumpen und Ventilatoren sind oft im Dauerbetrieb und im besten Fall lediglich differenzdruckgeregelt; Pufferspeicher in Heiz- und Kühlkreisen werden so betrieben, dass ein möglichst konstantes Temperaturniveau vorliegt; Wärmeerzeuger wie z.B. Heizkessel oder Wärmepumpen orientieren sich im Betriebsverhalten am aktuellen, aber nicht am für den Rest des Tages vorhersagbaren Bedarf.

Der wichtigste Mehrwert bei der Einführung von KI im Umfeld der Gebäudeautomation ist die autonome Analyse von Daten als Grundlage für einen optimierten Betrieb sowie sogenannte Mehrwertdienste. Ein optimierter Gebäudebetrieb im Umfeld der Heizung liegt z.B. dann vor, wenn das Aufheiz- und Abkühlverhalten der Räume, Wetterprognosen, prognostizierte Raumbelastung im Tagesverlauf etc. berücksichtigt werden. Die Nutzungsintensität von Teeküchen, Kantinen und Toiletten wird erfasst, um Reinigungsintervalle anzupassen – ebenso nicht nur auf Basis von aktuellen Ist-Werten, sondern prognosegeführt aufgrund entsprechender Analysen zurückliegender Tage und Wochen. Durch die Analyse von Stromverbrauchswerten elektrischer Geräte kann auf deren Zustand geschlossen und bedarfsweise vorbeugende Wartung ausgelöst werden. Diese Art des vorrausschauenden Gebäudebetriebs lässt sich auf fast jeden Bereich der TGA übertragen. Die Vorteile sind vielfältig und reichen von erhöhter Energieeffizienz über reduzierte Betriebskosten bis hin zu optimierter Flächenauslastung

Ergänzend lassen sich eine Vielzahl weiterer Dienste zum Wohle des Menschen umsetzen: Wenn z.B. ein Bürogebäude berücksichtigt, wie viele oder gar welche Mitarbeiter an einem Arbeitstag zu welchem Zeitbereich anwesend sind, kann das zur bedarfsgerechten Flächenbereitstellung und Konditionierung des Gebäudes verwendet werden und leistet einen Beitrag zur Steigerung von Mitarbeiterzufriedenheit und -produktivität. So können z.B. Buchungen von Besprechungsräumen in Bezug auf die Anzahl der Teilnehmer, deren Wegstrecke und Vorlieben zu technischer Ausstattung des Raumes oder Nähe zu Teeküche oder Toiletten optimiert werden. Ebenso können Prognosen von Wartezeiten im Kantinenbereich genutzt werden, um Mitarbeitern die Möglichkeit zu geben, den Zeitpunkt des Mittagessens zu optimieren.

2. «Building Automation», «Smart Building» und «Cognitive Building»

2.1. Building Automation

Unter dem Begriff «Gebäudeautomation» bzw. «**Building Automation**» versteht man die Teilbereiche der Raum- und Anlagenautomation und somit die Disziplin, den Betrieb unterschiedlicher technischer Gewerke zu automatisieren.

Die klassische Gebäudeautomation ermöglicht die raumseitige Betriebsoptimierung von u.a. Beleuchtung, Verschattung und Lüftung sowie den bedarfsoptimierten Betrieb der entsprechenden Anlagentechnik. So wichtig dieser erste Schritt an Automation auch ist, so ist dieser doch relativ «un-intelligent». Bei der Programmierung werden meist einfache Regeln hinterlegt, um eine Inbetriebnahme zügig durchführen zu können und die Anforderungen an die spätere Betreuung möglichst einfach zu halten. Auch ist es so, dass ein komplexeres, adaptives oder gar lernendes Verhalten durch die üblichen Technologien nicht bzw. kaum unterstützt wird. Bei den sogenannten Bus-Systemen ergibt sich das Gesamtverhalten aus der Kombination von Geräteparametern sowie funktionalen Verknüpfungen zwischen Sensoren und Aktoren. Das ist vermeintlich einfach umzusetzen, ermöglicht aber keine echte Gebäudeintelligenz. Bei höherem funktionalem Anspruch sind Controller (auch als DDC¹ bezeichnet) erforderlich, die entsprechend programmiert werden. Auch wenn die Art der Programmierung in der Gebäudeautomation nicht verbindlich festgeschrieben ist, so orientieren sich die meisten Hersteller an der Norm IEC 61131 – einer Norm zur Programmierung von speicherprogrammierbaren Steuerungen, die ihren Ursprung in der Prozessautomation hat. Die dort aufgeführten Programmiervarianten erlauben eine freie, kreative Programmierung, aber bei (zu) komplexen Anforderungen wird die Programmierung sehr schnell unübersichtlich und ist somit für eine Nachbetreuung ungeeignet. Im besten Fall hat man sich für einen Hersteller mit sehr funktionalen Programm-Bibliotheken entschieden, aber ist damit an den Hersteller gebunden und von dessen Weiterentwicklung der Bibliotheken abhängig. Die Begriffe Gebäude-, Raum- und Anlagenautomation sind dabei normativ geregelt – so z.B. in der VDI 3814 oder der DIN EN ISO 16484.

2.2. Smart Building

Das «**Smart Building**» baut auf der klassischen Gebäudeautomation auf und erweitert es um intelligentere Regelstrategien. Abbildung 1 zeigt die übliche Struktur der Gebäudeautomation mit drei Ebenen. In dieser Abbildung ist bereits zu sehen, dass ein Teil der «Intelligenz» von den Bus-Systemen (Feld-Ebene) bzw. den Controllern (Automations-Ebene) in die Management-Ebene verlagert wird. In dieser Ebene ist im klassischen Sinn die GLT (Gebäude-Leittechnik) zu finden, die zur Überwachung der Gesamtanlage, Optimierung oder Steuerung von Betriebsabläufen sowie allgemeiner Visualisierung zuständig ist. Diese ist gemäß ihrer Historie nicht dafür geeignet, die anstehenden Steuerungsaufgaben zu übernehmen und somit bilden sich derzeit am Markt neue Systeme – hier als BMS (Building Management System) bezeichnet. Im Vergleich zu klassischen GLT-Systemen erlauben BMS-Systeme die beliebige Programmierung von Gebäudeintelligenz mit modernen IT-Sprachen bzw. -Werkzeugen, beliebige Kopplungen mit anderen IT-Systemen wie Raumbuchungssystemen oder Datenbanken, Visualisierungen auch für «normale» Nutzer und nicht nur Facility-Manager, standortbezogene Dienste wie z.B. Indoor-Navigation etc.

Der Begriff «Smart Building» ist nicht genormt, wird aber in der Branche zunehmend als Synonym für eine um Funktionalität erweiterte Gebäudeautomation verwendet.

¹ Direct Digital Control

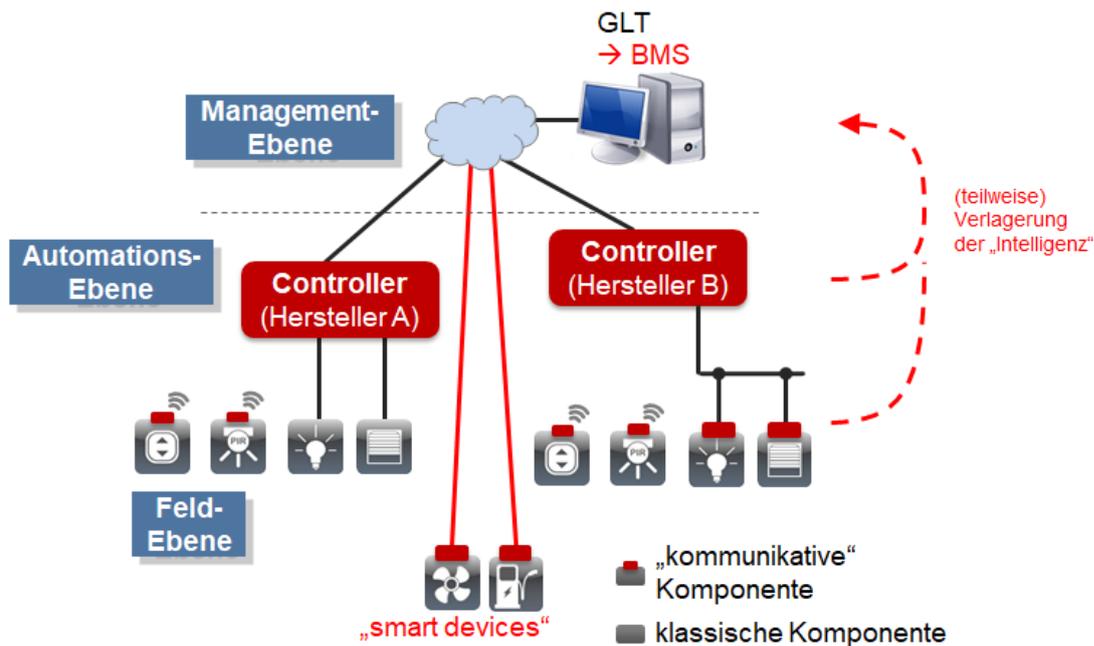


Abbildung 1: Ebenen der Gebäudeautomation inklusive Verlagerung der «Intelligenz»

2.3. Cognitive Building

Mit der zunehmenden Kommunikation von Sensordaten in die IT-basierte Management-Ebene stehen sehr funktionale Auswertungsmöglichkeiten zur Verfügung – bis hin zu verfügbaren Werkzeugen der KI. Dies ist wiederum die Voraussetzung für jeglichen prognosegeführten Gebäudebetrieb. Der Begriff «Cognitive Building» ist nicht genormt und wird bisher nur von wenigen Firmen wie z.B. IBM verwendet – dabei bezeichnet der Begriff sehr gut die Abgrenzung vom zuvor aufgeführten «Smart Building». D.h. ein «Cognitive Building» setzt auf einem funktionalen «Smart Building» auf und ergänzt dieses um die intelligente Auswertung von Daten.

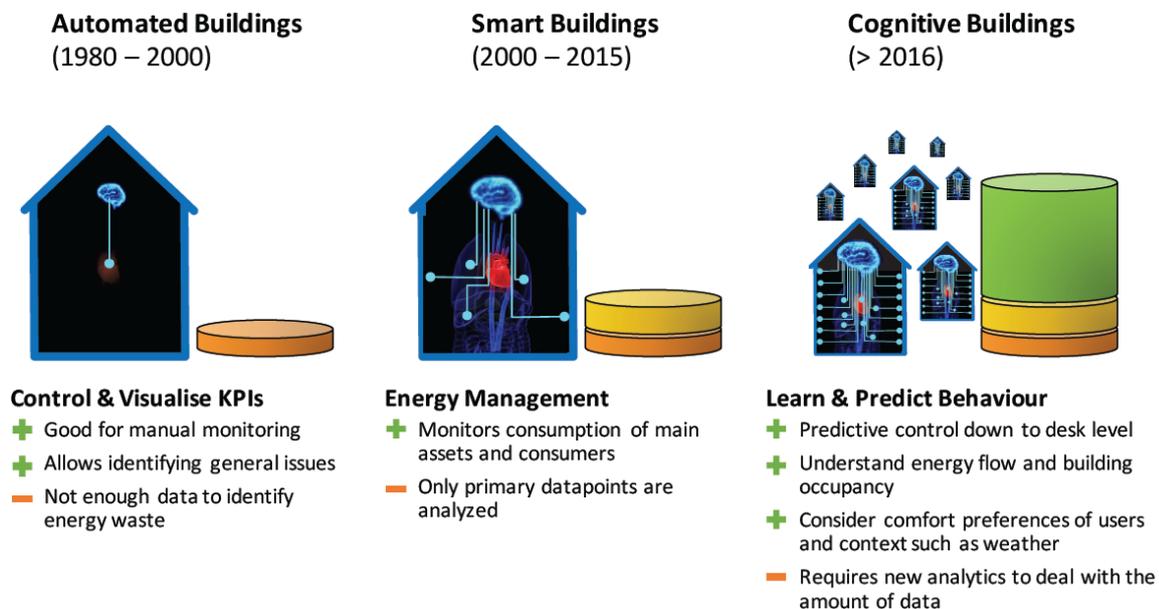


Abbildung 2: Building Automation - Smart Building - Cognitive Building (Quelle: IBM)

Bei der Erweiterung des Smart Building zum Cognitive Building sollte beachtet werden, dass nicht jeglicher Entscheidungsprozess in die Management-Ebene verlagert wird. Für viele Anwendungen genügen weiter einfache Regelprozesse, die in der Automations-Ebene oder in Bus-Systemen der Feld-Ebene ausgeführt werden. Ein ganz wesentlicher erster

Schritt bei der Einführung eines Cognitive Building ist somit, zu Beginn die konkreten Anforderungen an die KI-basierten Verfahren festzulegen. Dies wird deshalb betont, weil das Schlagwort «KI» derzeit häufig als Synonym für Problemlösungen jeglicher Art verwendet wird. Ohne konkrete Aufgabenstellung an KI-basierte Verfahren und in Konsequenz an die erforderlichen und korrekt aufbereiteten Daten wird sich aber kein Erfolg einstellen. KI-basierte Verfahren sind auch im Umfeld von Gebäuden kein Wundermittel für alles, sondern eine sinnvolle punktuelle Erweiterung der Funktionalität. Auch in Bezug auf die Architektur muss beachtet werden, dass die Ausführung der KI-basierten Verfahren üblicherweise nicht auf den klassischen Computern der Gebäudeleittechnik (GLT) oder Building Management Systemen (BMS) stattfindet. Dies liegt daran, dass GLT-/BMS-Systeme und KI-Plattformen unterschiedliche Softwareprodukte sind. Somit gilt es, beide Plattformen zu koppeln und Daten strukturiert auszutauschen. Dies alles gilt es bei der Planung der KI-basierten Software-Architektur zu berücksichtigen. Dabei besteht schon heute die Wahl zwischen cloud-basierten Systemen oder Software zur Installation im eigenen Rechenzentrum.

3. Konkrete Einsatzmöglichkeiten

Die Einsatzmöglichkeiten von KI-basierten Verfahren im Bereich der Gebäudeautomation sind sehr vielfältig. Einige Beispiele wurden bereits erwähnt. Im Folgenden werden weitere Einsatzmöglichkeiten beschrieben und sind nach Art des Einsatzes abschnittsweise gruppiert.

Dabei kann dies nur eine Momentaufnahme sein – Ideen zu weiteren Einsatzmöglichkeiten entwickeln sich fortlaufend auf Basis von Pilotprojekten und der Erfahrung von umgesetzten Installationen.

3.1. Optimierter Gebäudebetrieb

Viele elektrische Komponenten in Gebäuden werden unnötig bzw. falsch betrieben – weil diese entweder im Dauerbetrieb sind oder unnötig lange/oft betrieben werden. Dies ist z.B. der Fall, wenn morgens im Büro das Licht eingeschaltet wird und in diesem Status den ganzen Tag verbleibt – unabhängig vom Tageslichteinfall oder Präsenz im Raum. Als anderes Beispiel sind Umwälzpumpen zu nennen, die oft im Dauerbetrieb sind. Wenn man diese unnötigen Betriebszeiten erkennen und melden könnte, könnten Mitarbeiter informiert und sensibilisiert werden bzw. das technische Betriebspersonal könnte Anpassungen an Betriebsparametern vornehmen.

Die besondere Komplexität liegt in der Vielzahl an Sensorwerten sowie Handlungsoptionen. Wie in einem Beispiel zuvor erwähnt, sollte zur optimierten Raumtemperaturregelung nicht nur die aktuelle Raumtemperatur, sondern auch die Außentemperatur, die prognostizierte Belegung und Belegungsdauer sowie die Energieverbrauchskennwerte aller beteiligten Komponenten berücksichtigt werden; zur Ansteuerung sollte nicht nur ein einzelnes Ventil am raumseitigen Heizkörper, sondern alle am Heizprozess beteiligten Stellantriebe, Umwälzpumpen und Wärmeerzeuger ganzheitlich optimiert angesteuert werden.

Die europäische Norm DIN EN 15232 beziffert das energetische Einsparpotenzial auf 20 % im thermischen Bereich und 8 % im elektrischen Bereich, wenn von der GA-Effizienzklasse C (Standard-GA) auf die GA-Effizienzklasse B (erweitertes GA-System) übergegangen wird. Dies setzt allerdings voraus, dass die Gebäudeautomation korrekt eingerichtet ist und ebenso korrekt betrieben wird. Es müsste somit auch der ordnungsgemäße Betrieb der Automation regelmäßig untersucht werden, was in der Praxis üblicherweise nicht erfolgt. Eine manuelle Auswertung scheidet meist am Umfang und damit an der Komplexität der auszuwertenden Daten. Dort wo computergestützte Auswertungen verwendet werden, ist ein großes Problem die Individualität von jedem Gebäude. D.h. die Optimierungsmaßnahmen für ein Gebäude lassen sich üblicherweise nur mit viel Aufwand auf andere Gebäude übertragen – und wird wegen des hohen Aufwands nur selten durchgeführt.

Viele Gebäude werden somit – selbst bei Nutzung von Gebäudeautomation – sehr «statisch» betrieben. D.h. auf Basis von einfachen Schwellwerten oder Zeitprogrammen. Insbesondere deshalb wären in diesem Umfeld Verfahren sinnvoll, die möglichst autonom die optimierten Betriebsparameter jeder einzelnen Komponente ermitteln und dann dynamisch, d.h. in regelmäßigen Zeitabständen, an die Controller der Gebäudeautomation übertragen.

Auf diese Art und Weise kann jedes Gebäude individuell so betrieben werden, dass es die übergeordneten Anforderungen an z.B. Heizung, Lüftung, Beleuchtung unter Berücksichtigung von Nutzerzufriedenheit und gleichzeitig möglichst geringen Kosten erreicht.

3.2. Optimierte Flächennutzung und Infrastrukturausstattung

Insbesondere in Bürogebäuden existieren viele gemeinsam genutzten Flächen. Darunter fallen u.a. Besprechungsräume, Kantine, Teeküchen, Verkehrswege, Toiletten und Parkplätze. Eine Zunahme ist bei den Arbeitsplätzen zu verzeichnen – aufgrund des zunehmenden Wandels von fest zugeordneten Schreibtischen zu Wechselarbeitsplätzen.

Eine übermäßige Flächenbereitstellung ist betriebswirtschaftlich unsinnig; eine zu geringe Bereitstellung hingegen sehr ärgerlich für die betroffenen Mitarbeiter. In Konsequenz ist eine möglichst optimierte Auslastung anzustreben. Dies wiederum ist ein sehr dynamisches Szenario und deshalb ebenso ein sinnvolles Einsatzgebiet für KI-basierte Verfahren. Ein Smart Building kann bereits den Ist-Zustand visualisieren aber mit Hilfe von KI-basierten Verfahren können verlässliche Prognosen für zukünftige Tage für Flächenanforderungen auf Basis von historischen Daten erstellt werden. Das gilt wohlbemerkt nicht nur für Arbeitsplätze und Besprechungsräume, sondern auch für z.B. Parkplätze, den Kantinenbereich, Toiletten sowie Platzbedarf in den Fluren.

Engpässe, d.h. Überbelegungen, müssen rechtzeitig erkannt und gemeldet werden, um zu kurz- und langfristigen Maßnahmen zu führen. Als kurzfristige Maßnahmen sind Statusinformationen an Mitarbeiter denkbar, um diese bei z.B. mehreren verfügbaren Liegenschaften auf ein anderes Gebäude umzulenken. Alternativ können Informationen zur Belegungsdichte auch verwendet werden, um z.B. auf verstärkte Nutzung von Web-Konferenzen und/oder Home-Office auszuweichen. Parallel zu den kurzfristigen Maßnahmen können auch langfristige Maßnahmen abgeleitet werden. Das umfasst zum einen Flächenerweiterung oder -reduktion, aber ebenso auch Veränderungen in der örtlichen Lage von Infrastruktur wie z.B. Teeküchen, Scanner/Drucker, Snack-Automaten, Schließfächer etc.

3.3. Lastverschiebung

Durch den gleichzeitigen und nicht aufeinander abgestimmten Betrieb elektrischer Verbraucher ergeben sich Lastspitzen in Bezug auf elektrische Energie. Dies führt zu Problemen für zwei Parteien. Für den Energieversorger sind Lastspitzen eine zusätzliche Herausforderung. Elektrische Energie kann nur in Grenzen zwischengespeichert werden. Die Notwendigkeit, kurzfristig auf Lastspitzen reagieren zu müssen, lässt sich nur mit hohem Aufwand bewerkstelligen («Ausgleichsenergie» bzw. «Regelenergie»). Aus diesem Grund bieten Energieversorgungsunternehmen für Großverbraucher so genannte Leistungspreis-Tarife an. Dabei wird zusätzlich zu der genutzten Energiemenge (dem sogenannten Arbeitspreis) ein Leistungspreis berechnet, der sich an der höchsten Lastspitze innerhalb z.B. eines Jahres orientiert. Dies wiederum bedeutet für Kunden dauerhaft höhere Kosten, wenn sie kurzfristige Lastspitzen erzeugen. Im Umkehrschluss lassen sich sowohl Energiekosten für Nutzer als auch technischer Aufwand für Ausgleichsenergie beim Energieversorger reduzieren, wenn Lastspitzen reduziert werden.

Im einfachen Fall wird eine Lastspitze erst dann erkannt, wenn diese eintritt und führt zur unmittelbaren Abschaltung von weniger relevanten Verbrauchern. Deutlich besser ist die Erstellung von Lastprognosen zur vorausschauenden Steuerung. Ersteres ist ein einfacher Steuerungsprozess – letzteres eine anspruchsvolle Aufgabe für KI-basierte Verfahren.

3.4. Vorbeugende Wartung und Serviceoptimierung

Ein für den Liegenschaftsbetrieb sehr wichtiger Aspekt ist die vorbeugende Wartung. Mit diesem Verfahren, technische Komponenten bedarfsgerecht zu warten bzw. im Falle eines wahrscheinlichen Ausfalls vorher auszutauschen, wird deren Verfügbarkeit erhöht. Eine Indikation für den Wartungsbedarf einer Komponente kann das Verlaufsprofil der elektrischen Energieaufnahme sein. Im Umkehrschluss ist es sinnvoll, Anomalien in den Lastkurven der elektrischen Energie zu erkennen und auf einen Wartungs- bzw. Austauschbedarf einer entsprechenden Komponente zu schließen. Idealerweise berücksichtigen Wartungs- und Austauschempfehlungen auch die Auslastung von Facility Manager bzw. Hausmeister.

Dabei gilt das nicht nur für die konventionellen Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung wie Pumpen, Ventilatoren, Stellantriebe, Leuchten etc., sondern auch für Komponenten wie Beamer, LCD-Panels, Kühlschränke usw.

3.5. Mitarbeiterorientierte Mehrwertdienste

Bereits beim Übergang zum «Smart Building» kommt es zur Einführung von Bedienmöglichkeiten für Mitarbeiter über mobile Endgeräte wie Smartphone oder Tablet (siehe Abschnitt 2.2). Im einfachsten Fall ist das die Bedienung von raumseitigen Funktionen wie Beleuchtung, Verschattung oder Raumtemperatur unter Berücksichtigung von individuellem Aufenthaltsort und Berechtigungen. Auch Aspekte wie Indoor-Navigation samt Anzeige von standortbezogenen Diensten (d.h. Nähe zu z.B. Kantine, Teeküche, Toilette oder IT-Infrastruktur) lassen sich bereits ohne KI-basierte Verfahren umsetzen.

Bei der Erweiterung zum Cognitive Building kann die Nutzung über die mobilen Endgeräte deutlich angereichert werden. So können Mitarbeiter nicht nur den aktuellen Status, sondern auch Prognosen zu Flächenbelegungen (Besprechungsräume, Kantine, Parkplätze etc.) einsehen. Gegebenenfalls erhält der Mitarbeiter Optimierungsvorschläge für z.B. Raum oder Zeitpunkt von Besprechungen bis hin zu Hinweisen für Menüvorschläge der Kantine auf Basis von persönlichen Präferenzen bei gleichzeitiger Berücksichtigung einer ausgewogenen Ernährung.

In Bezug auf die Raumkonditionierung (Lichtsznarien, Verschattung, Raumtemperatur) aber auch zugewiesene Gebäudebereiche können Mitarbeiterpräferenzen bzgl. Lage des Arbeitsplatzes, Nähe zu gebäudeseitiger Infrastruktur, Vorlieben beim Parkplatz berücksichtigt werden (idealerweise in Kombination mit der zuvor erwähnten Indoor-Navigation).

3.6. Fokus auf bedeutungstragende Sensorik

Ein letzter Punkt betrifft die optimierte Einführung eines «Cognitive Building». Jedes KI-basierte Lernverfahren benötigt Daten. In Konsequenz sollten im Gebäude möglichst viele Sensoren installiert sein, um diese Daten zu liefern. Dabei können mit Hilfe von KI-basierten Verfahren die Anzahl der Sensoren reduziert werden: Aus Daten eines Sensors können die Daten anderer Sensoren abgeschätzt werden. Statt z.B. Stromzähler für einzelne Geräte oder Stromkreise zu installieren, können diese aus den Stromverlaufskurven zentraler Zähler abgeschätzt werden («Disaggregation»). Aus den Daten raumseitiger Aktivitätszähler und Fensterkontakte kann z.B. die Luftqualität abgeschätzt werden. Dies bedeutet, dass die Anzahl der Sensoren mit Hilfe von KI-basierten Auswertungen reduziert werden kann, was eine deutliche Senkung von Investitions- und Betriebskosten ermöglicht.

Durch intelligente Heizungsregelung realisierbare Energie-Einsparpotentiale

Dr.-Ing. Matthias Kersken
Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP
Holzkirchen, Deutschland



Durch intelligente Heizungsregelung realisierbare Energie-Einsparpotentiale

1. Hintergrund

Intelligente Regelungen in Wohngebäuden, manche werden als «Smart Home» bezeichnet, werden häufig mit dem Argument der Energieeinsparung assoziiert und teils damit beworben. Potentiale zur Einsparung sind unzweifelhaft vorhanden, allerdings nicht bezüglich jeden Aspekts und ohne Vorbedingungen. So spart beispielsweise alleine die Tatsache, dass eine Funktion fern- bzw. über das Smartphone steuerbar ist, noch keine Energie ein. Im Gegenteil, zunächst muss jede Steuerbarkeit mit einem zusätzlichen Stromverbrauch inkl. Standby-Verlusten erkaufte werden, die je nach gewähltem System in ihrer Höhe sehr unterschiedlich ausfallen können. Hieraus ergibt sich, dass Smart Home-Systeme unter dem Aspekt der Energieeinsparung, unbeachtet anderer Aspekte wie Komfort oder Sicherheit, nur dort eingesetzt werden sollten, wo signifikante Energiemengen verbraucht werden. Als mögliche Anwendungen können hier z. B. die Heizenergie, der Sonnenschutz (Kühlenergie / sommerliche Überhitzung) oder Lastverschiebung größerer elektrischer Verbraucher zur Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs genannt werden. Im hier dargelegten Referat werden energetische und ökonomische Einsparpotentiale bezüglich des Heizwärmebedarfs von Heizungsanlagen mit Gaskessel und klassischen Heizkörpern auf Basis von entsprechenden thermisch-energetischen Gebäudesimulationen bewertet. Die Veröffentlichung fasst die Ergebnisse aus mehreren Untersuchungen im Industrieauftrag zusammen.

2. Randbedingungen

Der Heizenergieverbrauch einer Wohneinheit (Gebäude bzw. Wohnung) ist im Wesentlichen eine Funktion der während der Heizperiode auftretenden mittleren Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und der energetischen Qualität der Bausubstanz. Entsprechend stellen diese beiden Parameter zwar nicht die einzigen, aber die wichtigsten beiden Randbedingungen für eine derartige Untersuchung dar.

2.1. Temperaturen und Nutzungsprofile

Da die Außentemperatur nicht beeinflusst werden kann und auch die Raumlufttemperaturen bei Anwesenheit der Bewohner komfortabel sein müssen, kann eine Heizenergieeinsparung durch reduzierte Raumlufttemperaturen im Wesentlichen nur während der Abwesenheitszeiten realisiert werden. Die Erschließung der Heizenergieeinsparpotentiale erfolgt bei allen intelligenten Regelungen, zumindest anteilig, über die gezielte Reduktion der Temperaturdifferenz bei gleichzeitiger Vermeidung von Komforteinbußen. Dies wird durch ein Absenken der Lufttemperaturen in der Wohneinheit bzw. den einzelnen Räumen der Wohneinheit bei Abwesenheit erreicht. Rechtzeitiges Wiederaufheizen vor Nutzungsbeginn vermeidet (in der Regel) Komforteinschränkungen. Zur Realisierung dieser Absenkezeiten existieren zahlreiche Ansätze, die verbreitetsten sind einfach programmierbare (Interface) Zeitpläne, Anwesenheitserkennung mit Lernfunktion und Geofencing (Positionsauswertung zugeordneter Smartphones).

Unabhängig von der systemspezifischen Quelle der Abwesenheitszeiten ist für die Betrachtung im Rahmen einer Simulation die Verwendung von reproduzierbaren und realitätsnahen Nutzungsprofilen essenziell für die Qualität der Ergebnisse. Dies gilt sowohl für die intelligente Regelung als auch für den Referenzfall mit »normaler« Regelung. Für den Referenzfall werden die Berechnungsgrundlagen der EnEV [1] bzw. GEG [2] herangezogen, in diesem Fall DIN V 18599 Teil 10 [3]. Hier wird für Wohngebäude eine konstante Raumlufttemperatur von 20 °C angesetzt, mit einer Nachtabschaltung (Einfamilienhaus) bzw. Nachtabsenkung (4 K, Mehrfamilienhaus) von 23:00 bis 6:00 Uhr. Für die Bewertung der intelligenten Regelung hat das Fraunhofer IBP, basierend auf Umfragedaten [4], realitätsnahe und statistisch belegte raumweise Anwesenheitsprofile erstellt. Diese können für unterschiedliche Haushaltsgrößen und unterschiedliche Lebenssituationen (Arbeitnehmer, Schüler, ...) erstellt werden. So kann z. B. zwischen einem berufstätigen Single und einer

Familie mit zwei vollberufstätigen Erwachsenen und einem bzw. zwei Kindern unterschieden werden. Diese beiden Nutzungsprofile sind beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt. Aus den Raum- bzw. Wohneinheit-weisen Nutzungszeiten können entsprechende Zeiten mit Komfort- und Absenkttemperaturen (hier 21 °C / 17 °C), inkl. Berücksichtigung von Aufheizzeiten, abgeleitet werden.

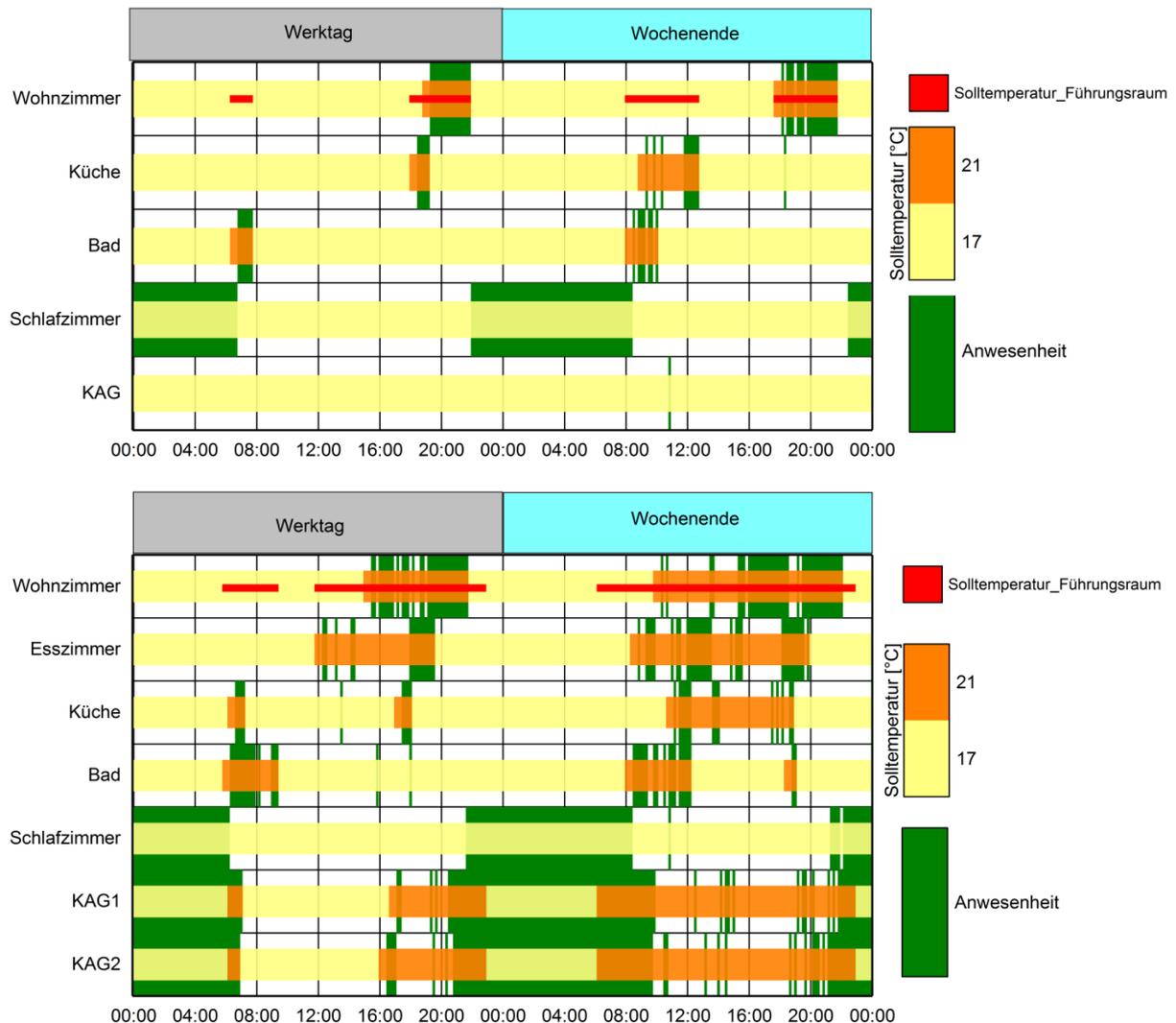


Abbildung 1: Raumweise Nutzungszeiten für einen berufstätigen Single (oben) und eine 4-köpfige Familie mit zwei berufstätigen Erwachsenen (unten) inkl. der aus der Nutzung resultierenden raumweisen Solltemperaturprofile. Die Umhüllende aller raumweisen Heizzeiten für eine wohneinheit-zentrale Temperaturregelung (z. B. Führungsraum) ist rot im Wohnzimmer mit dargestellt. »KAG« repräsentiert eine gemischte Raumnutzung aus Kinder-, Arbeits- und Gästezimmer.

2.2. Gebäude – Geometrie und energetische Qualität

Zur Festlegung repräsentativer Grundrisse werden der Literatur sowohl typische Wohneinheitsgrößen [5] als auch Baualter [6] mit entsprechenden energetischen Qualitäten (unsanierter Fall) [7] entnommen. Die energetische Qualität der Neubaufälle entspricht der EnEV-Referenztechnik [1]. Diese beiden Wohneinheiten sind in Abbildung 2 dargestellt. Bei der Geschosswohnung (GW) handelt es sich um einen generischen Grundriss, während für das Einfamilienhaus (EFH) die Geometrie der Zwillingshäuser am Fraunhofer IBP verwendet wird [8].

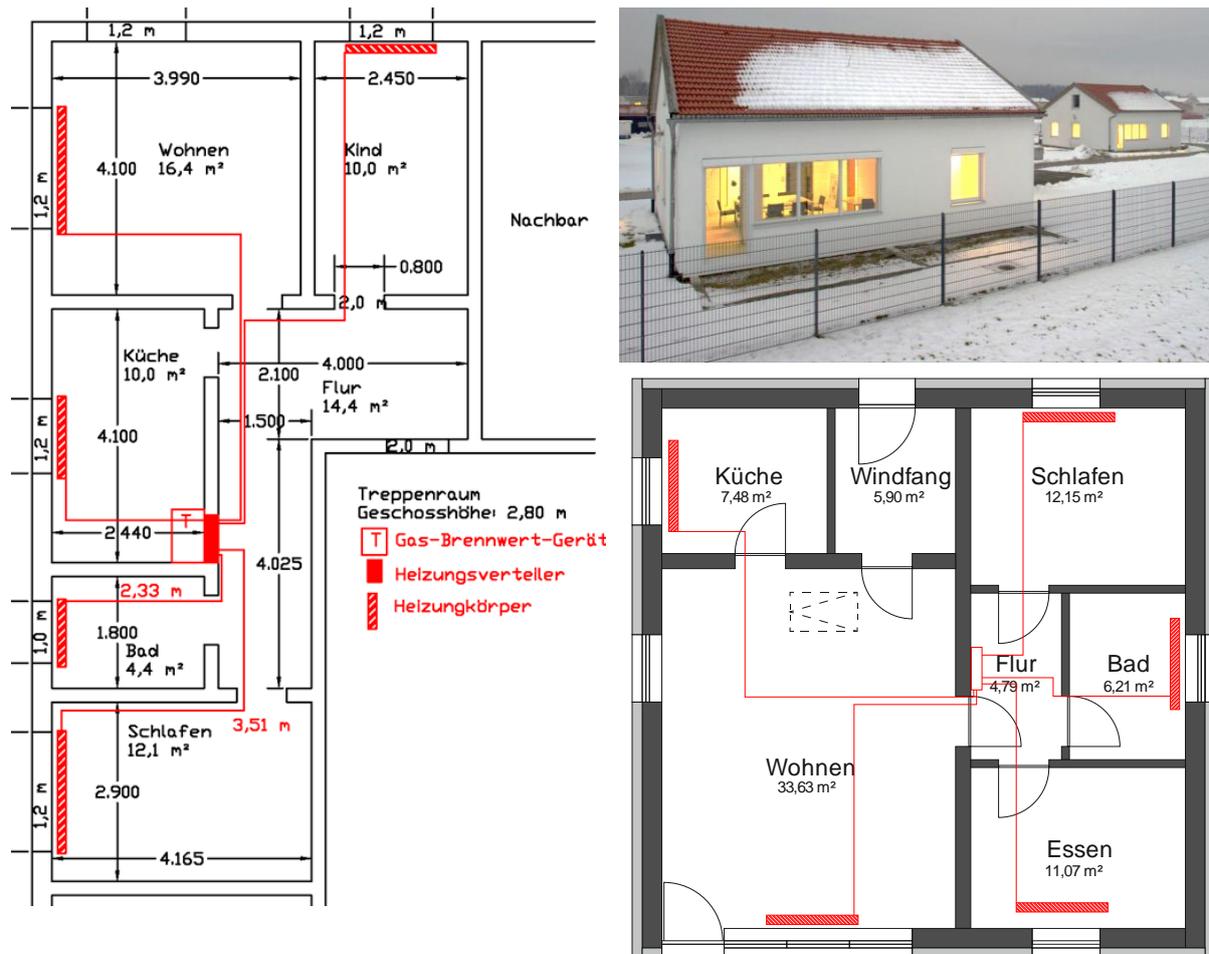


Abbildung 2: Grundriss der Typ-Geschosswohnung (links) und des Erdgeschosses des Zwillingshauses am Fraunhofer IBP (rechts) inkl. Heizkörperpositionen, Verteilnetz und Etagenverteiler.

2.3. Heizsystem

In fast allen hier zusammengefassten Studien wurde für den Wirkungsgrad des in der Simulation betrachteten Gas-Brennwert- bzw. Niedertemperatur-Kessels ein Effizienzkennfeld eines realen Wärmeerzeugers zu Grunde gelegt. Die Hydraulik des Heizsystems wird modelliert und die resultierenden Volumenströme sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen an allen Systemkomponenten in 1-Minuten-Schritten simuliert. Hierdurch können am Wärmeerzeuger stets die aktuellen Arbeitspunkte abgebildet werden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass Gas-Brennwert- und Niedertemperatur-Kessel am maximalen Leistungspunkt nicht pauschal die geringste Effizienz aufweisen. Diese hängt vor allem von der Höhe der Vor- und Rücklauftemperaturen ab. Trinkwarmwasser(TWW)-Zapfungen sind im Durchlauferhitzer-Prinzip berücksichtigt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der die erschließbaren Einsparpotentiale beeinflusst, ist die Auslegung der Heizkörper. Sind diese sehr klein dimensioniert (geringe Heizleistung), müssen die Phasen zur Wiederaufheizung des Gebäudes länger gewählt werden, was wiederum die Dauer der möglichen Absenkerperioden reduziert. In gewissen Grenzen kann eine kleine Heizkörperauslegung durch eine Anhebung der Vorlauftemperatur und eine Erhöhung der maximalen Modulation (Begrenzung der Heizleistung zur Anpassung des Systems an die Heizlastberechnung) des Wärmeerzeugers kompensiert werden. Die Heizkörper in den hier betrachteten Studien sind nach DIN EN 12831 [9] entsprechend der Raumheizlast ausgelegt und berücksichtigen einen Zuschlag für instationäres Aufheizen (30 Minuten).

3. Methodik und Potentiale

3.1. Methode

Für alle betrachteten Fälle werden zwei Szenarien simuliert und miteinander verglichen. Einerseits das Untersuchungsszenario, welches durch Gebäudetyp, Baustandard, Nutzungsprofil und Funktionsumfang der intelligenten Regelung definiert ist. An dieser Stelle sei angemerkt, dass einige der untersuchten Regelungen zusätzlich zur reinen Absenkung der Raumlufttemperaturen über weitere Funktionalitäten wie die Berücksichtigung einer Wetterprognose oder einer Rollladensteuerung verfügen. Zusätzlich wird jeweils ein Referenzszenario berechnet, das aus demselben Gebäude, derselben Nutzung und einem identischen Wärmeerzeuger besteht, aber eine Regelung entsprechend der EnEV-Referenztechnik aufweist. Zwischen jeweils diesen beiden Szenarien wird die Veränderung im Energiebedarf inkl. den entsprechenden ökonomischen Auswirkungen und die Veränderung der Raumlufttemperaturen während der Nutzungszeit (Komfort) bewertet.

3.2. Energie-Einsparpotentiale

Die Bewertung der Energieeinsparpotentiale erfolgt relativ, bezogen auf die jeweilige Referenzvariante, da diese Publikation Wohneinheiten mit sehr unterschiedlichen absoluten Wärmebedarfswerten beinhaltet. Hier muss zwischen Einsparung bezüglich der Endenergie für Heizung und Heizung inkl. TWW-Bereitung unterschieden werden, da die absolute Einsparung dieselbe ist, jedoch nicht der absolute Bedarf, auf den die Einsparung bezogen wird. Entsprechend fallen die relativen Reduktionen bezogen auf den Gesamtbedarf von Heizung und TWW-Bereitung (siehe Abbildung 3) geringer aus als bei Bezug ausschließlich auf den Bedarf für die Gebäudebeheizung (in dieser Publikation nicht weiter thematisiert). Abbildung 3 zeigt die ermittelten Einsparpotentiale für den Neubau und den unsanierten Altbau. Es wird sowohl nach der Haushaltsgröße (Personenanzahl) als auch nach dem Typ der Wohneinheit unterschieden. Hierbei zeigt sich, dass die Potentiale bei geringer Haushaltsgröße und beim Einfamilienhaus höher sind. Bei kleinen Haushalten mit wenigen Personen sind die durchschnittlichen Abwesenheitszeiten und damit die möglichen Absenkezeiträume länger. Die Geschosswohnung kühlt sich wegen der Nachbarwohnungen während der Absenkezeiten langsamer aus, weswegen sich die Temperaturdifferenz im Heizperiodenmittel zur Außenluft weniger stark reduziert als beim EFH. Eine detailliertere Analyse der Einsparpotentiale findet sich in [10].

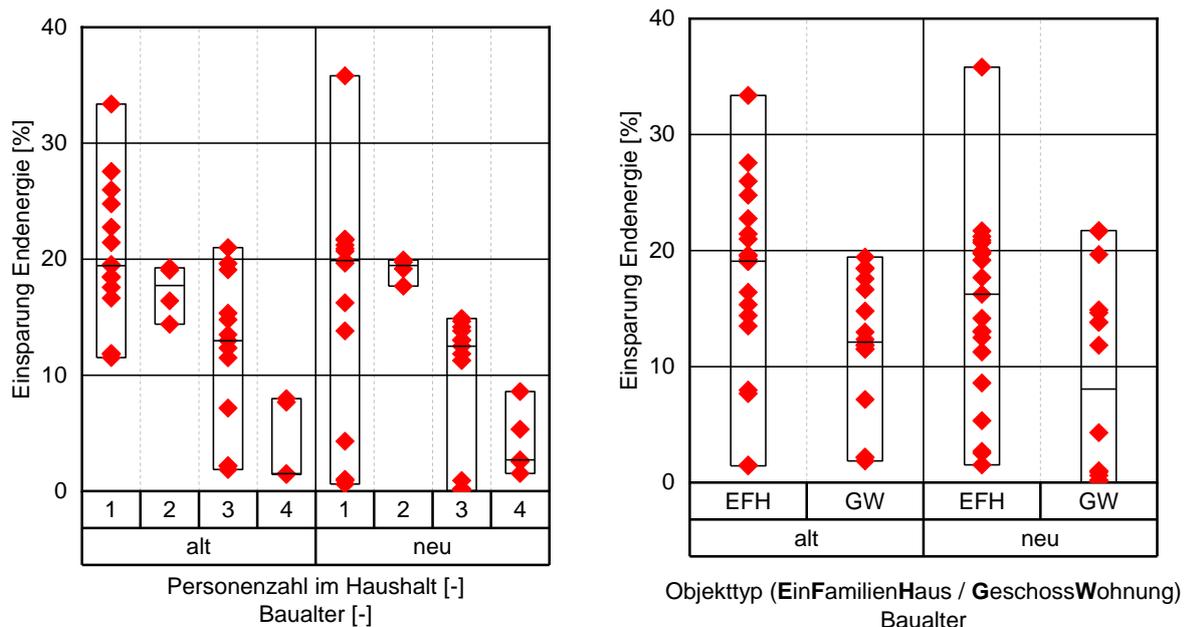


Abbildung 3: Prozentuale Einsparpotentiale beim Endenergiebedarf für Heizung und Trinkwarmwasser in Abhängigkeit von der Haushaltsgröße und dem Baualter (links) sowie in Abhängigkeit von der Art der Wohneinheit und dem Baualter (rechts).

3.3. Ökonomische Bewertung

Zur Bewertung der ökonomischen Effekte wird die absolute energetische Einsparung [kWh/a] mit einem Gaspreis von 5,6 ct/kWh multipliziert. In Abbildung 4 zeigt sich, dass die ökonomischen Einsparpotentiale, analog zu den energetischen Einsparpotentialen, mit kleinerer Haushaltsgröße steigen. Allerdings kann ebenfalls erkannt werden, dass diese Potentiale sowohl bei der Geschosswohnung als auch im Neubaubereich geringer sind, was in den absolut geringeren Wärmebedarfswerten begründet ist.

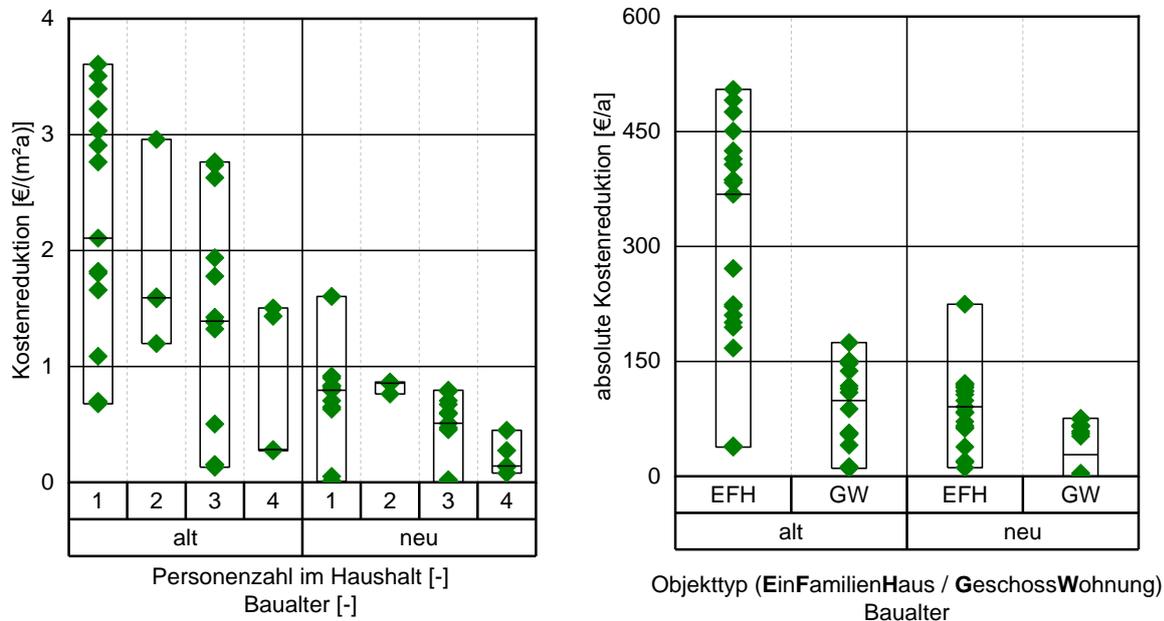


Abbildung 4: Ökonomische Einsparpotentiale für die Heizung in Abhängigkeit von der Haushaltsgröße und dem Baualter (links) sowie in Abhängigkeit von der Art der Wohneinheit und dem Baualter (rechts).

3.4. Auswirkungen auf das Raumklima

Zur Bewertung des Einflusses auf das Raumklima wird sowohl für den untersuchten Fall mit intelligenter Raumregelung als auch für den dazugehörigen Referenzfall der Anteil an Stunden in der Heizperiode berechnet, in denen sich, während der Nutzungszeiten der Räume (Nutzungsprofil), die Raumlufttemperaturen außerhalb der Komfort-Kategorie II (Neubau) bzw. Kategorie III (unsaniierter Bestandsbau) nach DIN EN 15251 [11] befinden. Hieraus wird die relative Veränderung zum Referenzfall ermittelt. Diese Veränderung ist in Abbildung 5 in Abhängigkeit von dem relativen energetischen und dem ökonomischen Einsparpotential dargestellt. Es ist ein gewisser Zusammenhang zwischen Einsparpotential und Veränderung des Komforts erkennbar, allerdings mit einer starken Streuung. Dies zeigt, dass die Einsparung teils mit einer gewissen Reduktion des Komforts einhergeht, vor allem aber, dass die Qualität der Regelung bzw. deren Parametrisierung ausschlaggebend für das Raumklima ist. Bemerkenswert sind vor allem die negativen Werte auf der X-Achse auf der linken Seite beider Grafen. Hier zeigt sich, dass es möglich ist, sowohl das Raumklima zu verbessern als auch gleichzeitig Energie bzw. Geld zu sparen.

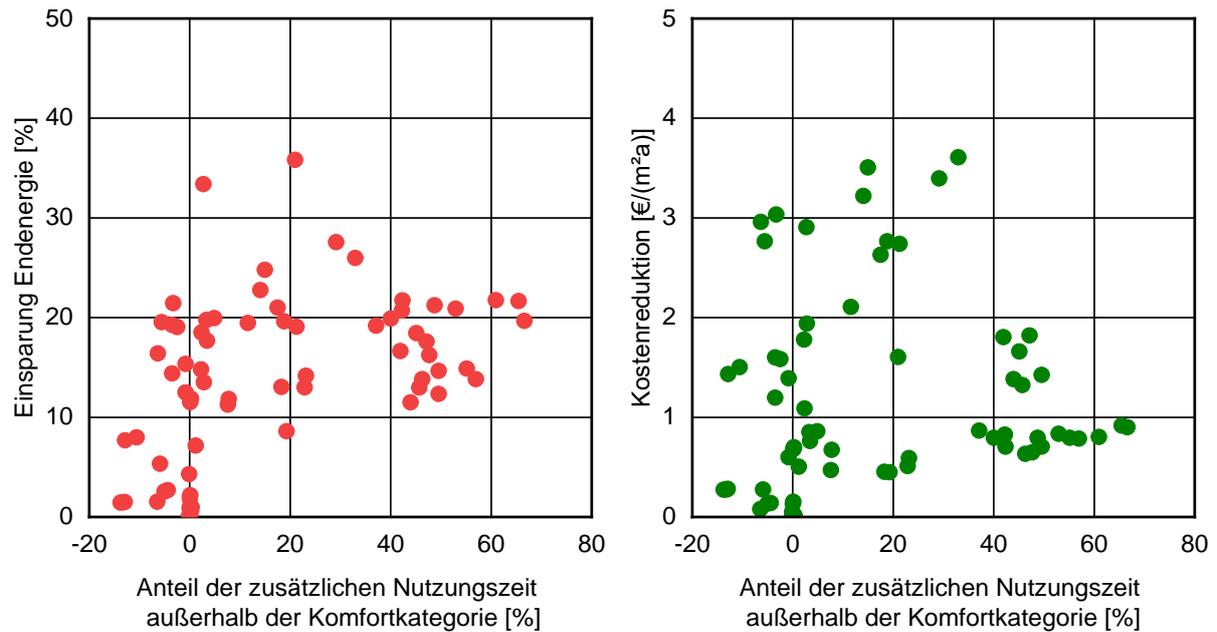


Abbildung 5: Prozentuale Erhöhung des Anteils der Nutzungszeiten außerhalb der zulässigen Komfortkategorie bezogen auf die Referenzregelung. Die negativen Werte auf den linken Seiten der X-Achsen entsprechen somit einer Verbesserung des thermischen Raumklimas. Links dargestellt in Abhängigkeit von der prozentualen Endenergieeinsparung, rechts vom spezifischen Energiekostenreduktionspotenzial.

4. Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung werden mehrere Industriestudien zusammengefasst, die sich mit den Einsparpotentialen der intelligenten Regelung von Gasheizungen bzw. Raumlufttemperaturen beschäftigen. Es zeigt sich, dass diese Potentiale umso größer sind, je kleiner die Haushaltsgröße (wenig Personen) und je höher der absolute Energiebedarf der betrachteten Wohneinheit ist. Die maximal erreichbaren Energieeinsparungen der hier betrachteten Szenarien liegen im Bereich von 30 % bzw. bei 500 €/a. Eine Verringerung des Temperaturkomforts findet nicht zwingend parallel statt. Für die Realisierung dieser Einsparpotentiale ist es einerseits erforderlich, dass es ausreichend lange Abwesenheitszeiten gibt, in denen die Raumlufttemperaturen ohne Komforteinbußen reduziert werden können, und andererseits, dass das Heizsystem nicht unterdimensioniert ist und somit ein Wiederaufheizen der Räume innerhalb einer möglichst kurzen Zeitspanne erlaubt. Weiterführende Analysen finden sich beispielsweise in [10] und [12].

5. Literaturverzeichnis

- [1] EnEV - Energieeinsparverordnung – Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden – Stand der Zweiten Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013 (BGBl. I S. 3951).
- [2] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (GebäudeEnergieGesetz - GEG) vom 8.08.2020.
- [3] DIN V 18599: Teil1-10:2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.
- [4] Eurostat, Harmonized European Time of Use Survey, 2000.
- [5] Bayerische Landesamt für Statistik, «Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung: Statistischer Bericht. Version für 2014 verfügbar unter https://www.statistik.bayern.de/medien/presse/156_2015_56_f_statistische_bericht.xls,» 28 06 2016. [Online]. Available: https://www.statistik.bayern.de/medien/presse/156_2015_56_f_statistische_bericht.xls.
- [6] Bayerisches Landesamt für Statistik, «Ergebnis des Zensus 2011 zum Berichtszeitpunkt 9. Mai 2011, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014,» 28 06 2016. [Online]. Available: https://ergebnisse.zensus2011.de/#dynTable:statUnit=GEBAEUDE;absRel=ANZAHL;ags=09;agsAxis=X;yAxis=BAUJAHR_MZ.
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand, 7. April 2015.
- [8] H. Sinnesbichler und I. Heusler, «Zwillingsforschung in der Bauphysik,» HLH, Bd. 66, Mai 2015.
- [9] DIN EN 12832 Beiblatt 1:2008-07: Heizsysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Nationaler Anhang NA.
- [10] M. Kersken, H. Sinnesbichler und H. Erhorn, «Analyse der Einsparpotenziale durch Smarthome und intelligente Heizungsregelungen,» Bauphysik, pp. 276 - 285, DOI: 10.1002/bapi.201800003, Oktober 2018.
- [11] DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.
- [12] M. Kersken und H. Sinnesbichler, «IBP-MITTEILUNG 527 - SIMULATIONSSTUDIE ZUM ENERGIEEINSPARPOTENTIAL EINER HEIZUNGSREGELUNG MIT ABWESENHEITSERKENNUNG UND WETTERPROGNOSE,» Fraunhofer IBP, Stuttgart, 2013.

Low-Cost Gebäudemonitoring zum Selbermachen

Prof. Dr. Olivier Steiger
Institut für Gebäudetechnik und Energie
Hochschule Luzern, Technik & Architektur
Horw, Schweiz



Low-Cost Gebäudemonitoring zum Selbermachen

1. Einleitung

Technisches Monitoring ist der Oberbegriff für die systematische Erfassung und Überwachung von Zuständen und Prozessen mit technischen Mitteln [1]: Betriebszustände von technischen Anlagen, elektrische und thermische Energie, Wasser- und Brennstoffverbrauch, Raumkonditionierung, Nutzerverhalten, bauphysikalische Überwachung. Monitoring-Systeme sind für den energieeffizienten und komfortablen Betrieb von Gebäuden unerlässlich. Die Ziele sind vielfältig:

- Transparenz über Optimierungen in Planung und Betrieb schaffen;
- Ursachen für den Performance Gap ermitteln. D.h. Abweichungen der Ist-Verbrauchswerte von den Planungs- oder Soll-Werten;
- Gewünschte Gebäudeperformance sicherstellen und aufrechterhalten;
- Erfolg von Energieoptimierungsmaßnahmen überprüfen;
- Verlässliche Grundlagen für weitere Optimierungsschritte schaffen.

Heutige Monitoring-Lösungen sind aufgrund von Hardware-, Installations- und Wartungskosten oft ziemlich teuer. Gleichzeitig besteht ein Bedarf an kostengünstigen Überwachungssystemen, insbesondere für kleinere Gebäude.

In diesem Beitrag wird ein kostengünstiges Gebäudemonitoring-System vorgestellt, das auf offenen Technologien basiert. Alle Anleitungen und die Software zu dieser Lösung sind auf einer speziellen Website verfügbar [2]. Das System besteht aus mehreren handelsüblichen Messgeräten und einer Open-Source Software zur Datenaggregation und Visualisierung. Darüber hinaus wird eine detaillierte Anleitung für den Aufbau und die Nutzung des Systems bereitgestellt. Die Monitoring-Lösung erfasst den Energieverbrauch (Strom, Wasser, Wärme) und Raumkomfort-Werte (Raumtemperatur, Luftqualität, Luftfeuchtigkeit). Mit der neuen Lösung erhalten interessierte Personen / Institutionen / Verbände einen einfachen und kostengünstigen Einblick in die für den Energieverbrauch und den Komfort ihrer Gebäude relevanten Parameter. Der Zielpreis für die Hard- und Software, Installation, Datenübertragung und Visualisierung liegt deutlich unter CHF 1'000.-.

Dieser Artikel ist wie folgt gegliedert. Abschnitt 2 gibt einen Überblick über den Stand der Technik. Im Abschnitt 3 werden die Architektur und die Komponenten der vorgeschlagenen Lösung beschrieben. Im Abschnitt 4 werden erste Testergebnisse vorgestellt, die mit einer Prototyp-Implementierung erzielt wurden. Abschnitt 5 letztendlich schließt das Papier mit einem Ausblicken ab.

2. Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik im Hinblick auf kostengünstige Überwachungslösungen für das Gebäude untersucht. Neben der wissenschaftlichen Literatur wurden auch die verfügbaren Produkte und gemeinschaftliche Initiativen untersucht, da diese wertvollen Einblicke in die aktuelle Marktsituation bieten.

Kostengünstige Monitoring-Systeme wurden in mehreren Veröffentlichungen untersucht. In einem Beitrag [3] wird ein Energieverbrauchs-Messstecker beschrieben, der den Energieverbrauch von Haushaltsgeräten in Echtzeit überwacht und steuert. Der Entwurf basiert auf preiswerter, handelsüblicher Hardware für die Spannungs- und Strommessung. Eine ähnliche Lösung wird in [4] vorgestellt. In einer anderen Veröffentlichung [5] wird ein kostengünstiges, nicht-invasives System zur Überwachung des Energieverbrauchs im Haushalt vorgestellt. Das Design verwendet Open-Source Hardware auf der Basis der Arduino-Architektur und handelsübliche Sensoren für die Strommessung. In [6] wird ein echtzeitbasiertes Energieüberwachungssystem vorgeschlagen, das den Energieverbrauch in Haushalten misst und die Daten in die Cloud hochlädt. Die Stromverbrauchsdaten werden über die elektrische LED-Schnittstelle von herkömmlichen Stromzählern extrahiert. In [7] wird

ein IoT-Gerät vorgestellt, das zur Überwachung des Stromverbrauchs in einem Gebäude entwickelt wurde. Es besteht aus drei handelsüblichen Modulen, darunter ein elektrischer Energiesensor, ein Arduino Nano Mikrocontroller und ein kommerzielles Serial-to-WiFi Board. In [8] wird eine Softwareplattform für ein kostengünstiges, energieeffizientes und sicheres Gebäudeenergiemanagement und die Steuerung mehrerer Gebäude von einer Fernsteuerungszentrale über das Internet vorgeschlagen.

Verschiedene gemeinschaftliche Initiativen haben sich ebenfalls kostengünstigen Überwachungslösungen für das Gebäude gewidmet. Der Open Energy Monitor [9] ist ein Gemeinschaftsprojekt zur Messung von Strom, Temperatur und Luftfeuchtigkeit mit Open-Source Hardware und Software. Die Basis dafür ist ein Raspberry Pi-basiertes Messsystem. Das System kann durch verschiedene Strom- und Komfortmesssensoren sowie eine Web-App zur Datenverarbeitung und Visualisierung erweitert werden. Babelbee [10] ist ein quelloffener Do-it-yourself-Stromzähler mit zugehöriger Open-Source-Datenvisualisierungssoftware. Eine ähnliche, Arduino-basierte Lösung wurde von foobarflies [11] entwickelt. Schließlich bieten mehrere Unternehmen proprietäre Lösungen zur kostengünstigen Gebäudeüberwachung an.

Viele der genannten Lösungen sind auf elektrische Messungen beschränkt. Thermische Energie, Brennstoffverbrauch und Raumbedingungen werden nicht berücksichtigt. Auch ist es oft nicht möglich, vorhandene Messungen, z.B. von Energiezählern, in die Überwachung miteinzubeziehen. Schließlich werden die Monitoring-Daten im Allgemeinen als Zeitreihen (d.h. Rohdaten) zusammen mit einigen grundlegenden Statistiken wie Mittelwert, Standardabweichung und Histogrammen dargestellt. Neuere Studien haben jedoch gezeigt, dass in der Praxis oft komplexere und anwendungsorientierte Visualisierungen erwartet werden [12].

3. Systemübersicht

In diesem Abschnitt werden die Architektur und die Komponenten des vorgeschlagenen kostengünstigen Gebäudeüberwachungssystems beschrieben.

3.1. Architektur

Die Architektur des Low-Cost Gebäudemonitoring-Systems ist in der Abbildung 1 dargestellt. Die Überwachungsdaten stammen aus drei verschiedenen Quellen:

- **LoRaWAN-Sensoren.** Dies ist der bevorzugte Datenübertragungsweg. Er ermöglicht die Datenerfassung in (fast) Echtzeit, z.B. für viertelstündliche oder tägliche Werte. Die einzelnen Messgeräte (Sensoren) werden entweder direkt oder über ein lokales Gateway an das öffentliche LoRaWAN-Netz «The Things Network» (TTN) angeschlossen [13]. Die Nutzung von TTN ist kostenlos, die Integration neuer Messgeräte ist einfach. Außerdem bietet TTN einen Cloud-Speicher mit einer Kapazität von sieben Tagen. Dies verhindert Datenverluste im Falle eines vorübergehenden Ausfalls der «lcm»-Software.
- **CSV-Import.** Es ist auch möglich, Monitoring-Daten aus kommagetrennten Dateien (CSV) zu importieren. Dies wird häufig verwendet, um Messdaten von Energieversorgungsunternehmen oder Immobiliengesellschaften einzulesen.
- **Zeitreihen-Datenbank.** Schließlich ist es möglich, Daten aus einer influxDB-Zeitreihendatenbank [14] einzulesen. Diese wird typischerweise verwendet, um Daten aus Drittsystemen wie die Gebäudeautomation einzulesen.

Alle Daten werden dann mit der eigens entwickelten Software «lcm» gespeichert, aggregiert und visualisiert (Abschnitt 3.3).

Datenerfassung

LoRaWAN-Sensoren (über TTN) → Raumbedingungen, Zähler
 CSV-Import → Zähler, Daten von EVU
 Zeitserien-DB → Systeme von Drittanbietern

Datenübertragung

The Things Network
 Cloud-Speicher: 7 Tage

Datensammlung und Visualisierung

„lcm“-Software der Hochschule Luzern
 Maßgeschneiderte Visualisierung für verschiedene Gebäudeoptimierungen

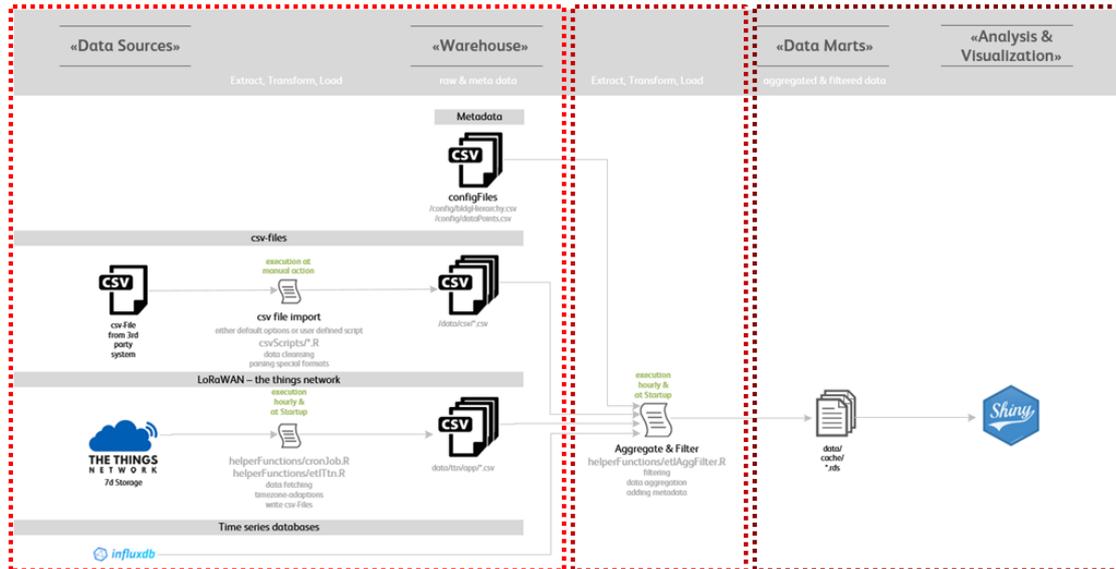


Abbildung 1: Architektur des Low-Cost Gebäudemonitoring-Systems. Die Überwachungsdaten stammen aus drei verschiedenen Quellen: (i) LoRaWAN-Sensoren; (ii) CSV-Import; (iii) Zeitreihendatenbank. Die Daten der LoRaWAN-Sensoren werden über The Things Network übertragen und in der TTN-Cloud für max. 7 Tage abgespeichert. Alle Daten werden mit der eigens entwickelten «lcm»-Software aggregiert und visualisiert.

3.2. Messgeräte

Messdaten können im Allgemeinen nicht direkt von bestehenden Strom- und Wärmezählern abgegriffen werden. Die Hauptgründe dafür sind, dass zahlreiche verschiedene Zählertypen im Einsatz sind (von elektromechanischen bis hin zum intelligenten Zähler) und dass ihre Kommunikationsschnittstellen – sofern vorhanden – nicht einheitlich und oft nur für die Versorgungsunternehmen zugänglich sind. Daher wurde beschlossen, das kostengünstige Überwachungssystem so autark wie möglich zu gestalten. Das bedeutet, dass die erforderlichen Messdaten vor Ort mit einfach zu installierenden, drahtlosen Messgeräten erfasst werden.

Um die Kosten zu minimieren werden, wann immer möglich, nicht-invasive Messgeräte verwendet. Dies senkt die Kosten für die Installation, da sie vom Endnutzer vorgenommen werden kann und keine Strom- oder Wasserleitungen unterbrochen werden müssen. Für die Strommessung stehen induktive Sonden zur Verfügung. Komplizierter ist die Situation bei der Wärmemessung. Hier sind nicht-invasive Messmethoden grundsätzlich möglich. Diese sind jedoch in der Regel teuer und hängen vom Wärmeträger, Rohrdurchmesser, Material usw. ab.

In der vorliegenden, prototypischen Implementierung des Low-Cost Gebäudemonitorings werden die folgenden Messgeräte unterstützt. Diese werden «out of the box», d.h. ohne weitere Kalibrierung, verwendet.

- Raumkomfortsensor *Avelon – Wisely Standard* → Raumtemperatur, Feuchte
- Raumkomfortsensor *Avelon – Wisely Carbonsense* → Raumtemperatur, Feuchte, Luftqualität (CO₂-Konzentration)
- Klimasensor *Dragino – LHT65* → Außentemperatur, Vorlauftemperatur der Zentralheizung
- Impulzzähler *nke WATTECO – Flash'O* → wird zum Auslesen von alten Zählern verwendet. Z.B. Stromverbrauch, Wärmeverbrauch, Wasserverbrauch.

3.3. Monitoring Software

Die maßgeschneiderte Monitoring-Software «lcm» der Hochschule Luzern besteht aus mehreren Datenauswertungsmodulen und Konfigurationsfunktionen. Jedes Modul führt eine andere Auswertung der Monitoring-Daten durch. D.h. jedes Modul ist auf unterschiedliche Anwendungen oder Optimierungsmaßnahmen ausgerichtet. Eine Übersicht aller verfügbaren Module ist in der Tabelle 1 dargestellt.

Darüber hinaus stellt die «lcm»-Software Konfigurationsfunktionen für die Integration der Messgeräte (Abschnitt 3.2) und die Definition des zu überwachenden Gebäudes zur Verfügung. Die Software wurde in der Programmiersprache R entwickelt und ist öffentlich zugänglich (inkl. Quellcode) auf der Entwicklungsplattform GitHub [15].

Tabelle 1: Übersicht über die Datenauswertungsmodule der Monitoring-Software «lcm».

Modul	Zweck	Visualisierungen	Datenpunkt(e)
Room > Temp vs. Hum	Komfortanalyse bezüglich Feuchte und Temperatur (Überhitzung, Schimmelproblematik, trockene Luft im Winter)	-Luftfeuchte vs. Raumtemperatur -Mollier-h,x-Diagramm	-Raumtemperatur -Relative Raumfeuchte
Room > Room vs. Outside Temp	Reduktion der Überhitzungstunden	-Raum- vs. Aussentemperatur	-Raumtemperatur -Aussentemperatur
Room > Air Quality	Komfortanalyse bezüglich Raumluftqualität (oft problematisch in Schlafzimmern)	-CO ₂ vs. Zeit -Untere und obere Quantile	-Raumluftqualität (CO ₂)
Room > Temp Reduction	Reduktion Heizenergie durch Senkung der Raumtemperatur	-Raumtemperatur vs. Zeit -Durchschnitt, Sollwert, Abweichung	-Raumtemperatur
Flat > Electricity	Analyse und Optimierung Stromverbrauch Untersuchung Standby-Verbrauch	-Tagesverbrauch vs. Zeit -Standby-Verbrauch	-Stromverbrauch Wohnung
Flat > Heating	Analyse und Optimierung Heizenergie-Verbrauch Umrechnung in kWh/m ²	-Relative Heizenergie Gebäude pro Jahr bzw. Monat -Relative Heizenergie Wohnung pro Jahr bzw. Monat	-Heizwärmeverbrauch Wohnung
Flat > Hot Water	Analyse und Optimierung Warmwasser-Verbrauch Umrechnung in Liter pro Person und Tag	-Warmwasserverbrauch Gebäude pro Jahr bzw. Monat	-WW-Verbrauch Wohnung
Central > Heating Signature	Analyse der Gebäudesignatur Berechnung der effektiven Heizgrenze	-Signatur Heizung	-Energieverbrauch Zentralheizung -Aussentemperatur
Central > Heating Curve	Analyse und Optimierung der Heizkurve	-Heizkurve (effektiv)	-Vorlauftemperatur Zentralheizung -Energieverbrauch Zentralheizung -Aussentemperatur

4. Ergebnisse

Bisher wurde das Low-Cost Gebäudemonitoring nur mit anonymisierten Daten aus einem einzigen Mehrfamilienhaus getestet. Das Gebäude befindet sich in der Zentralschweiz und besteht aus vier Wohnungen. Jede Wohnung wird von einer Familie bewohnt. Die Testdaten entsprechen einer Messperiode von zwei Jahren. Eine Live-Demo des Systems mit den oben erwähnten Daten ist online verfügbar [16].

Ein beispielhafter Screenshot der «lcm»-GUI ist in der Abbildung 2 zu sehen. Der Screenshot zeigt Überwachungsdaten aus der Wohnung A. Diese werden mit dem Datenauswertungsmodul «Room > Temp vs. Hum» dargestellt. Alle verfügbaren Module sind im linken Teil der GUI zugänglich. In der Hauptanzeige werden die Daten in zwei Diagrammen dargestellt: Raumtemperatur vs. relative Feuchte und Mollier-h,x-Diagramm. Der grüne Bereich definiert Temperatur-Feuchtigkeits-Paare, die als angenehm empfunden werden («Komfortzone»).

Mit dieser Darstellung lassen sich Messungen, die außerhalb des angestrebten Komfortbereichs liegen, leicht erkennen. Ähnlich wie bei den anderen Modulen ist es möglich, die Daten übersichtlich und zielgerichtet zu visualisieren. Darüber hinaus gibt die Software Empfehlungen für die Interpretation der Messdaten und mögliche Optimierungsmaßnahmen. Zu beachten ist, dass diese Empfehlungen statisch sind und die tatsächlichen Messungen nicht berücksichtigen.

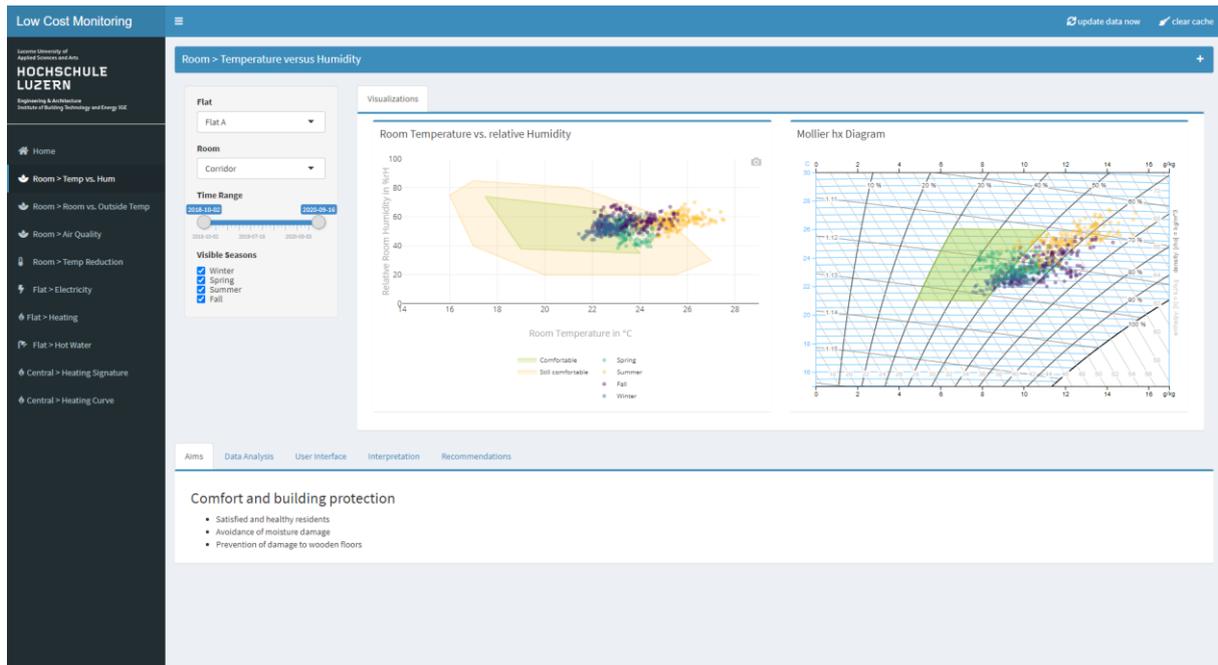


Abbildung 2: Screenshot der Überwachungssoftware «lcm». Der Screenshot zeigt Monitoring-Daten aus einer einzelnen Wohnung. Diese werden mit dem Datenauswertungsmodul «Room > Temp vs. Hum» visualisiert. Alle Module sind auf der linken Seite zugänglich. In der Hauptanzeige werden die Daten in zwei Diagrammen dargestellt: Raumtemperatur vs. relative Feuchte (links); Mollier-h,x-Diagramm (rechts). Der Komfortbereich wird als grüne Fläche dargestellt. Auf der linken und oberen Seite der Diagramme können verschiedene Parameter eingestellt werden. Am unteren Rand werden Empfehlungen zur Interpretation der Messdaten und mögliche Optimierungsmaßnahmen gegeben.

5. Schlussfolgerungen und zukünftige Arbeiten

Das beschriebene Low-Cost Gebäudemonitoring-System bietet eine niedrighschwellige Möglichkeit, Überwachungsdaten zielgerichtet zu sammeln und zu visualisieren. Es stellt eine flexible Lösung dar die es erlaubt, rasch Dinge auszuprobieren und zu prototypisieren, d.h. die Monitoring-Lösung an die eigenen Wünsche und Anwendungen anzupassen. Außerdem ist die Lösung dafür vorgesehen, von Laien (z.B. dem Endnutzer) gemäß der auf der Projektwebsite bereitgestellten Anleitung zusammengesetzt und in Betrieb genommen zu werden [1]. Die Zusammenstellung des Systems durch die Hochschule Luzern ist also nicht erforderlich und auch nicht vorgesehen.

Es ist jedoch zu beachten, dass die vorgeschlagene Lösung bisher nur ein frühes Prototypenstadium erreicht hat und in mehrfacher Hinsicht weiterentwickelt werden muss. Zunächst sollte das System mit einer größeren Anzahl von Gebäuden validiert werden. Auf diese Weise lassen sich wertvolle praktische Erfahrungen sammeln und die Lösung entsprechend verfeinern. Außerdem müssen Softwarefehler beseitigt, die Dokumentation weiterentwickelt und zusätzliche Funktionen hinzugefügt werden, z.B. die Unterstützung von Projekten mit mehreren Gebäuden.

Zusätzlich zu den oben genannten Punkten sollen in Zukunft einige weitere, grundlegende Herausforderungen angegangen werden:

- Automatische Plausibilitätsprüfung und Fehlerkorrektur der Monitoring-Daten;
- Implementierung von zusätzlichen Modulen zur Datenauswertung. Z.B. Optimierung von Kühl- und Lüftungsanlagen;
- Automatische Dateninterpretation, z.B. durch maschinelle Lernverfahren;
- Generierung von fallspezifischen Optimierungsempfehlungen;
- Erweiterte Visualisierungen, z.B. abgeleitet aus früheren Arbeiten [12].

6. Danksagung

Die Autoren möchten sich bei folgenden Personen und Institutionen für die großzügige Unterstützung herzlich bedanken: Bundesamt für Energie, Verein Minergie, Energiekonferenz der Kantone der Nordwestschweiz, Kanton Luzern, Ökozentrum Langenbruck.

7. Literaturverzeichnis

- [1] AMEV, «Technisches Monitoring 2020 – Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung», Empfehlung Nr. 158, 2020.
- [2] Hochschule Luzern, «lcm – Low-Cost Monitoring», <https://hslu-ige-laes.github.io/lcm/> (accessed: 29.04.2021).
- [3] S. Sohaib, I. Sarwar, M. H. Iftikhar and A. Mahmood, "A low cost smart energy monitoring and control system for smart buildings," 5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2016.0598.
- [4] T. M. Serrano, L. C. P. da Silva, L. Pereira, F. Andreoli, T. Ji and F. Fruett, "A Low-cost Smart Plug with Power Quality and Energy Analyzer Features," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEST.2019.8849112.
- [5] A. Ravishankar, A. Vignesh, V. Vel, Dhiwaakar Purusothaman S R R and V. Vijayaraghavan, "Low-cost non-intrusive residential energy monitoring system," 2014 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), 2014, pp. 130-134, doi: 10.1109/SusTech.2014.7046232.
- [6] A. Baruah, P. R. Borah and D. Chatterjee, "Low-Cost Power Monitoring System," 2019 2nd International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), 2019, pp. 318-321, doi: 10.1109/PEEIC47157.2019.8976807.
- [7] S. Wasoontarajaroen, K. Pawasan and V. Chamnanphrai, "Development of an IoT device for monitoring electrical energy consumption," 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICITEED.2017.8250475.
- [8] H. Yoon, Y. Jeong, W. Park, J. Han, C. Choi and I. Lee, "A distributed platform for low-cost, energy-efficient, and secure building energy management and control," ICTC 2011, 2011, pp. 274-275, doi: 10.1109/ICTC.2011.6082596.
- [9] The OpenEnergyMonitor project, «OpenEnergyMonitor», <https://openenergymonitor.org/> (accessed: 29.04.2021).
- [10] Babelbee Project, «Babelbee», <http://www.babelbee.org/> (accessed: 29.04.2021).
- [11] Eric & Cyril, «foobarflies», <https://www.foobarflies.io/creating-a-simple-energy-monitor/> (accessed: 29.04.2021).
- [12] R. Marek *et al.*, «EVISU: Energievisualisierung Bottom-Up», project report Nr. SI/501815, Swiss Federal Office of Energy, 2020.
- [13] The Things Industries, «Building a global open LoRaWAN network», <https://www.thethingsnetwork.org/> (accessed: 29.04.2021).
- [14] Influxdata, «Act in Time. Build on InfluxDB. », <https://www.influxdata.com/> (accessed: 29.04.2021).
- [15] Hochschule Luzern, «lcm – Low-Cost Monitoring. GitHub repository», <https://github.com/hslu-ige-laes/lcm> (accessed: 29.04.2021).
- [16] Hochschule Luzern, «lcm – Low-Cost Monitoring. Live demo», <https://hslu-ige-laes.shinyapps.io/lowcostmonitoring/> (accessed: 29.04.2021).

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien
**Gebäudetechnik im Kontext
des nachhaltigen Bauens**

Einfach Lüften

Heinrich Huber
Hochschule Luzern, IGE
Horw, Schweiz



Einfach Lüften

1. Einleitung

Bei der Wahl des Wohnungslüftungskonzepts wird heute oft zwischen einer Minimallösung mit manueller Fensterlüftung plus Abluftventilatoren in Bad/Dusche/WC und einem Vollsystem mit mechanischer Be- und Entlüftung aller Räume entschieden. Die Minimallösung ist zwar kostengünstig, aber die Raumluftqualität und der Feuchteschutz hängen massgebend vom Nutzungsverhalten ab. Zudem ist keine Wärmerückgewinnung (WRG) möglich. Demgegenüber sind Vollsysteme, insbesondere diejenigen mit WRG, aufwendig und lassen sich in bestehenden Gebäuden wegen den Zuluftleitungen teilweise nur schwer bis kaum umsetzen. Dezentrale Lösungen wie Einzelraum-Lüftungsgeräte und Abluftanlagen mit Außenbauteil-Luftdurchlässen (ALD) lassen sich einfacher installieren. Die Wartung (z. B. Filterwechsel) ist aber anspruchsvoll und wird in der Praxis teilweise unvollständig wahrgenommen, was zusammen mit den Systemeigenschaften, wie hohe Empfindlichkeit des Luftstroms, zu erheblichen Disbalancen mit entsprechender Schwächung der Energieeffizienz und zu tiefen Luftvolumenströmen führt. In zwei Praxisuntersuchungen der HLSU wurde dies für über 30 Wohnungen dokumentiert [1] [2].

Für Modernisierung und Neubau sind kostengünstige Lösungen gesucht, die den Feuchteschutz gewährleisten, eine WRG ermöglichen und zudem einen geringen Wartungsaufwand erfordern. Das Konzept der Verbundlüftung bietet eine gute Chance dazu.

2. Verbundlüftung mit aktiver Verteilung

Systeme mit aktiven Verbundlüftern (auch aktive Überströmer genannt) sind auf dem Markt eingeführt und seit 2021 auch in der schweizerischen Wohnungslüftungsnorm SIA 382/5 [3] geregelt. Als Zuluftbereich dient der offene Raum der Wohnung, an den die Zimmer angrenzen. Er umfasst in der Regel den Korridor und den Wohnbereich. Hier wird der gesamte Zuluftvolumenstrom der Wohnung zugeführt. Dies kann über einen einzigen Zuluftdurchlass geschehen. In den Ablufträumen Bad, Dusche und WC wird die Abluft abgeführt. Im Verbundbereich liegen die Zimmer. Stehen die Türen offen, sorgt die natürliche Luftbewegung hier für eine ausreichende Umwälzung. Bei geschlossenen Türen gewährleisten die aktiven Verbundlüfter für den Luftaustausch zwischen dem Zuluftbereich und den Räumen im Verbundbereich.

Im Zuluftbereich stellt sich die gleiche Luftqualität ein, wie wenn die gesamte Wohnung ein einziger grosser Raum mit idealer Mischung wäre. Um die geforderte Raumluftqualität zu gewährleisten, muss der Luftvolumenstrom eines Verbundlüfters deshalb grösser sein als der Zuluftvolumenstrom eines Zimmers mit eigener Zuluft.

Zur Dimensionierung des minimalen Zuluftvolumenstroms für die gesamte Wohnung und für die Verbundlüfter kann Abbildung 1 verwendet werden. Das Diagramm basiert auf einer maximalen CO₂-Konzentration der Raumluft von 1400 ppm und der Außenluft von 400 ppm. Die Auslegung erfolgt anhand der geplanten Personenbelegung der Wohnung. Bei drei bis fünf Personen wird davon ausgegangen, dass die Zimmer als Schlafzimmer für zwei Personen genutzt werden können. Bei einer Wohnungsbelegung mit zwei Personen wird vorausgesetzt, dass in einem Zimmer nur eine Person schläft. Alternativ können beide Personen das gleiche Schlafzimmer nutzen, aber dann müssen sie nachts die Schlafzimmertür offenlassen. Der maßgebende Zuluft- und Abluftvolumenstrom einer Wohnung kann erst nach dem Festlegen des Lüftungssystems bestimmt werden. Der minimal erforderliche Abluftvolumenstrom kann allenfalls grösser sein als der mit Abbildung 1 bestimmte minimale Zuluftvolumenstrom. Der höhere der beiden Werte ist entscheidend für die Auslegung der Lüftungsanlage.

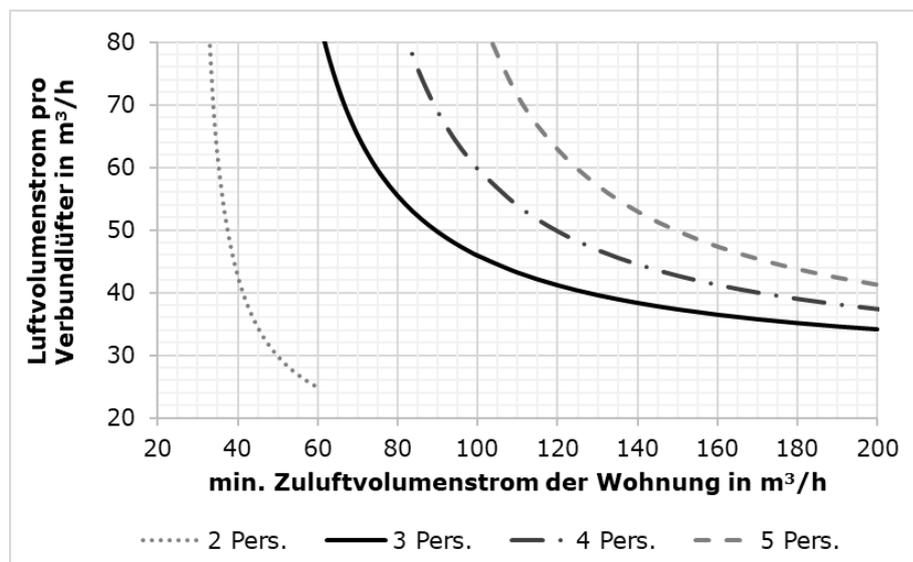


Abbildung 1: Dimensionierung des minimalen Zuluftvolumenstroms von Wohnungen und des Luftvolumenstroms von Verbundlüftern für maximal 1400 ppm CO₂-Konzentration.

Abbildung 2: zeigt ein Beispiel einer 4-Zimmer-Wohnung, die für eine Dauerbelegung mit 3 Personen ausgelegt ist. Die Luftvolumenströme entsprechen den Vorgaben der SIA 382/5. Dargestellt ist der Nachtfall mit einer angenommenen Belegung der Schlafzimmer und dem sich daraus ergebenden CO₂-Gehalt der Raumluft. Im Vergleich mit Abbildung 1 fällt auf, dass die Norm konservative Auslegungswerte vorgibt. Hinweise für die Auslegung und Auswahl von Verbundlüftern finden sich auch im Fachbuch Wohnungslüftung [4], Kapitel 3.4.

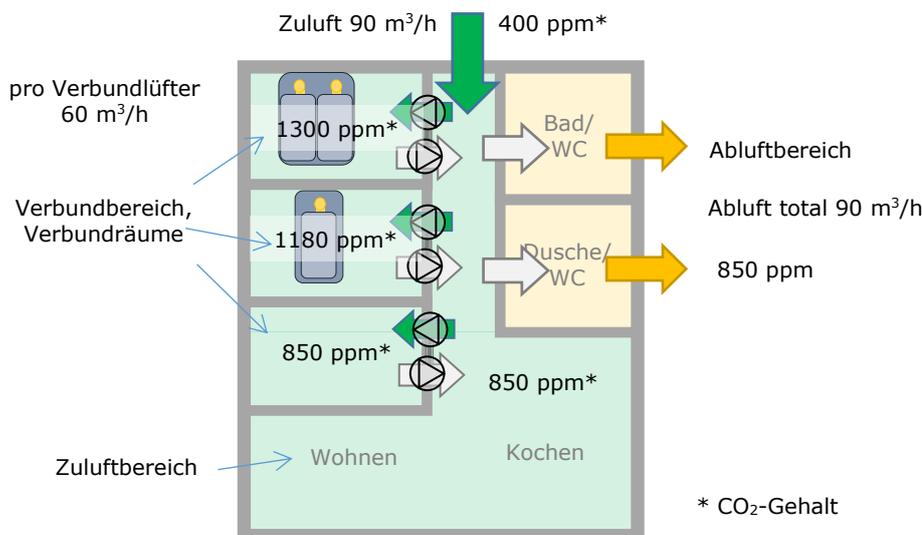


Abbildung 2: Luftverteilung mit aktiven Verbundlüftern am Beispiel einer 4-Zimmer-Wohnung mit Auslegung nach SIA 382/5 (Schematischer Grundriss)

3. Verbundlüftung mit passiver Verteilung

3.1. Allgemeine Hinweise

Bei der Verbundlüftung mit passiver Verteilung werden anstelle von aktiven Verbundlüftern (mit Ventilatoren) passive Verbundlüfter (ohne Ventilatoren) für den Luftaustausch zwischen dem Zuluft- und dem Verbundbereich eingesetzt. Dieses Konzept ist im Minergie-Standard seit 2020 für Erneuerungen zulässig [5]. Zudem finden sich in der Minergie-Broschüre «Gute Raumluft» [6], der Minergie-Anwendungshilfe [7] und in dem Fachbuch Wohnungslüftung, Kapitel 3.5 Hinweise und Anforderungen. Das Prinzip mit freier Verteilung ist nicht in Normen geregelt. Seine Anwendung und Auslegung muss deshalb ausdrücklich in einer Nutzungsvereinbarung festgehalten werden.

Die Antriebskraft für die Luftumwälzung stammt aus der Temperaturdifferenz zwischen den Räumen. In Wohnungen liegen diese Temperaturdifferenzen über das ganze Jahr typischerweise im Bereich von etwa 0,5 K. Damit ein wirksamer Luftaustausch stattfindet, muss die freie Fläche für den Luftaustausch relativ gross sein. Daraus ergibt sich auch der schwerwiegendste Nachteil dieser Lösung: Der Schallschutz, zwischen dem Zuluft- und dem Verbundbereich ist, mindestens dann geschwächt, wenn die Verbundelemente geöffnet sind. Je nach Bauart ist zusätzlich auch der Lichtschutz zwischen den Räumen beeinträchtigt. Die freie Luftverteilung in der Wohnung ist kostengünstig und weitgehend wartungsfrei, aber sie bringt Komforteinbussen mit sich.

3.2. Passive Verbundlüfter

Im Projekt «Analyse vereinfachter Lüftungskonzepte» [8] wurden verschiedene Varianten von passiven Verbundlüftern untersucht. Das Projekt wurde von EnergieSchweiz und von der Stadt Zürich gefördert und von der Geschäftsstelle Minergie fachlich begleitet. Die Wirksamkeit und Grenzen der Luftführungskonzepte wurden mittels Simulationen untersucht. Um die Simulationen zu validieren sowie um weitere Einflussfaktoren zu ermitteln wurden Messungen in der Musterwohnung ROSEG im Labor der TH Rosenheim durchgeführt. Parallel dazu fanden Messungen in zwei real belegten Wohnungen in einer Wohnüberbauung mit einem diesem Lüftungskonzept statt.



Zimmertür

Zimmertüren als passive Verbundlüfter sind nicht nur kostenlos und wartungsfrei, sie führen auch zu Wohnungslüftungssystemen mit tiefen Luftvolumenströmen. Allerdings muss neben dem reduzierten Schallschutz auch der stark reduzierte Lichtschutz in Kauf genommen werden. Die Bewohnerinnen und Bewohner müssen sich zwischen dem Luftaustausch und dem Schall- und Lichtschutz entscheiden. So weist ein Gerichtsurteil in Deutschland darauf hin, dass speziell bei Schlafzimmern offene Türen nachts kein übliches und von einem durchschnittlichen Mieter zu erwartendes Lüftungsverhalten sind [9]. Eine Verbundlüftung über offene Zimmertüren muss daher ausdrücklich vereinbart werden.

Speziell bei bestehenden Gebäuden ist zu beachten, dass die Zimmertür in einer fixen Position stehen bleibt. Das kann ev. mit einem einfachen Rastermechanismus gelöst werden.

Abbildung 3: Zimmertür ca. 6 cm geöffnet

In der Musterwohnung ROSEG der TH Rosenheim wurde der Verlauf des CO₂-Gehalts bei verschiedenen Öffnungen der Zimmertür gemessen. Abbildung 4 zeigt den Verlauf mit einer CO₂- und Wärmequelle, die einer schlafenden erwachsenen Person entspricht. Aus den Resultaten kann geschlossen werden, dass für eine Person eine Öffnung von 5 bis 7 cm ausreichend ist und für zwei Personen 10 bis 15 cm.

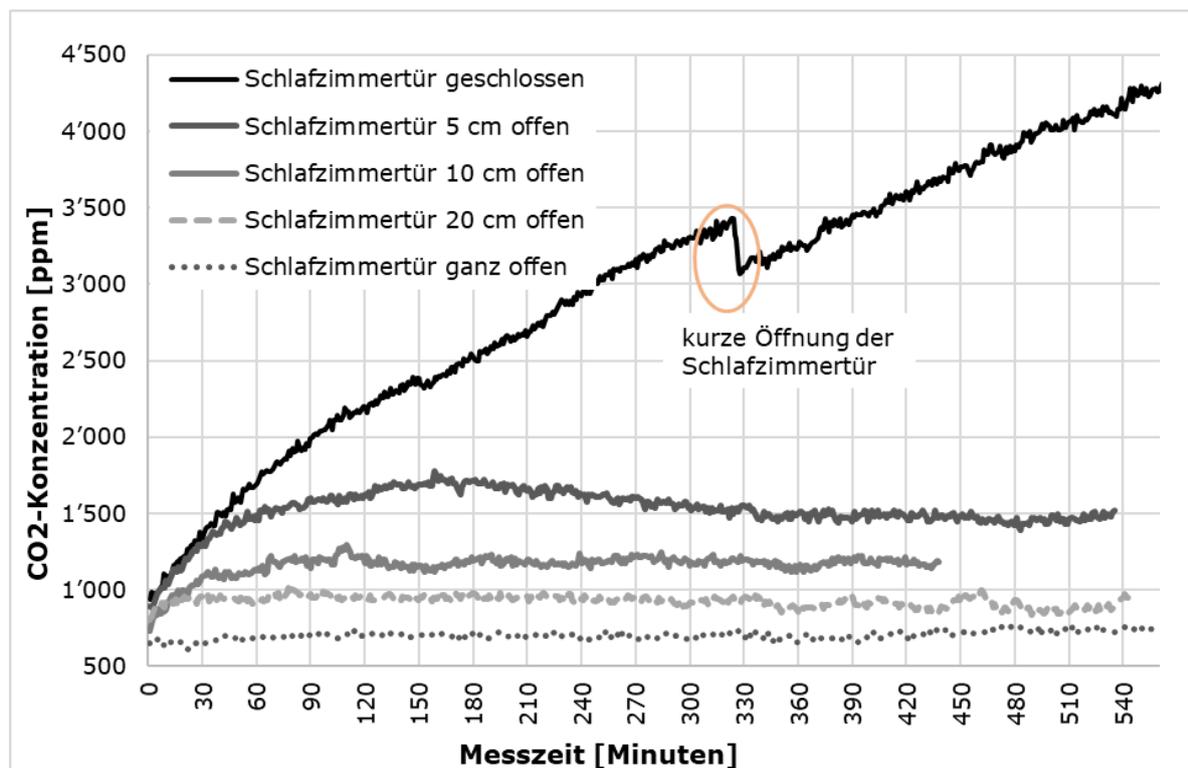


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration im Schlafzimmer mit 1 Person, Vergleich verschiedener Türöffnungsweiten [8]

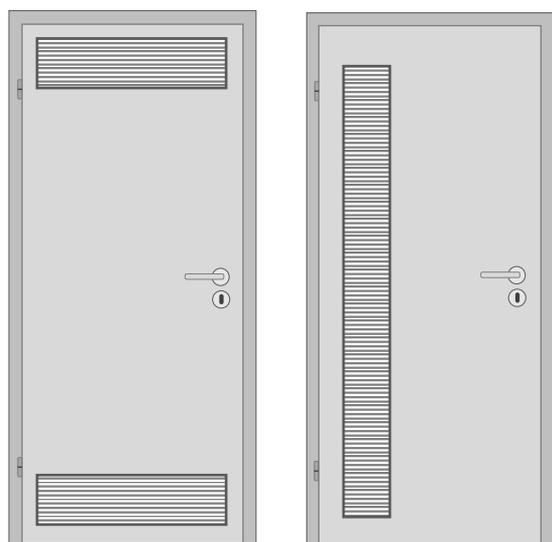


Abbildung 5: Passive Verbundlüfter mit horizontalen und vertikalen Luftgittern in Zimmertüren

Öffnung im Türblatt

Bei dieser Variante wurde in der Zimmertür im oberen und unteren Bereich jeweils ein Gitter mit Aussenabmessungen von 0,77 m Breite und 0,20 m Höhe eingesetzt. Der freie Querschnitt lag bei 43 % der Ansichtsfläche, resp. 0,13 m² pro Gitter. Die linke Figur in Abbildung 5 illustriert die Gitteranordnung.

Mit dieser Lösung konnte die Anforderung nach einem maximalen CO₂-Gehalt von 1400 ppm bei einer Belegung mit einer Person eingehalten werden. Aus weiteren Messungen lässt sich schließen, dass auch ein vertikales Gitter (rechte Figur) mit einem ca. 10 % größeren Querschnitt zur gleichen Raumluftqualität führt. Ein vertikales Gitter ließe sich auch neben einer Zimmertür platzieren. Die Grafik veranschaulicht, dass die erforderliche Gittergröße ästhetisch schwierig ist. Der Lichtschutz ist besser als bei einer leicht geöffneten Zimmertür. Der Schallschutz ist aber weiterhin ungelöst. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis dieser Variante ist daher fraglich.

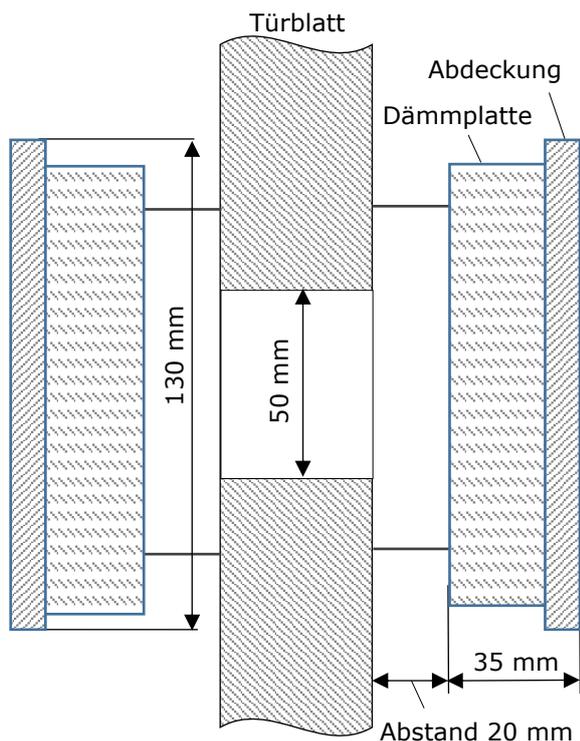


Abbildung 6: Querschnitt des untersuchten Überströmdurchlasses

Überström-Luftdurchlass

Auf dem Markt finden sich Überström-Luftdurchlässe (ÜSDL) für den unidirektionalen Lufttransfer von einem Raum in einen anderen. Diese bieten einen guten Schall- und Lichtschutz, sie sind aber für einen Differenzdruck zwischen den Räumen von ca. 3 bis 10 Pa ausgelegt. Um zu testen, wie sich solche Elemente bei einer passiven Verbundlüftung verhalten, wurden zwei großzügig ausgelegte ÜSDL mit einer Breite von 0,77 m im oberen und unteren Bereich einer Tür eingebaut, d.h. so wie die horizontalen Gitter in Abbildung 5. Gemäß Herstellerangabe beträgt die bewertete Normschallpegeldifferenz eines Elements $D_{n,e,w} = 40$ dB.

Die Konstruktion des ÜSDL ist in Abbildung 6 dargestellt. Anhand der gesamten Bautiefe von rund 0,14 m lässt sich schließen, dass diese Elemente eher für einen Wand- als für einen Türeinbau geeignet sind. Das obere Element lässt sich anstatt in der Tür auch oberhalb der Tür einbauen. Für das untere Element ist ein alternativer Einbauort schwierig. Möglich wäre aber ein vertikales Element, das in einem verbreiterten Türrahmen oder neben der Tür eingebaut werden könnte.

Die Messungen haben gezeigt, dass der Luftaustausch mit diesen ÜSDL weniger stabil ist als mit einer Türöffnung oder Gittern in der Tür. Der CO_2 -Gehalt lag bei einer Schlafzimerbelegung mit einer Person im Mittel bei rund 2000 ppm, was bedeutet, dass der angestrebte Luftaustausch bei den Versuchen nicht erreicht wurde. Es ist aber denkbar, dass sich solche Elemente für den Einsatz als passive Überströmer optimieren ließen und damit eine CO_2 -Konzentration von 1400 ppm erreichbar wäre. Jedoch werden der Aufwand und die Kosten als hoch erachtet.

Messungen in Wohnungen

In einer Wohnsiedlung der Stadt Zürich, die mit einer passiven Verbundlüftung ausgestattet ist, wurden in einer $3\frac{1}{2}$ -Zimmer- und einer $4\frac{1}{2}$ -Zimmer-Wohnung während jeweils gut zwei Wochen Messungen durchgeführt. Als passive Verbundlüfter dienen die Zimmertüren.

In beiden Wohnungen standen tagsüber die Zimmertüren mehrheitlich offen. Dadurch lag CO_2 -Gehalt in den Zimmern während 75 bis 95 % der Tagstunden (06:00 bis 22:00) unter 1400 ppm.

In der $3\frac{1}{2}$ -Zimmer-Wohnung lag im Zimmer 1, das von einer Person genutzt wird, in der Nacht (22:00 bis 06:00) der CO_2 -Gehalt nie über 2000 ppm und nur während 12 % der Zeit oberhalb 1400 ppm. In Zimmer 2 dagegen, das von zwei Personen als Schlafzimmer genutzt wird, lagen die Werte in der Nacht während 18 % der Zeit über 2000 ppm und während 37% der Zeit oberhalb von 1400 ppm.

In der $4\frac{1}{2}$ -Zimmer-Wohnung wurden zwei Zimmer als Schlafzimmer für zwei Personen genutzt und ein Zimmer war nachts nicht belegt. In beiden belegten Schlafzimmern lag der CO_2 -Gehalt in der Nacht während rund 70 % der Zeit über 2000 ppm und während rund 85 % der Zeit oberhalb von 1400 ppm. Bei geschlossener Zimmertür wurde ein CO_2 -Gehalt von bis zu 5000 ppm gemessen.

In der 3½-Zimmer-Wohnung haben die Bewohnerinnen und Bewohner die Verbundlüftung am Tag und in der Nacht genutzt und die Schlafzimmertüren mehrheitlich offenstehen lassen. In der 4½-Zimmer-Wohnung haben sie sich die Bewohnerinnen und Bewohner nachts für mehrheitlich geschlossene Schlafzimmertüren entschieden.

Die Messungen sind exemplarisch, aber sie zeigen doch, dass bei der passiven Verbundlüftung die Raumluftqualität in den Schlafzimmern massgebend vom Verhalten und den Anforderungen der Nutzenden abhängt.

Bei einem Vergleich von zwei Wohnungen mit aktiver Verbundlüftung [10] hatten sich auch Unterschiede in der Raumluftqualität gezeigt, die durch das Verhalten den Nutzenden begründet sind. Jedoch waren die Unterschiede im CO₂-Gehalt der Raumluft geringer.

3.3. Folgerungen für die Verbundlüftung

Bei offenen Zimmertüren mischt sich die Raumluft in einer Wohnung gut, sodass in allen Zimmern eine ausgeglichene CO₂-Konzentration resultiert.

Für die aktive Verbundlüftung sind auf dem Markt verschiedene Produkte erhältlich. Bei der passiven Verbundlüftung ist heute die Zimmertür das einzige zuverlässig funktionierende Element. Jedoch hängt die Funktion der passiven Verbundlüftung von der Bereitschaft ab, nachts die Schlafzimmertür teilweise offen zu halten. Immerhin führt bereits eine Türöffnung von 5 bis 15 cm zu einem ausreichenden Luftaustausch. Dabei wird empfohlen pro Person, die in der Wohnung schläft, einen minimalen Zuluftvolumenstrom von 25 m³/h zuzuführen.

Auch in Fällen, bei denen durch das Verhalten der Nutzenden die angestrebte Raumluftqualität in den Schlafzimmern nicht erreicht wird, führt die Verbundlüftung Feuchte und Gerüche aus Bad/WC zuverlässig ab. Bisher sind aus Wohnungen mit Verbundlüftung keine Feuchteprobleme bekannt.

4. Alternative Lüftungsmaterialien

Ein Hemmnis für zentrale Wohnraumlüftungen mit Zu- und Abluft, sowie Wärmerückgewinnung ist insbesondere im Holzbau die Zuluftverteilung, resp. das Material der Zuluftleitungen. In einer von der Stadt Zürich finanzierten Recherche [11] wurden Materialien für die Luftverteilung evaluiert und beurteilt. Neben verzinktem Blech und Kunststoff gibt es heute Nischenprodukte in Karton, Dämmmaterialien, Holzwerkstoffen und Textilien. Interessant, wenn auch noch weit entfernt von einer Anwendung, könnten Pilze (thermisch behandeltes Myzel) sein.

Bei einer Holzbauweise mit einem hohen Vorfertigungsgrad stellt sich die Frage, wie weit Holzwerkstoffe eingesetzt werden können. In einer laufenden Bachelorthesis an der HSLU [12] mit der Fa. Strüby Holzbau AG werden Luftleitungen aus Konstruktionsholz untersucht. Dies ist vor allem dann interessant, wenn die Zu- und Abluftkanäle bei der Vorfertigung direkt in die Deckenelemente eingelassen werden können. Aber auch Aussen- und Fortluftleitungen in einer Holzkonstruktion wären für Holzbaufirmen einfacher realisierbar als klassische Blechkanäle oder Kunststoffleitungen. Offene Fragen sind dabei beispielsweise das Verhalten bei feuchter Abluft aus Duschen/Bädern und die Verschmutzung resp. Reinigbarkeit. In der Bachelorthesis wird dies experimentell an einem Laboraufbau (s. Abbildung 7) einer bidirektionalen Lüftungsanlage untersucht.



Abbildung 7: Vorbereitung Laboraufbau für die Untersuchung von Luftkanälen aus Holz [11]

5. Diskussion und Folgerungen

Bei der Suche nach der «einfachen Lüftung» muss immer auch die Frage nach den Anforderungen an den Komfort und die Robustheit gestellt werden, resp. welche Kompromisse eingegangen werden.

Bei den Kosten sind nicht nur die Investitionen zu berücksichtigen, sondern auch der Betrieb. Der Energieverbrauch ist dabei nur ein Aspekt. Mindestens die gleiche Bedeutung hat die Instandhaltung. Bei Einzelraum-Lüftungsgeräten und Abluftanlagen mit Aussenbauteil-Durchlässen (ALD) wird oft der Aufwand für eine qualifizierte Reinigung und den Filterersatz der dezentralen Elemente in den Schlafzimmern unterschätzt.

Die Verbundlüftung bietet die Vorteile einer Wärmerückgewinnung und einer zentralen Wartung (Filterwechsel). Zudem kann innerhalb der Wohnung auf eine Zuluftverteilung mit Kanälen verzichtet werden. Bei der aktiven Verbundlüftung hängt aber die Raumluftqualität deutlich und bei passiven Verbundlüftung sogar ausschlaggebend vom Verhalten der Bewohnerinnen und Bewohner ab.

Bei einer Holzbauweise mit hohem Vorfertigungsgrad könnten Luftkanäle aus Holzwerkstoffen die klassische Kaskadenlüftung wieder attraktiver machen. Jedoch sind noch Untersuchungen und Entwicklungen, sowie später noch eine Integration ins Regelwerk erforderlich.

6. Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Primas, Alex; Huber, Heinrich; Hauri, Claudia; Näf, Michael: Abluftanlagen und Einzelraumlüftungen im Vollzug Energie. Hochschule Luzern, Horw (Schweiz), 2018
- [2] Hauri, Claudia; Huber, Heinrich; Primas, Alex: Komfortlüftung im Vollzug Energie. Hochschule Luzern, Horw (Schweiz), 2021
- [3] SIA 382/5:2021 Mechanische Lüftung in Wohngebäuden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [4] Huber, Heinrich: Wohnungslüftung – Planung, Ausführung, Betrieb. Faktor Verlag, Zürich, 2021. In elektronischer Form kostenlos erhältlich unter: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10697>
- [5] Produktreglement zu den Gebäudestandards MINERGIE®/MINERGIE-P®/MINERGIE-A®, Version 2021.1. Minergie Schweiz, Basel (Kapitel 11.2)
- [6] Gute Raumlufte, Standardlüftungssysteme im Minergie-Wohnhaus. Minergie Schweiz, Basel, 2019
- [7] Anwendungshilfe zu den Gebäudestandards MINERGIE®/MINERGIE-P®/MINERGIE-A®, Version 2021.1. Minergie Schweiz, Basel (Kapitel 11.1.2)
- [8] Moser, Marie-Teres; Primas, Alex; Zakovorotnyi, Andrii: Analyse vereinfachter Lüftungskonzepte. Hochschule Luzern, Horw (Schweiz), 2021
- [9] Beike, Martin; Nadler, Norbert: Feuchteschutzlüftung - DIN SPEC 4108-8: Lüftungskonzepte mit Fensterlüftung erstellen. TGA - Fachplaner, Stuttgart, pp. 1–36, 2021.
- [10] Schiantarelli, Michael: Aktive Überströmer bei Komfortlüftungen. Fachhochschule Nordwestschweiz, Studiengang Energie- und Umwelttechnik, Bachelorthesis 2015
- [11] Settembrini, Gianrico, et al.: Alternative Materialien für Lüftungsanlagen. Hochschule Luzern, Horw, 2022
- [12] Eysman, Petr: Lüftungsleitungen aus natürlichen Materialien – nicht metallischen Materialien. Hochschule Luzern, Studiengang Gebäudetechnik, Bachelorthesis 2022

Die Publikationen von Minergie sind verfügbar unter www.minergie.ch

Passivhaus und regenerative Energiequellen als Lösungsansatz für den klimaneutralen Gebäudebestand

Harald Krause
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Passivhaus und regenerative Energiequellen als Lösungsansatz für den klimaneutralen Gebäudebestand

1. Klimaneutrales Deutschland 2045

Gemäß dem Klimaschutzgesetz aus der letzten Legislaturperiode [1] soll Deutschland bis 2045 treibhausgasneutral sein. Dies bedeutet, dass sich Emissionen und Entnahmen aus der Atmosphäre die Waage halten sollen.

Von verschiedenen Institutionen wurden dazu Studien zur Machbarkeit und zu konkreten Umsetzungsstrategien entwickelt, z.B. [2, 3, 4]. In den zitierten aber auch anderen Studien sind die wesentlichen Umsetzungsstrategien ähnlich:

1. Vollständige Umstellung auf erneuerbare Energiequellen: Hauptsächlich Wind- und Sonnenenergie in Form von Photovoltaik.
2. Umstellung auf strombasierte Versorgung in fast allen Sektoren: Elektromobilität, Wärmepumpen zur Heizung u.a.
3. Erhöhung der Energieeffizienz in allen Sektoren: Dazu zählen Gebäudedämmung, Umstellung auf Elektromobilität u.a.
4. Auf- und Ausbau der Wasserstofftechnologie: Einsatz als Rohstoff in der Chemischen Industrie, Stahlproduktion sowie Energiespeichermedium.

Eine Zusammenfassung der Maßnahmen findet man auch in «*Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte*», einer Veröffentlichung der Scientists for Future Deutschland unter Mitwirkung des Autors dieses Tagungsbeitrages [5].

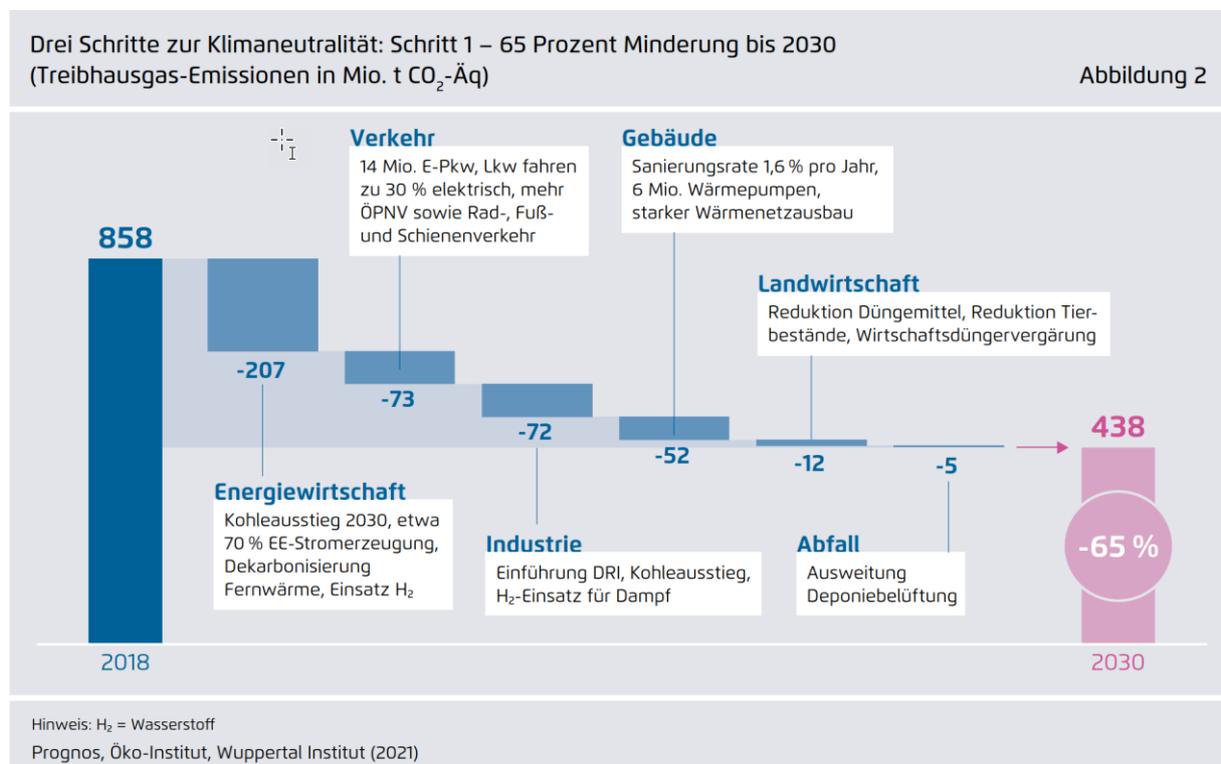


Abbildung 1: Maßnahmen zur Klimaneutralität im Zeitraum bis 2030 aus [3]

Im Folgenden wird die Studie "*Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*» im Auftrag der Agora Energiewende [4] **Fehler! Textmarke nicht definiert.** verwendet. In Abbildung 1 sind die Maßnahmen bis zum Jahre 2030 gegliedert nach den betrachteten Sektoren zusammengefasst. Die Hauptlast liegt in der Energiewirtschaft und

kann mit dem Begriff Dekarbonisierung zusammengefasst werden. Im Gebäudebereich steht vor allem eine Erhöhung der Sanierungsquote sowie die Umstellung auf Wärmepumpen als Heizquelle an. Bis 2030 ist der Einbau von ca. 6 Millionen Wärmepumpen als Ersatz für bestehende Öl- oder Gaskessel angesetzt.

Der Beitrag der verschiedenen Sektoren zu den vergangenen, heutigen und zukünftigen Treibhausgasemissionen ist in Abbildung 2 dargestellt [4]. Daraus ist abzulesen, dass fast alle Sektoren inklusiv des Gebäudebereiches bis 2045 keine Treibhausgase mehr emittieren sollen. Einzig die Landwirtschaft wird als Emittent übrigbleiben, weshalb auch Kompensationsmaßnahmen als «negative» Emissionen nötig sein werden.

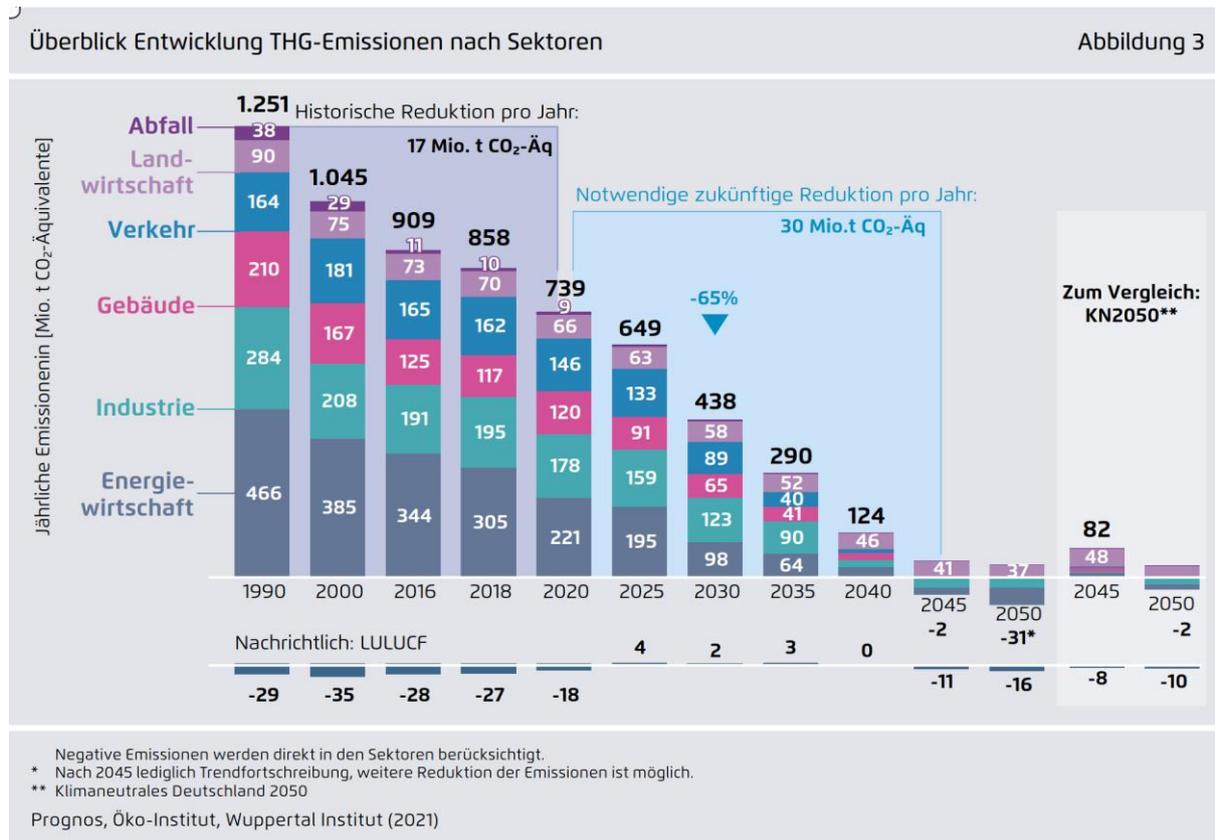


Abbildung 2: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren aus [4]. Bis 2045 ist eine fast vollständige Umstellung auf regenerative Energiequellen nötig. Zu einem gewissen Teil tragen auch Importe von regenerativ erzeugtem Wasserstoff sowie aktive Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre zur Treibhausgasneutralität bei.

Um die enormen Anstrengungen insbesondere beim Ausbau von Windkraft und Photovoltaik zu verdeutlichen, ist eine weitere Grafik aus der Agora Studie in Abbildung 3 hilfreich. Bei der zusätzlich installierten Leistung steht die Photovoltaik an erster Stelle. Für die Netostromerzeugung sollen 2045 sowohl Windkraft als auch Photovoltaik die dominante Rolle spielen. Biomasse und Wasserkraft spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Die jährlichen Ausbauraten der installierten Leistung bis 2030 liegen bei der Photovoltaik bei ca. 10 GW, bei der Windenergie onshore 5 GW und offshore 2 GW. Die maximalen jährlich installierten Leistungen lagen bisher bei der Photovoltaik bei 8 GW (2010 und 2012) sowie der Windkraft onshore bei 5 GW (2014 und 2017) und offshore bei 2 GW (2015). Somit sind die Ausbauzahlen rein technisch gesehen machbar.



Abbildung 3: Ausbau der erneuerbaren Energiequellen Photovoltaik und Windkraft aus [4].

Zusammengefasst können die nötigen Transformationsprozesse in drei Säulen wie in Abbildung 4 dargestellt werden.

Der Primärenergiebedarf muss bis 2045 deutlich gesenkt werden. Dies geschieht vor allem durch Verbesserung der Energieeffizienz, wie z.B. durch Elektromobilität, Heizung mit Wärmepumpen aber auch Reduktion von Wärmeverlusten in Gebäuden.

Die Umstellung auf Strom als Energieträger wird zu einer deutlichen Erhöhung der Strombedarfs führen. Obwohl dies durch die Umstellung auf Wärmepumpen auch für Gebäude zutrifft, geht man davon aus, dass die Reduktion des Energiebedarfs und auch der Einsatz von effizienteren Elektrogeräten in diesem Sektor zu keinem erhöhten Strombedarf führen.

Wasserstoff als Energieträger und als Grundstoff für die Industrie kommt eine wesentliche Bedeutung zu. Die treibhausgasneutrale Produktion der nötigen Mengen Wasserstoff wird jedoch in Deutschland nicht möglich sein.

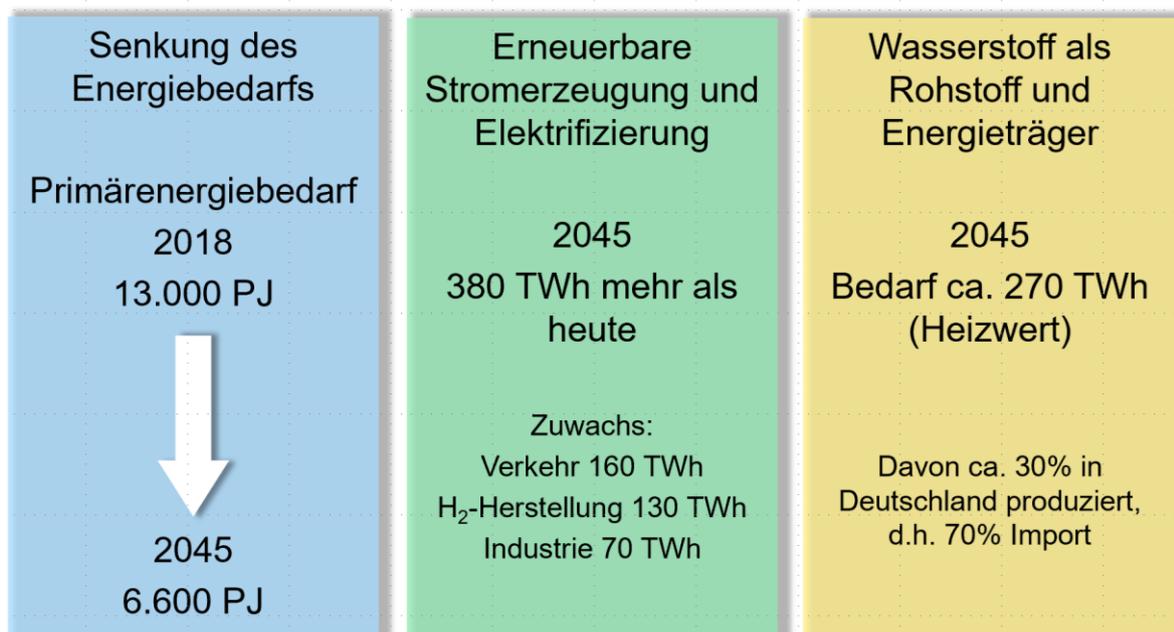


Abbildung 4: Die drei wesentlichen Säulen zur Klimaneutralität Deutschlands nach [4].

2. Klimaneutraler Gebäudebestand

Die Wege zum klimaneutralen Gebäudebestand bis 2045 unterscheiden sich in verschiedenen Studien deutlich. Gemeinsam haben alle, dass nur eine Kombination aus

- Sanierung der Gebäudehüllen,
- höherem Neubauniveau bzgl. des Wärmeschutzes,
- Umstellung auf Wärmepumpen oder regenerativer Fernwärme sowie
- Nutzung von regenerativen Energien und Wärmerückgewinnung im Gebäude

zum Ziel führen. Die nötigen Dämmstandards sind jedoch uneinheitlich, wobei dabei vor allem wirtschaftliche Gründe genannt werden. Eine weitere Diskrepanz ergibt sich aus unterschiedlichen Annahmen zur Entwicklung der Wohnflächen pro Person. [3] setzt eine Reduktion der Wohnflächen voraus während [4] von einem weiteren Anstieg von 45 m² pro Person im Jahre 2018 auf 52 m² pro Person in 2050 ausgeht.

Die bereits vorgestellte Studie der Agora Energiewende [4] geht von einer zukünftigen Sanierungstiefe auf einen Jahresheizwärmebedarf von 60 kWh/(m²a) bei Ein- und Zweifamilienhäusern (entspricht ca. dem heutigen KfW 70 Niveau) und 40 bis 45 kWh/(m²a) (entspricht ca. dem heutigen KfW 55 Niveau) bei Mehrfamilienhäusern aus. Bei Neubauten sinkt der Heizwärmebedarf im betrachteten Zeitraum auf ca. 25 kWh/(m²a).

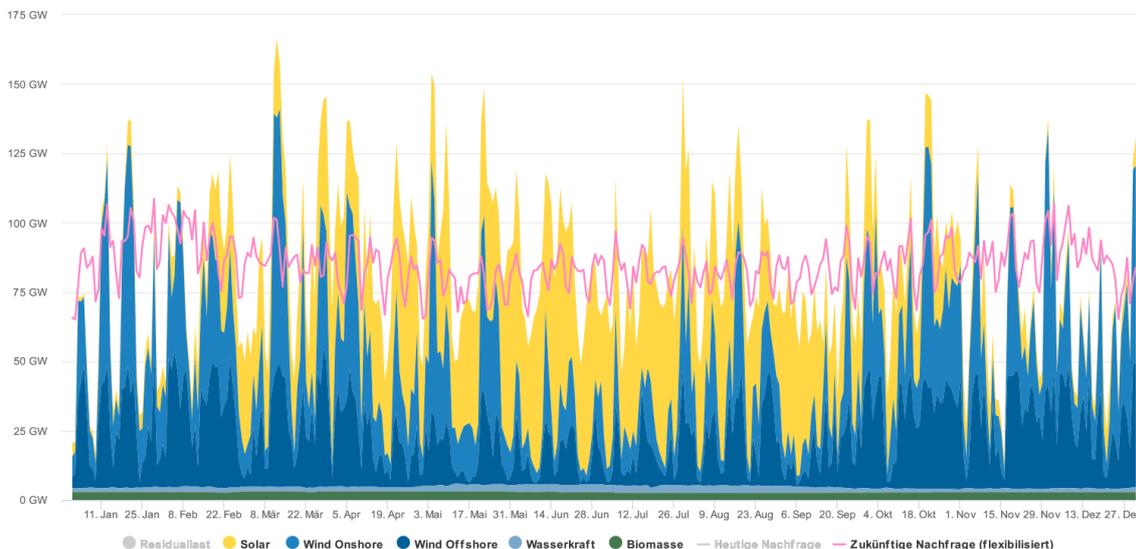
Die Leitstudie der Dena [2] setzt im Neubau als Mindeststandard ab 2022 den heutigen KfW 55 Standard und ab 2030 den KfW 40 Standard voraus. Der Koalitionsvertrag von SPD, Grünen und der FDP sieht den KfW 40 Standard bereits ab 2025 als für Neubauten verpflichtend vor [6], nachdem man sich in der letzten Regierung noch um jegliche Verbesserung gedrückt hatte. Außerdem soll jeder Neubau zu 65% mit erneuerbaren Energien betrieben werden, was mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe problemlos erreicht wird und somit keine wirkliche Herausforderung darstellt. In der Sanierung werden in der Dena Leitstudie verschiedene Szenarien bzgl. Sanierungstiefe und -rate betrachtet. Bis 2045 soll eine Halbierung der Heizwärmebedarfs des gesamten Gebäudebestandes erreicht werden.

Das EU Projekt outphit [7] mit dem deutschen Partner Passivhaus Institut kommt in einer aktuellen Studie zum Schluss, dass sowohl die Sanierung als auch der Neubau nach Passivhaus Prinzipien die wirtschaftlichste Lösung darstellt. Da die KfW Förderkriterien [8] und die Passivhauskriterien nicht direkt vergleichbar sind, da sie unterschiedliche Nachweisverfahren und Nachweisgrößen verwenden, ist ein unmittelbarer Vergleich an Hand von Kennwerten schwierig. Die Passivhauskriterien setzen zunächst auf den Heizwärmebedarf als

Nachweisgröße und damit auf eine optimierte Gebäudehülle, passive solare Gewinne und Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung. Die Verfahren des GEG [9] bewertet nur die Transmissionswärmeverluste als Kenngröße für die Gebäudehülle. Das primärenergetische Bewertungssystem auf Grundlage der erneuerbaren Primärenergie wird später noch behandelt.

3. Winterlücke

Zwischen Energiebereitstellung durch Wind und Sonne und Energienachfrage für Heizung gibt es keine optimale zeitliche Korrelation. Ein mögliches Szenario für das Jahr 2040 mit einem Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung von 86% zeigt Abbildung 5 [10]. Aus der Grafik wird deutlich, dass im Winterhalbjahr eine deutliche Deckungslücke zwischen Bedarf (rote Linie) und Ertrag (blau und gelb) besteht. Diese muss durch Importe, regelbare Kraftwerke und Energiespeicher geschlossen werden.



Agora Energiewende; Stand: 23.03.2022, 09:02

Abbildung 5: Stromerzeugung und -bedarf für das Jahr 2040 nach [10]. Der Bedarf ist durch rote Linie dargestellt. Die Residuallast, also alles was aus regelbaren Kraftwerken, Importen und Speichern stammt ist ausgeblendet. Es wird deutlich, dass dieser Beitrag vor allem im Winter geleistet werden muss, was vor allem am reduzierten Beitrag der Solarenergie im Winter liegt. Die Wetterdaten basieren auf dem Jahr 2021.

Diese drei Beiträge werden nach jetzigem Stand zu hohen Kosten führen, weshalb eine Reduktion der Winterlücke vor allem im Gebäudebereich sinnvoll erscheint.

Diesem Sachverhalt versucht das PER-System (Primärenergie Erneuerbar) des Passivhaus Institutes Rechnung zu tragen [11]. Dieses System setzt eine vollständige Versorgung durch erneuerbare Energien in einem zukünftigen Energiesystem voraus. Treibhausgasemissionen oder wie bisher die nicht erneuerbare Primärenergie sind dabei keine zielführenden Steuergrößen. Vielmehr muss insbesondere für Gebäude die zeitliche Verfügbarkeit der Energie sowie Kosten für Speicherung und anderes mit einbezogen werden. Für weitere Details sei auf die Quelle [11] verwiesen.

4. Vergleich Energiestandards

Um die Problematik der Winterlücke zu verdeutlichen, werden im Folgenden einige Berechnungen für ein Einfamilienhaus vorgestellt. Das Gebäude wurde 2004 als Passivhaus erstellt und auch über mehrere Jahre einem technischen Monitoring unterzogen [12].

Mit der Simulationssoftware «ETU Simulation» der Hottgenroth Software AG wurde ein Modell des Gebäudes erstellt und anhand der Messdaten validiert. Auf dieser Basis wurden Simulationsrechnungen auf Stundenbasis für verschiedene Energiestandards durchgeführt.



Abbildung 6: Das in den Simulationen betrachtete Gebäude

4.1. Randbedingungen und Energiestandards

Die wesentlichen Randbedingungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Randbedingungen für die Simulationen

Wetterdaten	Meteonormdaten für Samerberg aus HSETU Simulation
Photovoltaik	8,6 kWp Anlage
Stromspeicher	Lithium Ionen Speicher mit 9 kWh nutzbarer Kapazität
Heizquelle	Luft-Wasser-Wärmepumpe (Standardwerte aus HSETU Simulation)
Wärmeabgabe	Fußbodenheizung
Bauweise	Holztafelbau mit jeweils angepassten Aufbauten
Beheizte Fläche	ca. 180 m ² inkl. Büroräume im KG
Personen	Nutzung durch 4 Personen
Lüftung	Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung für die Passivhausvariante, sonst freie Lüftung über Fenster

Es wurden 3 Energiestandards betrachtet.

- Passivhaus, wie tatsächlich ausgeführt.
- GEG 2020 Standard bzgl. Anforderungen an die Gebäudehülle und Luftdichtheit.
- Gebäudebestand: ca. Niveau 1980 für Gebäudehülle und Luftdichtheit.

4.2. Simulationsergebnisse

In Abbildung 7 sind die nötigen Heizleistungen über einen Jahreszeitraum vergleichend dargestellt. Auch außerhalb der Heizperiode ergeben sich theoretisch geringfügige Lasten für einzelne Räume, die in der Ergebnisdarstellung belassen wurden.

Wie zu erwarten, steigen sowohl die mittleren also auch die maximalen Heizleistungen sowie der Heizwärmebedarf mit schlechter werdendem Energiestandard. Die Werte sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

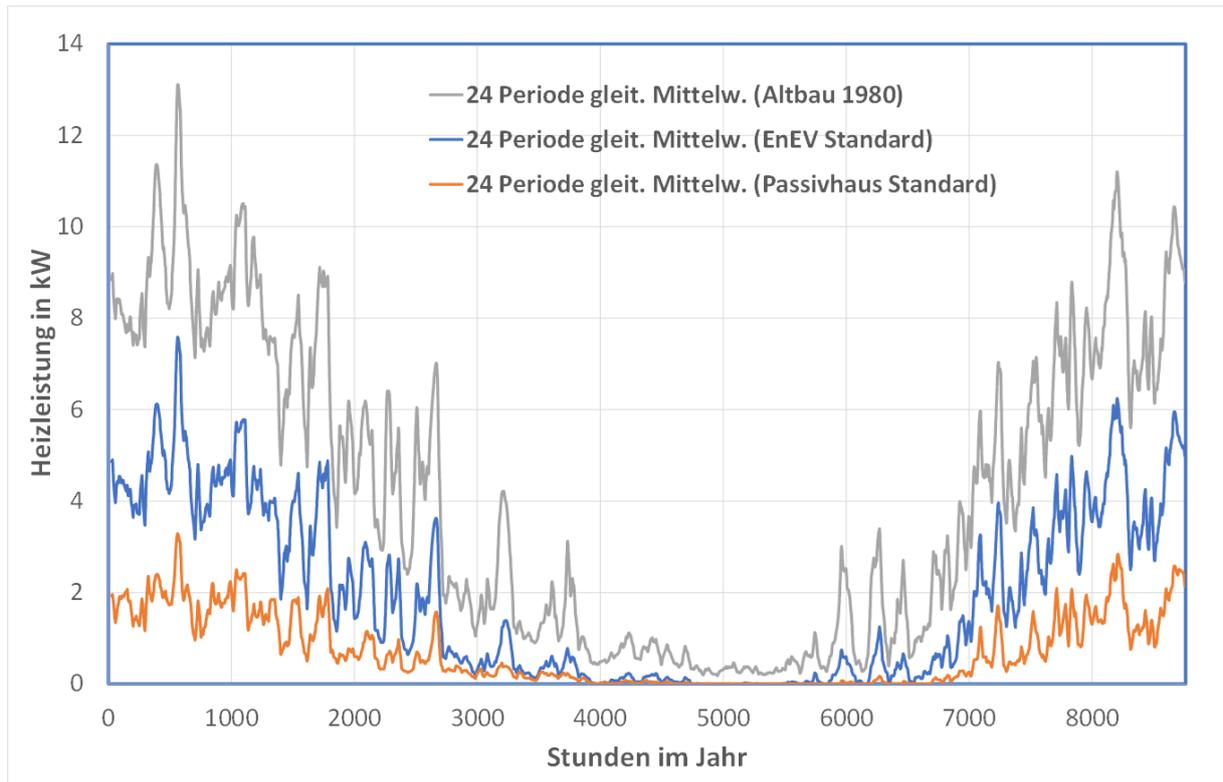


Abbildung 7: Zeitaufgelöste Heizleistungen für die drei betrachteten Energiestandards

Tabelle 2: Zusammengefasste Simulationsergebnisse zu Abbildung 7.

	Passivhaus	GEG	Altbau 1980
Jahresheizwärmebedarf in kWh/a	6300	17200	38200
Maximale Heizlast in kW (Auslegungsfall)	3	8	13

Im Weiteren wurden Berechnungen des gesamten Energiebedarfs (Wärmepumpe (Heizung, Warmwasser), Beleuchtung, Hausgeräte, Medien etc.) sowie der jeweils zur Verfügung stehende Photovoltaikertrag unter Berücksichtigung des Stromspeichers bilanziert.

In den Diagrammen in Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Ergebnisse der stündlichen Werte für den Altbau und das Passivhaus für

- den Photovoltaikertrag,
- den Gesamtstromverbrauch und
- den Netzbezug für Strom

in Monatswerten zusammengefasst. Bitte beachten Sie die unterschiedliche Skalierung der Y-Achse.

Deutlich erkennbar sind folgende Ergebnisse:

1. Sowohl im Passivhaus als auch im Altbau reicht die Photovoltaikanlage nicht aus, um den kompletten Bedarf im Winter zu decken.
2. Auch im Sommer ist ein Netzbezug, wenn auch in geringem Umfang nötig.
3. Im Sommer ist in allen Fällen ein bilanzieller Überschuss an Strom vorhanden.
4. Der Zeitraum der deutlichen Deckungslücke im Passivhaus beschränkt sich auf wenige Monate im Winter.
5. Die Deckungslücke (im Wesentlichen Netzbezug in Wintermonaten zur Heizung) liegt im Passivhaus bei 3500 kWh, im Altbau bei 15300 kWh (GEG nicht dargestellt 6700 kWh)

Dies bedeutet, dass in allen Fällen ein Netzbezug nötig ist. Wie in den vorherigen Abschnitten erläutert, wird es deshalb auch zu einer landesweiten Deckungslücke im Winter kommen, die durch Importe oder saisonal gespeicherte Energie gedeckt werden muss. Die Windenergie mit den höheren Erträgen im Winter kann diese Lücke vermindern aber nicht schließen.

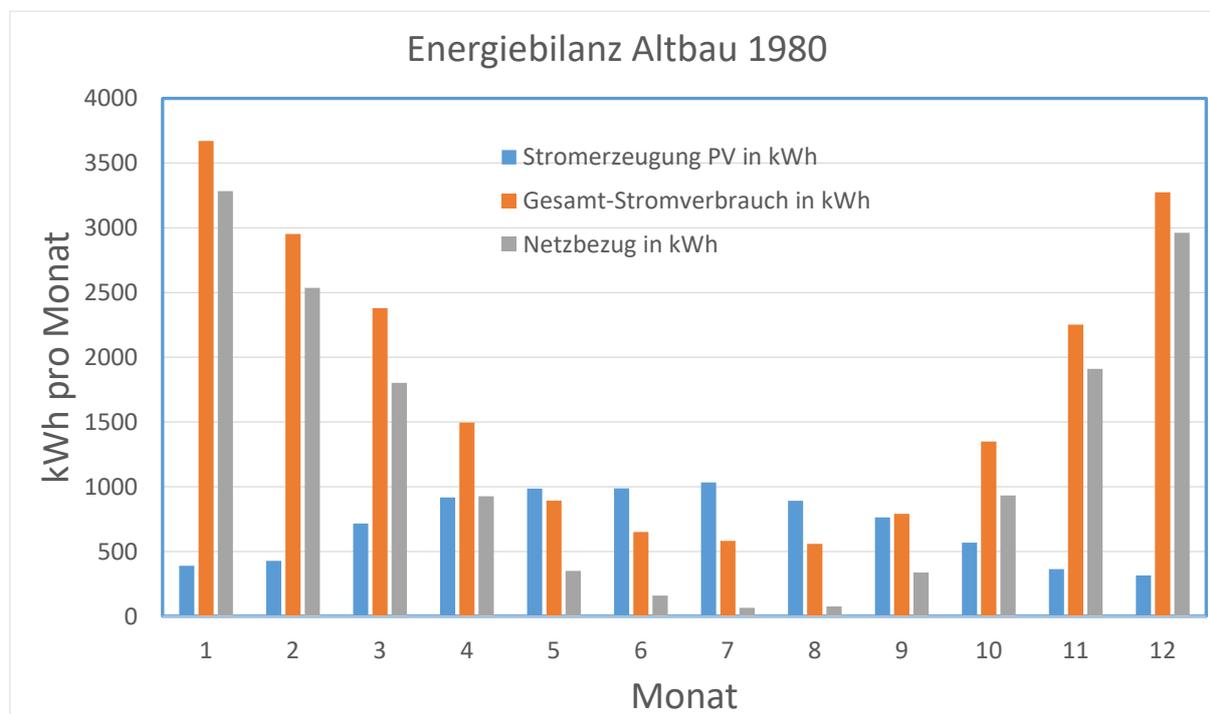


Abbildung 8: Bilanzergebnisse für den Altbau

Die entscheidende Frage im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit ist nun, ob es günstiger ist, Energie zu importieren, zu speichern oder in bessere Gebäudehüllen und Wärmerückgewinnungstechnologien zu investieren.

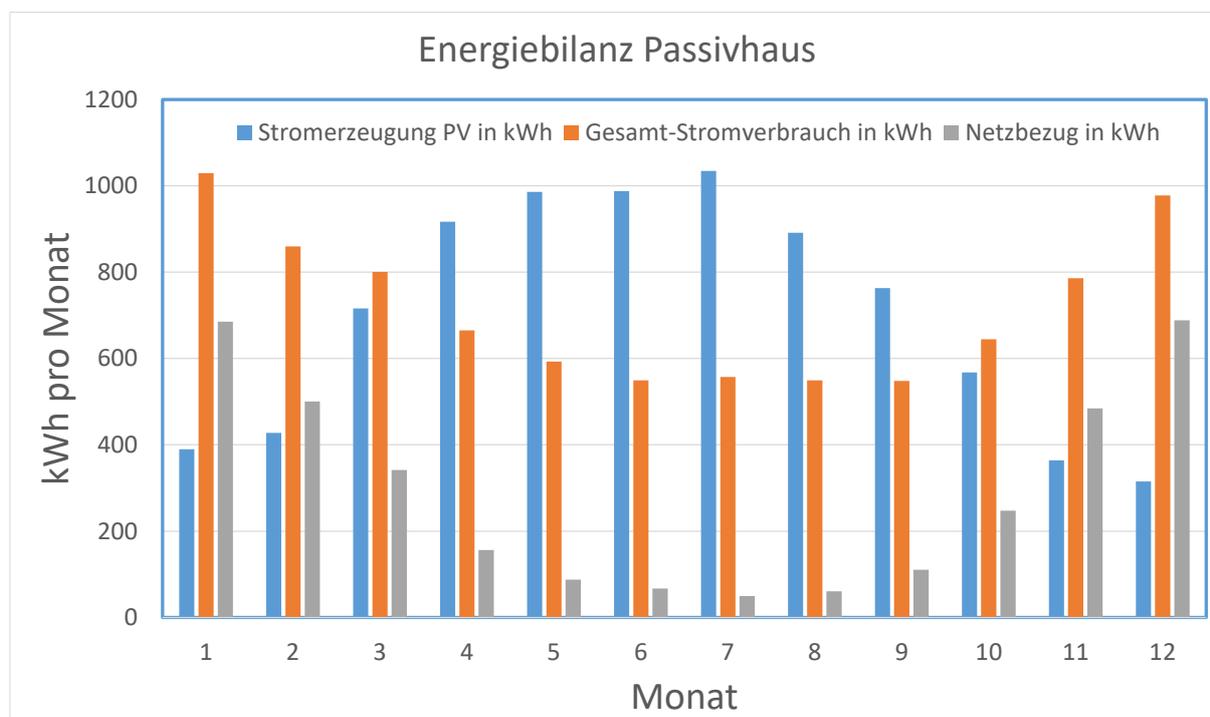


Abbildung 9: Bilanzergebnisse für das Passivhaus

Kosten für saisonale Energiespeicherung sind schwer zu ermitteln und stehen auch in der Literatur nur unzureichend zur Verfügung. Die derzeit einzige halbwegs wirtschaftlich umsetzbare Technologie ist die Erzeugung von Wasserstoff aus Überschüssen (z.B. PV im Sommer) durch Elektrolyse mit anschließender Methanisierung und Speicherung in den vorhandenen Erdgasspeichern [z.B. 13]. Im Winter erfolgt die Rückverstromung. Ein Schema des Passivhaus Institutes dazu zeigt Abbildung 10.

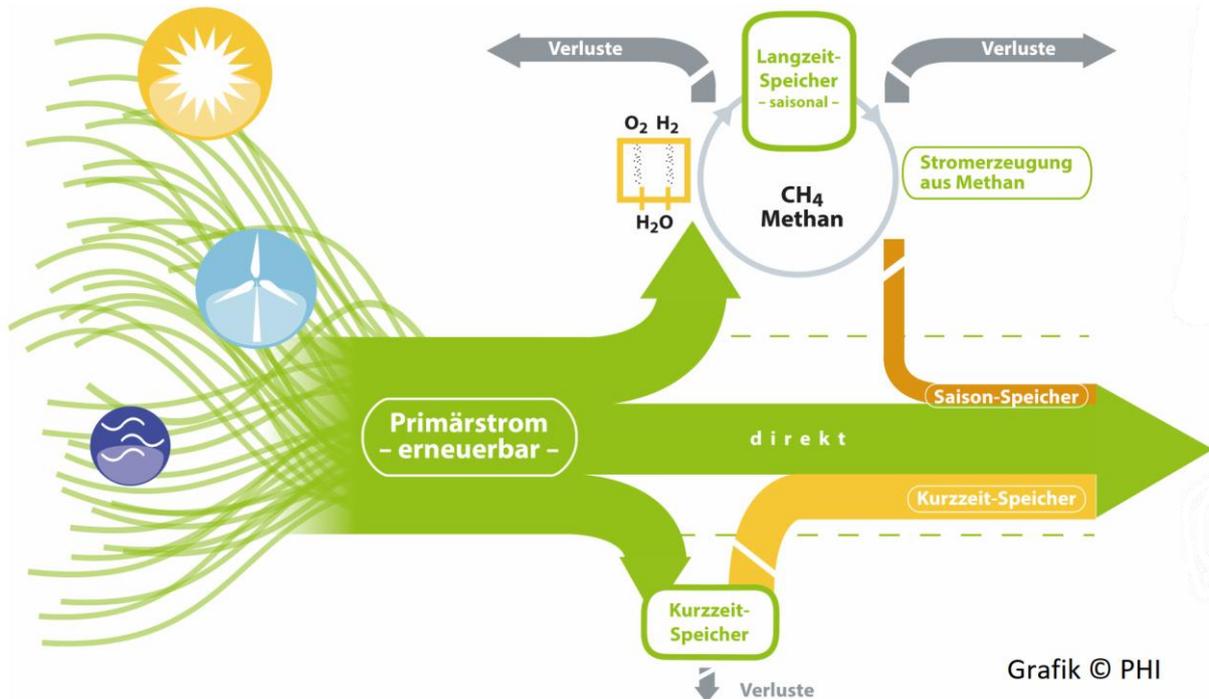


Abbildung 10: Schema der Energiespeicherung über power-to-gas [11].

Alleine aufgrund des Wirkungsgrades von ca. 30% bei diesem Gesamtprozess ergeben sich Kosten von minimal den 3-fachen Stromgestehungskosten. Wolfgang Feist schätzte die Kosten für die «gespeicherte» nutzbare Energie auf 13 bis 16 cent/kWh ab [14]. Eine gesamtheitliche wirtschaftliche Betrachtung ist deutlich komplexer und liefert keine einfachen Kosten pro kWh [13].

Wenn man sich dennoch an den 13 bis 16 cent/kWh orientiert, wird deutlich, dass sowohl Verbesserungen an der Gebäudehülle als auch Wärmerückgewinnungstechnologien mit diesen Kosten mehr als konkurrieren können. Berechnungen zu den Kosten pro eingesparter kWh lassen sich z.B. mit dem tool des BBSR durchführen [15]. Je nach Ansatz der Sowiesokosten können z.B. die Kosten für eine Sanierung des betrachteten Altbaubeispiels auf Passivhausniveau zwischen € 0,03 und € 0,1/kWh liegen (ohne Fördermittel).

Das Passivhaus Institut kommt in einer aktuellen Studie zum Schluss, dass aus diesen Gründen die Investitionen in eine hochwertige Gebäudehülle wirtschaftlicher sind als die in die sonst deutlich höheren Import- oder Speicherkosten [7].

5. Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde dargelegt, warum eine hochwertige Gebäudehülle in Verbindung mit regenerativer Energieerzeugung einen sinnvollen Lösungsansatz für den klimaneutralen Gebäudebestand 2045 auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten darstellt.

Die Umstellung unserer Gebäudewärmeversorgung auf Wärmepumpen und klimaneutrale Fernwärme stellt eine gewaltige Herausforderung dar. Es sollte dabei trotz des massiven Ausbaus von Photovoltaik und Windenergie darauf geachtet werden, die Bedarfsseite zu optimieren. Auch wenn technisch möglich, ist eine Umstellung im Gebäudebestand auf Wärmepumpen ohne thermische Sanierung weder betriebswirtschaftlich (aus Sicht des Gebäudenutzers) noch volkswirtschaftlich sinnvoll.

Es muss das Ziel sein, die Deckungslücken und damit den Import sowie die nötige saisonale Speicherung von Energie so gering wie möglich zu halten. Es ist derzeit nicht absehbar, dass insbesondere die Kosten für Energiespeicherung mit den Kosten für Bedarfsreduzierung in Gebäuden konkurrieren können.

6. Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), «Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist»
- [2] Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) (dena, 2021). «dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität»
- [3] Wuppertal Institut (2020). CO₂-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze. Bericht. Wuppertal.
- [4] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann, Zusammenfassung bzw. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende
- [5] Gerhards, Christoph, Weber, Urban, Klafka, Peter, Golla, Stefan, Hagedorn, Gregor, Baumann, Franz, Brendel, Heiko, Breyer, Christian, Clausen, Jens, Creutzig, Felix, Daub, Claus-Heinrich, Helgenberger, Sebastian, Hentschel, Karl-Martin, Hirschhausen, Christian von, Jordan, Ulrike, Kemfert, Claudia, Krause, Harald, Linow, Sven, Oei, Pao-Yu, ... Weinszierl, Theresa. (2021). Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte / Climate-friendly energy supply for Germany—16 points of orientation (1.0, pp. 1–55). Scientists for Future Germany. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4409334>
- [6] Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP)
- [7] <https://outphit.eu/de/>; https://outphit.eu/media/filer_public/d2/02/d2025737-3d5b-458e-8753-e069f36f3ef3/2022-01-25_outphit_klimaneutralitat_im_gebaudebestand_de.pdf
- [8] www.kfw.de
- [9] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG), Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728)
- [10] https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/chart/future_power_generation/01.01.2021/31.12.2021/future/2040/
- [11] <https://passipedia.de/zertifizierung/passivhaus-klassen/per>
- [12] Peter Irger: Die energetische Bilanz eines Passivhauses in der Praxis – PHPP Berechnung und Messdaten, Bachelorarbeit 2013, TH Rosenheim, im Rahmen des EU Projektes ENERBUILD
- [13] Brinner, A.; Schmidt, M.; Schwarz, S.; Wagener, L.; Zuberbühler, U. (2018): Technologiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken
- [14] Wolfgang Feist – Uni Innsbruck, Energiekonzepte – das Passivhaus im Vergleich, 17th International Passive House Conference
- [15] https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Wirtschaftlichkeit/VereinfachteAnsaezte/BBSR-Berechnungstool/BBSR-Excel-Tool22.xlsx?__blob=publicationFile&v=2

Robustheit im Spannungsfeld von Gebäudetechnik und Energieeffizienz

Elisabeth Endres
TU Braunschweig / IB Hausladen
Braunschweig, Deutschland



Robustheit im Spannungsfeld von Gebäudetechnik und Energieeffizienz

Steigende Anforderungen an Energieeffizienz und das Bewusstsein um die Endlichkeit der fossilen Energieressourcen haben das Bauwesen in den letzten 30 Jahren geprägt. Die Entwicklung hocheffizienter Baumaterialien zur Minimierung der Verluste sowie die Implementierung technischer Anlagen zur Effizienzsteigerung ermöglichen im Neubau eine spezifische Optimierung der Energieverbräuche. Ebenso ist die umfassende Digitalisierung von Planungswerkzeugen und die Verpflichtende Erbringung von Nachweisen im Genehmigungsprozess umgesetzt worden. Neben einer stetig steigenden Komplexität im Planungs- und Bauprozess sind jedoch die prognostizierten Erfolge und die Umstellung auf erneuerbare Energien nicht eingetroffen. Vielmehr hat sich gezeigt, dass eine singuläre Betrachtung und Fokussierung auf die Zielgröße der Effizienzsteigerung durch Dämmung und technische Anlagen keine allumfassende Lösung für die Aufgabenstellung des Bauens innerhalb der «Planetaren Grenzen» darstellt. Die technischen Systeme betreffend zeigen Monitorergebnisse, dass die prognostizierten Erfolge der Bedarfsberechnungen in den Verbrauchswerten ausbleiben. Steigende Komplexität und die Optimierung auf den idealen Betriebspunkt sind technisch möglich, ebenso sind digitale Berechnungsmethoden und TGA Systeme vorhanden. Es fehlt – so scheint es – die Robustheit im Zusammenspiel der Komponenten sowie die Resilienz der Systeme gegenüber abweichenden und in der Planung unsicheren Randbedingungen. Diese sind neben sich ändernden Klimaverhältnissen, wie z.B. Heat Island Effekten im urbanen Kontext und damit fehlenden Nachtabsenkungen zur Nachtlüftung, der Ausfall der Steuerung oder das Fehlverhalten der Nutzerschaft. Der Einfluss dieser auf das sog. «Performance-Gap» steigt mit zunehmender Optimierung. Zur Absicherung dieser Abweichungen und eventuell auftretenden Ausfälle wird dann wieder mit technischen Systemen reagiert, dies führt bis hin zur Unbeherrschbarkeit der Gebäude. Diesen Kreislauf, der sich aus der Vielzahl der technischen Lösungen und einem damit verbundenen «Because we can» ergibt, gilt es mit robusten Systemen und Gebäudestrukturen entgegenzuwirken, um die erforderlichen Ziele zu erreichen. Während eine robuste Betriebsoptimierung zwar den Idealpunkt in der Performance nicht erreicht, sind die Szenarien jedoch resilienter gegenüber unsicherer Randbedingungen und die Zielgrößen werden im kleinen schwankenden Korridor erreicht. Dies bedeutet, dass bereits in der Planung ein Zusammenwirken des passiven Gebäudeverhaltens mit den technischen Systemen und einer einfachen Steuerung erforderlich ist, um einen robusten Gebäudebetrieb zu erreichen. Dabei ist nicht die Prämisse technische Systeme auszuschließen. Vielmehr den Einsatz so zu gestalten, dass mit geringen Komponenten und Systemen eine hohe Performance – aber eben nicht die max. Performance bezogen auf eine Zielgröße – erreicht wird.

Neben diesen Fragestellungen zum Umgang und der Interaktion Gebäude – Technik, steht das Bauwesen durch die notwendigen Anforderungen an die Umweltverträglichkeit vor großen Herausforderungen. Eine ganzheitliche Betrachtung unter Berücksichtigung der Kreislauffähigkeit von Baustoffen v.a. im Einsatz zur Effizienzsteigerung und der Umgang mit dem Bestand sowie die erforderliche Sektorenkopplung von Strom und Wärme erfahren erst mit dem steigendem politischen eine hohe Aufmerksamkeit und führen zu Umbrüchen und Paradigmenwechseln im Bauen. Daraus ergeben sich auch hinsichtlich Normierung und Berechnungsmethoden sowie der Festlegung von Bezugsgrößen weg vom Flächenbezug hin zu einem pro Kopf Verbrauch Potentiale zur Vereinfachung im Bauen. In diesen spannenden Fragestellungen gilt es nun nicht den Erfolg an der Steigerung der Performance festzumachen, und stumpf zu rechnen, sondern Prozesse und Anforderungen in Frage zu stellen und das einfache Bauen – v.a. zur Schaffung und Erhalt von Baukultur – nicht zu verlieren.

BRAND

**Brandschutzforschung für die Verwendung
von Holzkonstruktionen im
Mehrgeschossigen Wohnbau**

Rechnerische Brandschutzbemessung von Holzbauteilen. Berechnungsmethoden bis 90 Minuten Feuerwiderstand: Projekt «FREI 90»

Michael Rauch
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München
München, Deutschland



Norman Werther
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München
München, Deutschland



Rechnerische Brandschutzbemessung von Holzbauteilen. Berechnungsmethoden bis 90 Minuten Feuerwiderstand

1. Einführung und Hintergrund

Dieser Beitrag basiert auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens «F-REI 90 – Ein analytisches Berechnungsverfahren für Holzrahmen- und Holzmassivbauteile bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten» [1], gefördert durch die Forschungsförderung Zukunft Bau.

Ein gesteigertes ökologisches Bewusstsein, verbunden mit den Vorteilen der Holzbauweise und der geforderten Verdichtung im urbanen Raum führen dazu, dass der Holzbau zunehmend für mehrgeschossige Gebäude bis zur Hochhausgrenze nachgefragt wird. Trotz der vielen Vorteile dieser Bauweise ist Holz ein brennbarer Baustoff, der einerseits im Brandfall an Querschnittsgröße, Festigkeit und Steifigkeit verliert – das gilt genauso für andere Baustoffe – und andererseits im ungeschützten Zustand einen zusätzlichen Beitrag zur Branddynamik leisten kann. Baurechtlich werden brennbare und nichtbrennbare Baustoffe somit auch unterschiedlich behandelt. Seit Jahrzehnten existierende baurechtliche Anforderungen und Nachweismethoden bilden allerdings den aktuellen technologischen Stand des Holzbaus nicht ausreichend ab und führen bei Planung und Ausführung häufig zu Diskussionen und Unklarheiten. Durchgeführte Forschungsprojekte und Referenzbeispiele, wie der Prinz-Eugen-Park [2] in München, zeigen deutlich die Leistungsfähigkeit des Baustoffes Holz. Gegenwärtige Entwicklungen im Baurecht ermöglichen u.a. durch die Novellierung der Bauordnungen und die Veröffentlichung der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL) [3] die Anwendung brennbarer Baustoffe bis zur Hochhausgrenze. Im Gegensatz zu den Ausführungslösungen der Praxis weisen die rechnerischen Nachweise dieser Bauteile noch große Lücken auf, so dass im Regelfall kosten- und zeitintensive Ver- und Anwendbarkeitsnachweise auf Basis von Bauteilprüfungen als Nachweis herangezogen werden müssen. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keine Nachweismöglichkeit für den Planer in Deutschland auf Basis rechnerischer Methoden eine geforderte Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten für tragende und raumabschließende Wand und Deckenelemente sowie die Leistungseigenschaft von Bekleidungsmaterialien oder biogenen Dämmstoffen umfassend nachzuweisen. Tabellierte Bauteilaufbauten der DIN 4102-4:2016 decken das baupraktisch geforderte Spektrum nicht ausreichend ab und die Berechnungsverfahren der DIN EN 1995-1-2:2012-Anhang C und E sind auf eine Beanspruchung von 60 Minuten begrenzt.

2. Grundlagen

2.1. Baurechtliche Grundlagen

Parallel zur Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens fand eine ständige Weiterentwicklung des Baurechts statt. Während zu Beginn des Forschungsprojektes nur in einzelnen Bundesländern, wie beispielsweise Baden-Württemberg, Berlin oder Hamburg, die Bauordnungen den mehrgeschossigen Holzbau bis zur Hochhausgrenze ermöglichten, wurde inzwischen die Musterbauordnung [4] angepasst. Hochfeuerhemmende Bauteile mit tragenden und aussteifenden Teilen aus brennbaren Baustoffen waren ursprünglich nur mit einer allseitig brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung möglich. Für feuerbeständige Bauteile wurde neben der Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten auch die Nichtbrennbarkeit der Baustoffe gefordert. Mehrgeschossiger Holzbau in Gebäudeklasse 5 war somit nur über eine objektspezifische Abweichung im präskriptiven Brandschutznachweis möglich.

Durch die Novellierung wurden die ursprünglichen Anforderungen für hochfeuerhemmende bzw. feuerbeständige Bauteile beibehalten und ergänzend hierzu ein neuer Weg für den Holzbau eröffnet:

«⁴Abweichend von Abs. 2 Satz 3 sind andere Bauteile, die feuerbeständig oder hochfeuerhemmend sein müssen, aus brennbaren Baustoffen zulässig, sofern sie den **Technischen Baubestimmungen** nach § 85a entsprechen. ⁵Satz 4 gilt nicht für Wände nach § 30 Abs. 3 Satz 1 und Wände nach § 35 Abs. 4 Satz 1 Nr. 1.» [4].

Als Technische Baubestimmung wurde die M-HFHolzR [5] weiterentwickelt und in eine neue Richtlinie, die «Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise» (MHolzbaURL) [3] überführt.

Somit können zukünftig Gebäude in Gebäudeklasse vier und fünf in Holzbauweise inklusive eines Anteiles sichtbarer Holzoberflächen ohne eine Abweichung vom präskriptiven Baurecht realisiert werden. Für diesen neuen Anwendungsbereich sind Nachweismethoden erforderlich.

2.2. Bestehende Berechnungsmethoden

Nachfolgende Abbildungen zeigen die zeitliche Entwicklung der Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer für den Raumabschluss (vgl. Abbildung 1) sowie der Tragfähigkeit (vgl. Abbildung 2) für Wand- und Deckenbauteile in Holzbauweise.

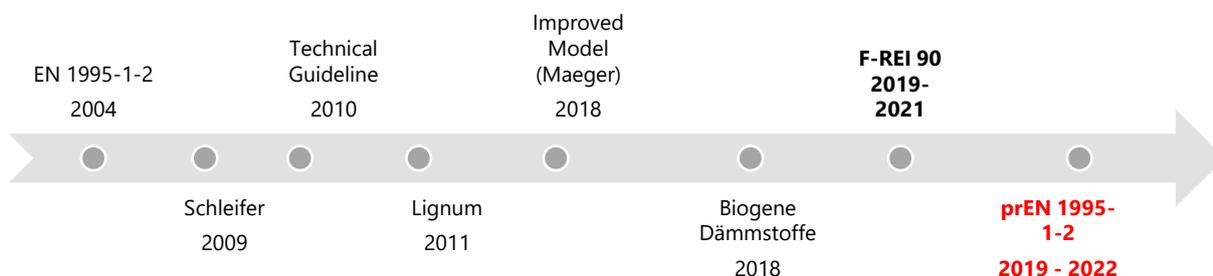


Abbildung 1: Zeitstrahl - Rechenmethoden zur Ermittlung des Raumabschlusses von Holzbauteilen im Brandfall

Während im deutschen Raum Verfahren zur Berechnung des Raumabschlusses nur selten praktisch angewandt werden – hier wird in der Regel auf herstellereigene Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweise zurückgegriffen – sind rechnerische Methoden zum Nachweis der Tragfähigkeit in der Praxis üblich.

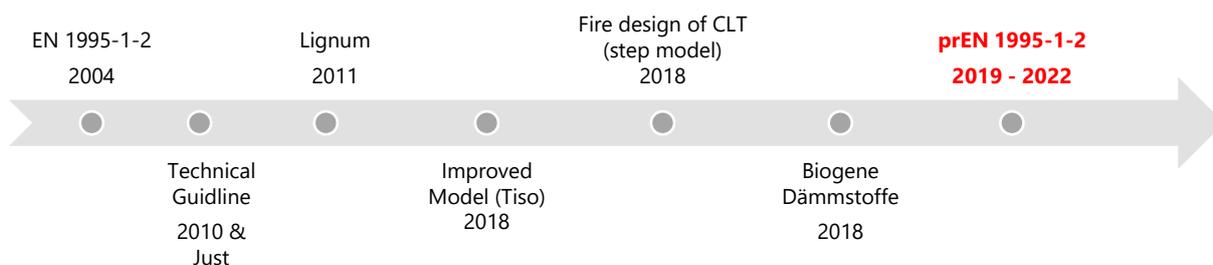


Abbildung 2: Zeitstrahl - Rechenmethoden zur Berechnung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen im Brandfall

Die Ursache für die unterschiedliche Herangehensweise liegt an der Verantwortung hinsichtlich der Nachweisführung. Während der Nachweis der Tragfähigkeit durch den Tragwerksplaner erbracht wird, stellt sich hinsichtlich des Raumabschlusses die Frage der Nachweisverantwortung. Einerseits liegt die Zuständigkeit für die Definition der Beanspruchung (hier die Brandbeanspruchung), somit auch für die Unterscheidung, ob eine einseitige oder mehrseitige Brandbeanspruchung vorliegt, im Verantwortungsbereich des Tragwerksplaners. Der Architekt entwickelt die Details im Zuge der Ausführungsplanung. Konstruktive Maßnahmen (wie z.B. die Lage der Abdichtungsmaßnahmen zur Begrenzung des Rauchdurchtritts im Anschlussbereich) sind ein Teil der Detailplanung und werden, da sie die tragenden Bauteile nicht direkt betreffen, nicht durch den Tragwerksplaner nachgewiesen. Hinsichtlich der Verantwortlichkeit für den Nachweis des Raumabschlusses der flächigen Bauteile gibt es keine eindeutige Regelung. Dennoch muss der Nachweis erbracht

werden. Die konstruktive Umsetzung der im Nachweis ermittelten Vorgaben zu Querschnitten, Bekleidungslagen und Fugen bzw. notwendigen Maßnahmen zur Erfüllung des Raumabschlusses sind im Zuge der Ausführungsplanung und späteren Ausführung umzusetzen.

Während in Deutschland die DIN EN 1995-1-2:2010-12 [6] als eingeführte technische Baubestimmung den einzigen rechnerischen Anwendbarkeitsnachweis für die Brandbemessung darstellt, hat sich in der Schweiz und in Österreich das Verfahren nach «Schleifer» [7] durchgesetzt. Im additiven Verfahren werden die Schutzzeiten (t_{prot}) der Einzelschichten (Zeitpunkt bis zu einer Temperaturerhöhung von jeweils 250 K) bzw. auf der feuerabgewandten Seite die Isolationszeiten (t_{ins}), dem Zeitpunkt bis zum Erreichen von 140 K Temperaturerhöhung, addiert und somit die Isolationszeit der Konstruktion ermittelt (vgl. Abbildung 3). Der Einfluss davor- bzw. dahinterliegender Schichten wird durch Positionsbeiwerte ermittelt.

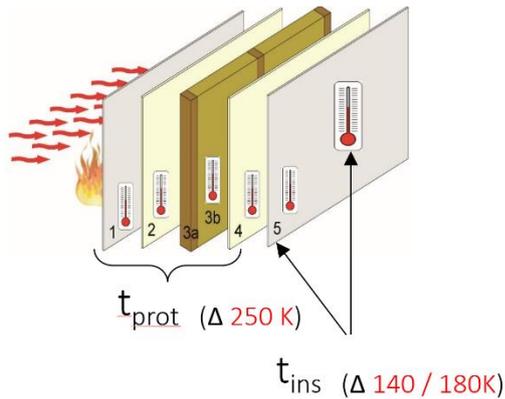


Abbildung 3: Systematische Bauteildarstellung als Grundlage für das additive Berechnungsverfahren basierend auf dem Verfahren nach Schleifer [7].

$$t_{ins} = \sum t_{prot,i-1} + t_{ins,i} \quad (Gl. 1)$$

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t) \cdot k_{j,i} \quad (Gl. 2)$$

mit:

t_{ins}	[min]	Isolationszeit der Konstruktion
$t_{prot,0}$	[min]	Grundschutzzeit einer Schicht
$t_{prot,i}$	[min]	Schutzzeit der Schicht i unter Berücksichtigung der Positionsbeiwerte und des Fugenbeiwertes
$k_{pos,exp}$	[-]	Positionsbeiwert feuerzugewandt
$k_{pos,unexp}$	[-]	Positionsbeiwert feuerabgewandt
Δt	[min]	Faktor zur Berücksichtigung der Schutzwirkung über die Schutzzeit hinaus
k_j	[-]	Fugenbeiwert

In der Weiterentwicklung nach Mäger [8] wird die schützende Wirkung von brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungen wie z.B. Gipsplatten, die dahinterliegende Bauteilschichten auch nach dem Erreichen von 250 K Temperaturerhöhung schützen, bis zum Versagen bzw. Abfallen dieser Schichten als externer Einflussparameter Δt mitberücksichtigt. Ergänzend werden die Schutzzeiten für Dämmstoffe begrenzt. Das Verfahren nach Schleifer mit den Erweiterungen nach Mäger bildet die Grundlage für die Separation Function Method (SFM) der prEN 1995-1-2 [9]. Da die Schutzzeit als Kriterium für den Beginn des Abbrandes herangezogen werden kann, wurde der Raumabschluss bzw. der Beitrag der Einzelschichten zum Feuerwiderstand im Forschungsvorhaben F-REI 90 fokussiert. Eine Validierung von Versuchen, berechnet nach dem Verfahren der Lignum Dokumentation Brandschutz 3.1 [10] mit Erweiterungen für Holzfaserdämmstoffe, bzw. dem erweiterten Verfahren nach prEN 1992-1-2 (Final Draft) [9] ist in Abbildung 4 dargestellt.

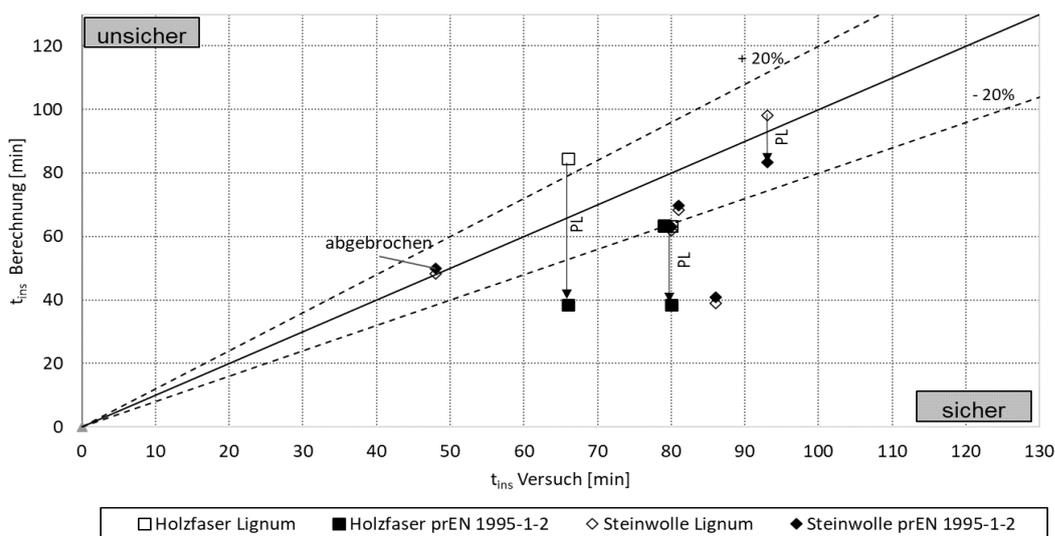


Abbildung 4: Validierung der bestehenden Verfahren zum Raumabschluss mit Berücksichtigung der Begrenzung der Schutzzeit für Dämmstoffe durch das Protection Level (PL)

Abbildung 4 zeigt den Einfluss der Begrenzung der Schutzzeit für Holzfaserdämmstoffe bzw. Steinwolle in Anlehnung an Mäger, Just, et al. [8], die in der prEN 1995-1-2:2021-11 [9] mitberücksichtigt wird. Nach dem Lignum-Verfahren noch auf der «unsicheren» Seite liegenden Konstruktionen werden auf die «sichere» Seite verschoben. Konstruktionen mit Feuerwiderstandsdauern über 60 Minuten (vgl. Abbildung 4) werden im Berechnungsverfahren ebenso konservativ abgebildet wie Konstruktionen mit geringeren Feuerwiderstandsdauern, die bereits durch Schleifer [7] validiert wurden.

3. Forschungsansatz und Umsetzung

Aus dem Vergleich und der Validierung der Berechnungsmodelle ergeben sich unterschiedliche Fragestellungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht wurden. Folgende Aspekte werden in diesem Beitrag vorgestellt:

- Der Wärmedurchgang identischer Konstruktionsaufbauten in unterschiedlichen Abmessungen und in unterschiedlichen Brandprüföfen wurde verglichen.
- Das Berechnungsverfahren und die Positionsbeiwerte für Brandbeanspruchungen über 60 Minuten wurden analysiert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen.
- Im Verfahren nach Lignum wird für Holzwerkstoffplatten und massive Holzplatten eine Grundschutzzeit und Grundisolationszeit über eine Exponentialfunktion berechnet. Für Holzwerkstoffe ist in DIN EN 1995-1-2:2012 – Tabelle 3.1 eine Abbrandrate von 0,9 für Holzwerkstoffplatten angegeben. Es wurde untersucht, ob zukünftig eine einheitliche Bestimmung von Schutzzeiten auf Basis einer Abbrandrate möglich ist.
- In Deutschland müssen Deckenkonstruktionen auch von der Oberseite nachgewiesen werden. Um den positiven Einfluss von Fußbodenaufbauten und Estrichen zu berücksichtigen, ist eine Erweiterung des Berechnungsverfahrens notwendig.
- Für Brettsperrholzelemente ist für Decken, deren Klebefugen im Brandfall versagen und zu einem Abfallen von Lagen führen, das Stufenmodell in der prEN 1995-1-2:2022-11 enthalten. Für Wände ist ein pauschaler Erhöhungsfaktor der Abbrandrate möglich. Eine Anwendung des Stufenmodells für Wandkonstruktionen wurde im Forschungsvorhaben geprüft, um wirtschaftlichere Berechnungsergebnisse zu erhalten und die Methodik für Wände und Decken zu homogenisieren.

Zur Untersuchung dieser Aspekte wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, diese ggf. über numerische Simulationen ergänzt und basierend darauf Bestimmungsgleichungen für die SFM optimiert oder neue Gleichungen abgeleitet. Diese Gleichungen stellen eine Erweiterung der bisherigen Berechnungsmodelle für den Raumabschluss dar (vgl. Abbildung 1) und beeinflussen den Beginn des Abbrandes und somit auch die Tragfähigkeit.

4. Experimentelle Untersuchungen

Um den Beitrag von Einzelschichten zum Feuerwiderstand sowie der Gesamtkonstruktionen zu untersuchen wurden Versuche in unterschiedlichen Geometrien von Brandöfen und verschiedener Probekörperabmessungen durchgeführt (vgl. Abbildung 5 bis Abbildung 10).

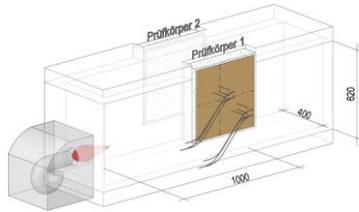


Abbildung 5: Systemskizze -Teil 8 - Ofen



Abbildung 6: Prüfaufbau - Teil 8 - Ofen

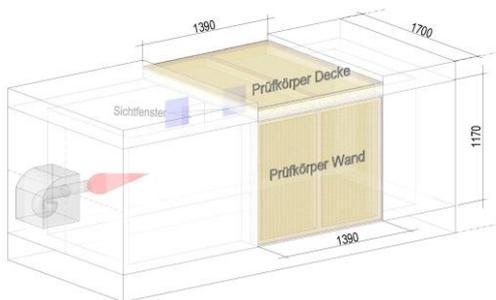


Abbildung 7: Systemskizze - 1 m x 1 m Wand / Decke



Abbildung 8: Brandprüfung - 1 m x 1 m Wand / Decke

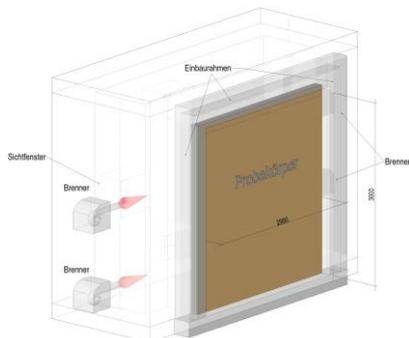


Abbildung 9: Systemskizze Brandversuch 3 m x 3 m



Abbildung 10: Brandversuch 3 m x 3 m

Die Vergleichsuntersuchungen hatten das Ziel einen Einfluss unterschiedlicher Ofengrößen und der zugehörigen Probekörperabmessungen auf den Wärmedurchgang, bei ansonsten gleichem Aufbau, aufzuzeigen. Da der Wärmedurchgang in diesen Versuchen vergleichbar war, wurden zur weiteren Untersuchung an Holzwerkstoffplatten, Gipsplatten und Estrichaufbauten experimentelle Untersuchungen im Teil- 8 Ofen nach DIN 4102-8 [11] unter ETK- Beanspruchung nach EN 1363 [12] durchgeführt (vgl. Abbildung 5 bzw. Abbildung 6). Um ergänzend zum Wärmedurchgang den Einfluss von unterschiedlichen Hinterlegungsmaterialien (Dämmstoff und Brettsperholz) auf das Versagen (Abfallen) von Gipsplatten (18 mm dicke GKF Platten) zu untersuchen, wurde zudem ein großmaßstäblicher Deckenversuch durchgeführt (vgl. Abbildung 11). Neben den experimentellen Untersuchungen wurden durch die Industriepartner im Projekt Versuchsergebnisse aus normativen Brandprüfungen zur Verfügung gestellt, um die eigenen Prüfergebnisse zu erweitern und die Berechnungsergebnisse zu validieren.

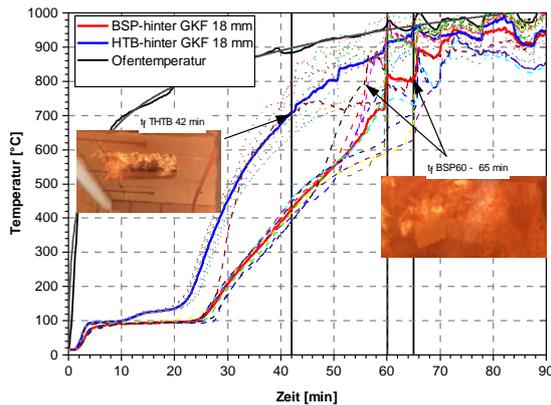


Abbildung 11: Vergleichsuntersuchung des Wärmedurchgangs und der Abfallzeiten von Gipsplatten auf Brettsperrholzelementen (BSP) bzw. auf Holztafelbauelementen (HTB) in einem Versuch

5. Numerische Untersuchung von Einzelschichten

Resultierend aus den experimentellen Untersuchungen wurden durch eine antwortflächenbasierte Optimierung die Materialkennwerte Rohdichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit für die numerische Simulation optimiert bzw. für neue Bauteilschichten, wie beispielsweise Zementestriche, ermittelt. Die numerischen Untersuchungen wurden mittels dem Softwarepaket Ansys Workbench 2020 R3 in Verbindung mit dem Optimierungstool OptiSLang 2020 durchgeführt. Mittels der abgeleiteten thermischen Materialkennwerte wurden basieren auf zahlreichen numerischen Simulationen analytische Bestimmungsgleichungen abgeleitet.

Beispielhaft ist der Prozess nachfolgend anhand der Materialparameter für Zementsstriche dargestellt:

- I. Durchführung von Versuchen mit unterschiedlichen Estrichdicken auf Spanplatte (SP):
 - V1: Estrich 35 mm Dicke
 - V2: Estrich 25 mm Dicke
 - V3: Estrich 55 mm Dicke
- II. Auswahl der Startparameter der thermischen Materialkennwerte für die Simulation (hier nach EN 1992-1-2[13])
- III. Optimierung der Parameter und Vergleich mit den Versuchsergebnissen
- IV. Ableitung von analytischen Bestimmungsgleichungen für die SFM.

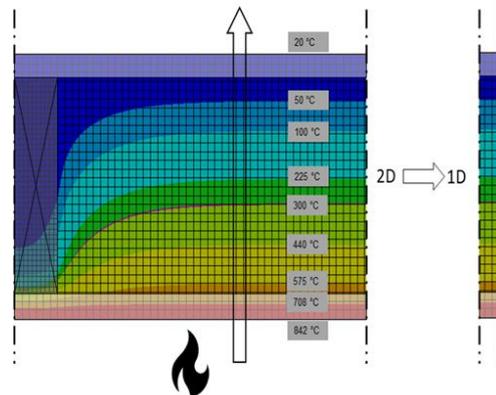


Abbildung 12: Numerisches Simulationsmodell (1-D) zur Berechnung des Temperaturverlaufes im Brandfall

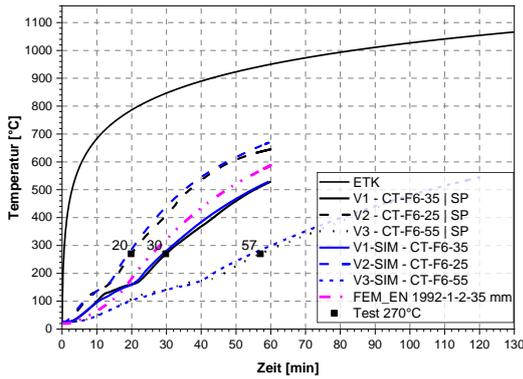


Abbildung 13: Simulation von Estrichaufbauten im Vergleich zu den Versuchsergebnissen

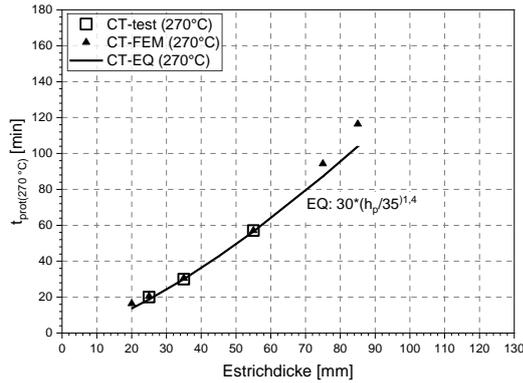


Abbildung 14: Ableiten der Bestimmungsgleichung für Zementestriche aus der Simulation bzw. dem Versuch

6. Analytisches Rechenmodell und Ergebnisse

6.1. Das grundlegende Modell

Das analytische Berechnungsmodell basiert auf dem Modell nach Schleifer [7] bzw. den Weiterentwicklungen nach Mäger, Just et al. [8]. Durch die Trennung zwischen der Schutzwirkung der kritischen Erwärmung und dem Versagen durch Abfallen der Schichten ist es möglich, eine Schicht über die Parameter Schutzzeit (t_{prot}), Versagenszeit (t_f) und den zugehörigen Positionsbeiwerten zu beschreiben. Neue Materialien können somit nachträglich in das bestehende Modell integriert werden oder unterschiedliche Befestigungssysteme über den Parameter t_f berücksichtigt werden.

6.2. Validierung für lange Brandbeanspruchungen

Um eine Anwendung des Berechnungsmodells für lange Brandbeanspruchungen (über 60 Minuten hinaus) zu untersuchen wurde neben der Validierung der Gesamtkonstruktionen (vgl. Abbildung 4) zusätzlich der feuerzugewandte Positionsbeiwert, der Einflussfaktor langer Vorerwärmungszeiten von Schichten innerhalb der Konstruktion, betrachtet.

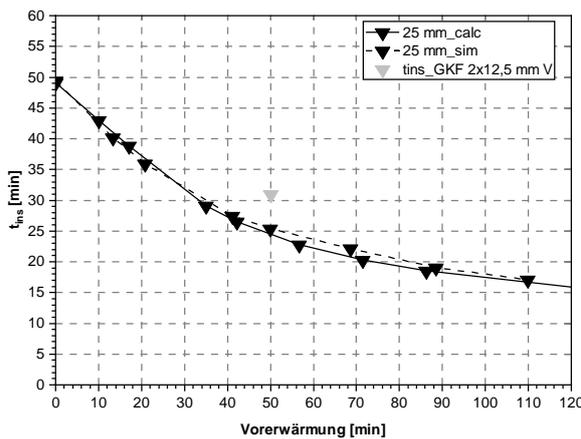


Abbildung 15: Vergleich von Versuch, Simulation und analytischem Berechnungsansatz für t_{ins} von GKF-Platten hinter Dämmstoffen abhängig von der Vorerwärmung (nur ein Versuch 2 x 12,5 mm GKF)

mit: V Versuch
 calc Berechnungsmodell
 sim Simulation

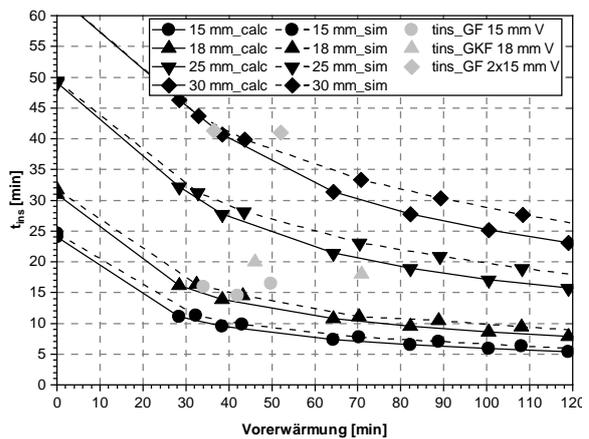


Abbildung 16: Vergleich von Versuch, Simulation und analytischem Berechnungsansatz für t_{ins} von GKF-Platten hinter Holzwerkstoffplatten

Es konnte gezeigt werden, dass das Modell und die Positionsbeiwerte nach Schleifer [7] auch für lange Brandbeanspruchungen (somit lange Vorerwärmungszeiten der feuerabgewandten Schicht) konservative Ergebnisse liefert (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16).

6.3. Ein überarbeitetes Modell für Holzwerkstoffplatten

Für Holzwerkstoffplatten wird die Grundschutzzeit nach Schleifer [7] über eine Exponentialgleichung beschrieben. Da die Grundschutzzeit (mittlere Temperaturerhöhung auf 270 °C) durch den hohen Gradienten hinter der Bekleidungsfläche zwischen 270 °C und 300 °C mit dem Beginn des Abbrandes vergleichbar ist, kann anstelle der Exponentialgleichung für t_{prot} das bisherige Modell über Abbrandraten auch zur Bestimmung der Schutzzeit mit angesetzt werden. Der negative Einfluss dahinterliegender dämmender Schichten wird über den Positionsbeiwert auf der feuerabgewandten Seite mitberücksichtigt. Über eine Rückrechnung aus den bestehenden Ergebnissen sowie aus ergänzenden experimentellen Untersuchungen wurden folgende Abbrandraten berechnet:

Tabelle 1: Abbrandraten für Holzwerkstoffplatten

	β_0 [mm/min)	Bezugsrohddichte [kg/m ³]	Referenzdicke [mm]
Massivholz	0,65	450	20*
Spanplatte	0,72	450*	20*
OSB – Platten / MDF- Platten	0,9	450*	20*
LVL	0,9	450*	20*

* abweichende Rohdichten bzw. Dicken können über die Korrekturfaktoren nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 (vgl. Gl. 6 und Gl. 7) bestimmt werden.

6.4. Fußbodenaufbauten als brandschutztechnisch wirksame Schicht in der SFM

Fußbodenaufbauten auf der Deckenoberseite liefern einen wesentlichen Beitrag zum Feuerwiderstand für eine Brandbeanspruchung von der Oberseite. Dieser Nachweis ist in Deutschland zwingender Bestandteil für den Feuerwiderstand einer Deckenkonstruktion. Das bisherige Berechnungsmodell der SFM wurde daher um Estriche und Trittschalldämmstoffe erweitert. Somit ist es zukünftig möglich, die Schutzzeit von Estrichen bei der Berechnung des Raumabschlusses von Deckenkonstruktion mit Brandbeanspruchung von der Oberseite zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Mindestdicken von Estrichen, der Kombination Estrich + Trittschalldämmung bzw. Estrich + Holzwerkstoffplatte bis zum Erreichen der Schutzzeit von 30, 60 oder 90 Minuten (ausgehend von einer Hinterlegung mit Holz bzw. Holzwerkstoffen)

		Estrichdicke [mm]									
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	80
S							30			60	90
15 I		-		30				60			90
20 I		-		30			60			90	
30 I			30		60				90		
13 H				30				60			90
15 H				30				60			90
19 H			30			60				90	
mit:	S	t_{prot} der Estrichschicht (hinterlegt mit Holzwerkstoffplatten)									
	xx I/W	Dicke des Hinterlegungsmaterials									
	I:	Trittschalldämmung Rohddichte $\geq 100 \text{ kg/m}^3$									
	H:	Holz bzw. Holzwerkstoffplatte									

6.5. Massivholzelemente – Das Stufenmodell für Wände

In prEN 1995-1-2:2021-11 [9] ist zur Bestimmung des Restquerschnittes von Brettsperrholzdecken ohne nachgewiesene thermischen Beständigkeit der Klebefugen im Brandfall (bond line integrity not maintained) das Stufenmodell anzuwenden. Wird gewährleistet, dass die Klebefuge nicht vor dem Erreichen des Abbrandes (300 °C Isotherme) versagt, kann mit dem linearen Abbrandmodell gerechnet werden und ein vorzeitiges Versagen (Abfallen) der Lamellen muss nicht mitberücksichtigt werden (vgl. Abbildung 17). Bei einem Abfallen verkohlender Brettlagen ist das Stufenmodell (vgl. Abbildung 18 Phase 1 bis 4) zu berücksichtigen. In Phase 1 ist die materialspezifische Abbrandrate (in der Regel 0,65 mm/min) zu berücksichtigen. Nach dem Abfallen der Lamelle (Phase 3) ist die doppelte Abbrandgeschwindigkeit ($k_3 = 2$) bis zum Erreichen einer Abbrandtiefe von 25 mm anzusetzen. Danach (Phase 4) kann wieder bis zum Erreichen der nächsten Klebefuge die ursprüngliche Abbrandrate herangezogen werden.

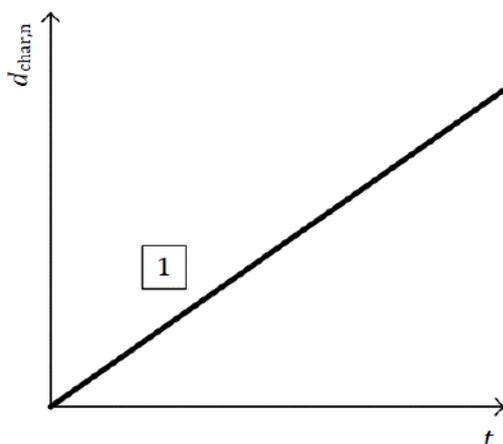


Abbildung 17: Abbrandmodell für einen ungeschützten Holzquerschnitt ohne die Berücksichtigung des vorzeitigen Versagens von Einzellamellen (z.B. Vollholzquerschnitt) → linearer Ansatz

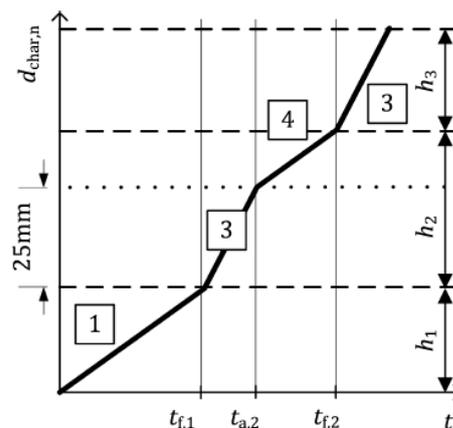


Abbildung 18: Abbrandmodell für einen ungeschützten Holzquerschnitt unter Berücksichtigung des vorzeitigen Versagens von Einzellamellen (z.B. BSP-Decke) → Stufenmodell

Für Wandkonstruktionen ist anstelle zum Stufenmodell eine pauschale Erhöhung der Abbrandrate zur Berücksichtigung des Abfallens der Einzellamellen zulässig. Als globale Abbrandrate über alle Lamellen kann für Wände zur Bestimmung des Restquerschnitts nach prEN 1995-1-2:2021-11 folgender Wert (Gl.1) genutzt werden:

$$\text{für Wände} \quad \beta_n = 1,2 \cdot k_g \cdot \beta_0 \quad (\text{Gl. 3})$$

mit:

β_n	[mm/min]	Abbrandrate innerhalb einer Phase, in mm/min
β_0	[mm/min]	Grundwert der eindimensionalen Abbrandrate, in mm/min
k_g	[-]	Faktor zur Berücksichtigung von Fugen i.d.R. = 1

Die 20 % Erhöhung der Abbrandrate (ausgedrückt durch den Faktor 1,2) decken den Einfluss eines Abfallens von anhaftender Holzkohle ab. Anstelle eines Stufenmodells darf vereinfacht ein linearer Ansatz mit erhöhter Abbrandrate gewählt werden. Dies führt vor allem für die erste brandzugewandte Lamelle zu einem erhöhten Abbrand im Vergleich zum Stufenmodell und somit vor allem für dreischichtige Brettsperrholzelementen zu unwirtschaftlicheren Ergebnissen. Im nachfolgenden wurde ein Ansatz für das Stufenmodell vorgeschlagen, um Wandkonstruktionen zu berechnen. Der Einfluss des Abfallens von Lagen ist aufgrund der Orientierung geringer als bei Deckenkonstruktionen. Somit wurde für das Stufenmodell bei Wänden entsprechend Abbildung 18 ein geringerer k_3 - Faktor ermittelt.

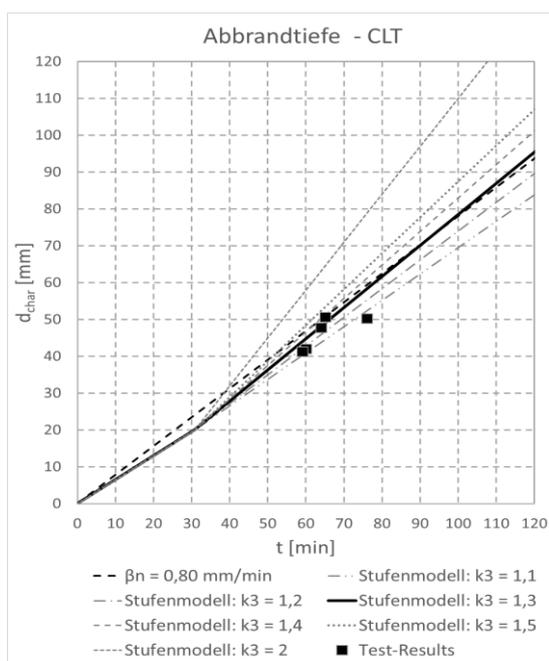


Abbildung 19: Vergleich zwischen Stufenmodell ($k_3=1,1$ bis $2,0$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) eines 7-lagigen BSP-Wandelementes (20-20-20-20-20-20-20) sowie zugehöriger Versuche unterschiedlich dicker Brettsperrholzelemente mit 20 mm dicken Einzellagen

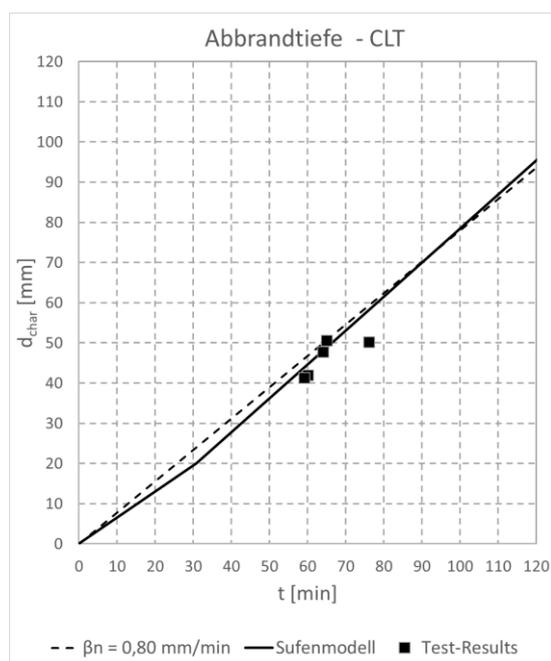


Abbildung 20: Vergleich zwischen Stufenmodell ($k_3=1,3$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) eines 7-lagigen BSP-Wandelementes (20-20-20-20-20-20-20) sowie zugehöriger Versuche unterschiedlich dicker Brettsperrholzelemente mit 20 mm dicken Einzellagen

Die Auswertung zeigt, dass die Anwendung eines k_3 -Faktor von 1,3 innerhalb der Phase 3 des Abbrandmodells bei Wänden ($\beta_n = 1,3 \cdot k_g \cdot \beta_0$) eine gute Übereinstimmung mit dem globalen linearen Ansatz einer erhöhten Abbrandrate sowie den Versuchsergebnissen liefert. Für die Abbrandrate im Stufenmodell bei Brettsperrholzwänden in der Phase 1 und 4 darf analog zum Stufenmodell bei Decken der Grundwert der Abbrandrate mit 0,65 mm/min angesetzt werden. Hierdurch wird besonders für dreilagige Wandelemente eine optimierte Bemessung ermöglicht.

7. Zusammenfassung und Ausblick für die Normung

Im hier durchgeführten Forschungsvorhaben wurden experimentelle, numerische und analytische Untersuchungen zu brandbeanspruchten Holzbauteilen durchgeführt. Es wird gezeigt, dass das erweiterte Berechnungsmodell der prEN 1995-1-2 [9], basierend auf Schleifer [7] für Brandbeanspruchungen bis 120 Minuten angewendet werden kann und eine gute Grundlage zur Berechnung des Raumabschlusses darstellt. Die vorhandenen Positionsbeiwerte können herangezogen werden und die neuen Ansätze zur Berechnung des Δt -Wertes bzw. der Begrenzung der Schutzzeit der Dämmstoffe liefern konservative Ergebnisse. Mit zunehmender Branddauer nimmt die Sicherheit des Verfahrens zu. Das additive, auf Einzelschichten basierende Verfahren ermöglicht es, neue Materialien oder Bauteilschichten zu integrieren sowie bestehende Erkenntnisse zu Einzelschichten zu optimieren. Es wurde ein einheitliches Modell für Holzwerkstoffplatten, basierend auf Abbrandraten, vorgeschlagen. Ergänzend hierzu wird das Berechnungsverfahren durch neue Bestimmungsgleichungen für Estriche erweitert und ermöglicht eine Berechnung des Raumabschlusses sowie der Schutzwirkung für Decken bei einer Brandbeanspruchung von der Oberseite. Für Wände aus Brettsperrholz wird ein optimierter, wirtschaftlicherer Bemessungsansatz, basierend auf dem Stufenmodell, analog zu Deckenbauteilen vorgestellt. Die Ergebnisse wurden im Prozess zur Weiterentwicklung der prEN 1992-1-2 vorgestellt und bestätigen bzw. erweitern die bisherigen Berechnungsmethoden.

8. Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde mit finanzieller Unterstützung der Forschungsinitiative Zukunft Bau durchgeführt. Zusätzliche Unterstützung in finanzieller Art, sowie durch die Lieferung von Material oder die Zurverfügungstellung von Prüfergebnissen erfolgt durch die Beteiligung von zahlreichen Unterstützern. Hierfür möchten wir uns besonders bedanken, da dieses, mit hoher Praxisrelevanz versehene Forschungsvorhaben, nur in enger Zusammenarbeit mit der Praxis und deren Unterstützung umgesetzt werden konnte.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Rauch, M.; Werther, N.; Suttner, E.; Winter, S.: F-REI 90 - Ein analytisches Berechnungsverfahren für Holzrahmen und Holzmassivbauteile bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten. Bonn, noch nicht veröffentlicht
- [2] Hafner, A.; Schäfer, S.; Krause, K.; Rauch, M.; Merk, M.; Werther, N.; Optisch, W.: Methodenentwicklung zur Beschreibung von Zielwerten zum Primärenergieaufwand und CO₂-Äquivalent von Baukonstruktionen zur Verknüpfung mit Grundstücksvergaben und Qualitätssicherung bis zur Entwurfsplanung. Bochum, 01/2017
- [3] Bauministerkonferenz: Muster- Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (idF v. 10.2020) (2021)
- [4] Bauministerkonferenz: Musterbauordnung (idF v. 11.2002) (2020)
- [5] Bauministerkonferenz: Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise
- [6] DIN EN 1995-1-2:2010-12. 12/2010. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
- [7] Schleifer, V.: Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion. Dissertation. (2009)
- [8] Maeger, K.; Just, A.; Frangi, A.: Improvements to the Component Additive Method. SiF 2018– The 10th International Conference on Structures in Fire, (2018)
- [9] prEN 1995-1-2:2021-11. 09/2021. Eurocode 5 - Design of timber structures, Part 1-2: General - Structural fire design (Final Draft)
- [10] Frangi, A.; Angehrn, C.; Brühwilder, I.; Wiederkehr, R.: Feuerwiderstandsbemessung: Bauteile und Verbindungen. Zürich, 2019 (Lignum-Dokumentation Brandschutz 3.1)
- [11] DIN 4102-8:2003-10. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.
- [12] DIN EN 1363-1: 2012-10. Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
- [13] DIN EN 1992-1-2:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken

Brandbeanspruchung durch Naturbrandmodelle nach Eurocode anstatt ETK – Erleichterung für den Holz-Wohnungsbau?

Jochen Zehfuß
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Braunschweig, Deutschland



Sven Brunkhorst
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Braunschweig, Deutschland



Brandbeanspruchung durch Naturbrandmodelle nach Eurocode anstatt ETK – Erleichterung für den Holz-Wohnungsbau?

1. Einleitung

Die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach DIN EN 13501-2 [1] ist die nominelle Brandbeanspruchung für den Nachweis des Feuerwiderstandsverhaltens von Bauteilen von Standardgebäuden und Prüfgrundlage für Brandschutzprüfungen. Die ETK deckt die thermischen Einwirkungen unterschiedlicher natürlicher Brandverläufe überwiegend auf der sicheren Seite liegend ab. Der Nachweis des Feuerwiderstandes von Bauteilen kann entweder über klassische Feuerwiderstandsprüfungen oder über tabellarische bzw. vereinfachte oder erweiterte Bemessungsverfahren der Brandschutzteile der Eurocodes 2 bis 6 erfolgen. Mit den zur Verfügung stehenden Bemessungsverfahren sind individuelle Brandschutznachweise für Einzelbauteile sowie für Teil- und Gesamttragwerke in beliebigen Nutzungen möglich.

Neben der Brandbeanspruchung durch nominelle Temperaturzeitkurven ermöglichen die Eurocodes eine leistungsorientierte Bemessung mittels Naturbrandmodellen, die im Vergleich zur ETK ein realistischeres Abbild eines Realbrandes darstellen (Abbildung 1). DIN EN 1991-1-2 [2] unterscheidet zwischen vereinfachten und allgemeinen Brandmodellen zur Bestimmung einer Naturbrandbeanspruchung. Bei der Bemessung mit Naturbrandmodellen ist der Nachweis im Regelfall über die gesamte Dauer der thermischen Beanspruchung zu führen.

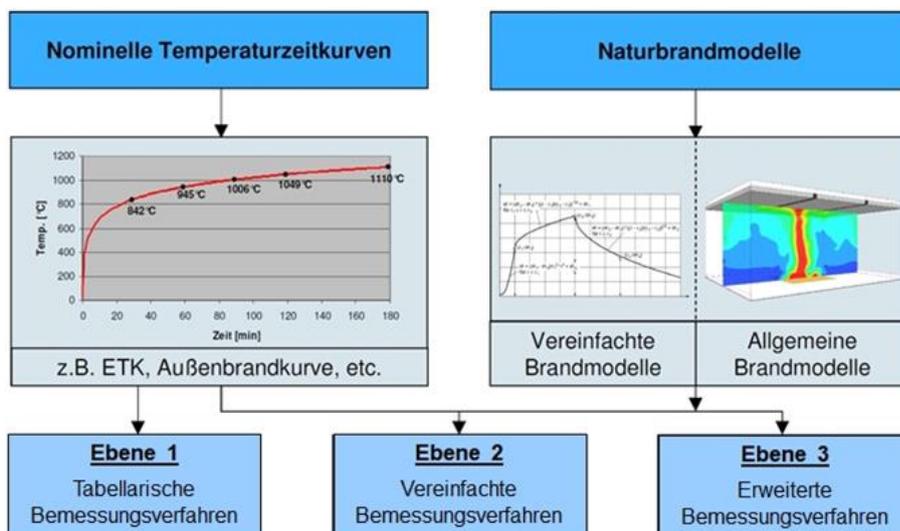


Abbildung 1: Brandschutzbemessungsverfahren der Eurocodes [3]

Bei der Ermittlung der thermischen Einwirkung im Brandfall mit einem Naturbrandmodell sind auf Grundlage maßgeblicher Bemessungsbrandszenarien entsprechende Bemessungsbrandverläufe in Form einer zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrate festzulegen. Die wesentlichen Parameter für den Bemessungsbrand sind die Brandlasten, Ventilationsverhältnisse und Brandraumgeometrie einschließlich der thermischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile. Die brandschutztechnische Infrastruktur, wie die öffentliche Feuerwehr und eine möglicherweise vorhandene Löschanlage, kann unter Berücksichtigung einer Ausfallwahrscheinlichkeit bei der Ermittlung der Bemessungs-Wärmefreisetzungsrate als auch der Bemessungs-Brandlastdichte über das Sicherheitskonzept berücksichtigt werden [4], [5]. Die thermischen Einwirkungen auf die Bauteile können als Temperaturzeitverlauf

oder Wärmestromdichte aus den Berechnungsergebnissen des Naturbrandmodells entnommen werden. Auf Grundlage der thermischen Einwirkung sowie der mechanischen Einwirkungen im Lastfall Brand kann dann ein Nachweis der notwendigen Leistungskriterien des Bauteils mit vereinfachten oder erweiterten Bemessungsverfahren stattfinden.

Die novellierte Fassung der Muster-Holzbaurichtlinie [6] ermöglicht die ungeschützte Ausführung von Massivholzbauteilen für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5. Beim Auftreten eines Brandes in derartigen Gebäuden beteiligen sich neben der mobilen Brandlast (Möblierung / Einrichtungsgegenstände) auch die ungeschützten und mitunter auch die anfänglich geschützten Holzbauteile, welche als strukturelle Brandlasten bezeichnet werden, am Brandgeschehen. Diese strukturellen Brandlasten sind innerhalb der brandschutztechnischen Bemessung bei der Anwendung von Naturbrandmodellen zu berücksichtigen.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Darstellung von Ansätzen zur Berücksichtigung von strukturellen Brandlasten in Naturbrandmodellen. Einleitend erfolgt eine Erörterung des Brandverhaltens von Holz. Weiterführend findet eine grundlegende Darstellung der Naturbrandmodelle statt. Über analysierte Brandversuche an Räumen in Holzbauweise mit teilweise ungeschützten Massivholzbauteilen folgt ein prinzipielles Aufzeigen der Auswirkungen von strukturellen Brandlasten auf den Brandverlauf, welche bei der Anwendung von Naturbrandmodellen zu berücksichtigen sind. Dabei werden Ansätze zur Abbildung struktureller Brandlasten in vereinfachten und allgemeinen Naturbrandmodellen dargestellt sowie ein Vergleich mit experimentellen Daten zur Validierung der Ansätze vorgenommen.

2. Brandverhalten von Holz

Holz und Holzwerkstoffe sind aufgrund der zentralen Bestandteile wie Cellulose und Lignin, welche aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff aufgebaut sind, brennbare Baustoffe [7]. Das Brandverhalten ist abhängig von baustoffspezifischen Eigenschaften sowie äußeren Einflussparametern. Die Entzündungstemperatur von Holz bzw. Holzwerkstoffen hängt von einer Vielzahl von Parameter wie Erwärmungsdauer, Dichte und Feuchte ab. Der wesentliche Einflussparameter von Bauholz in Innenräumen ist dabei die Erwärmungsdauer wie Abbildung 2 verdeutlicht. Aus Abbildung 2 ist ebenfalls ersichtlich, dass die Entzündungstemperatur keine Materialkonstante darstellt. In der Regel kann die Entzündungstemperatur vereinfacht für nicht vorgewärmtes Holz und bei einem Feuchtegehalt von Bauholz in Innenräumen zwischen 9 – 15 M-% mit 300 °C angesetzt werden.

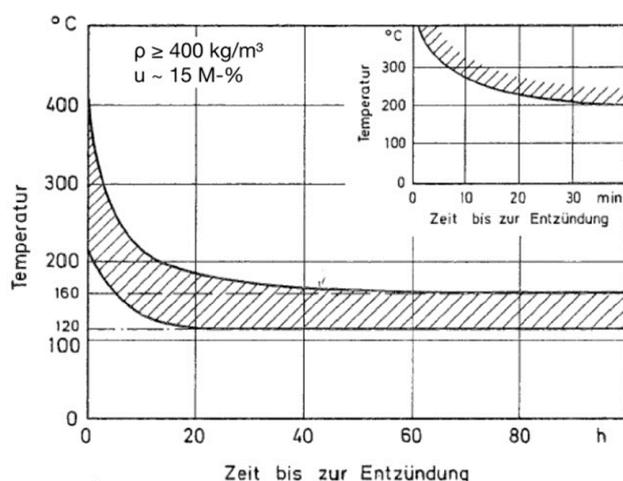


Abbildung 2: Entzündungstemperatur von Holz in Abhängigkeit der Erwärmungsdauer [7]

Die thermische Zersetzung (Pyrolyse) von Holz ist vereinfachend in Abbildung 3 dargestellt. Bei einer thermischen Beanspruchung erfolgt zunächst die Dehydratation des im Holz gebundenen Wassers, als endothermer Vorgang. Anschließend folgt die Pyrolyse des Holzes, bei der die Hauptbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin innerhalb einer Vielzahl an parallelen und/oder gekoppelten chemischen Reaktionen thermisch zersetzt werden. Diese chemische Zersetzungsreaktion erfolgt zunächst als endotherme Reaktion, bei der neben flüchtigen Produkten eine hochreaktive kohlenstoffhaltige Kohleschicht (Char) in der Pyrolysefront verbleibt. Die Lage der Pyrolysefront wird in der Literatur [7], [8] vereinfacht

in den Temperaturbereich um 300 °C eingeordnet. Durch die Oxidation der hochreaktiven Kohleschicht mit einströmenden Sauerstoff findet eine starke exotherme Verbrennungsreaktion statt.

Innerhalb des Pyrolysevorganges werden neben Wasserdampf und Kohlenstoffoxiden (CO und CO₂) die brennbaren Pyrolysegase freigesetzt, welche durch die poröse und gerissene Kohleschicht an die Außenoberfläche strömen und hier mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft als sichtbare Flammen oxidieren. Nach der vollständigen Pyrolyse verbleibt eine nicht reaktive und thermisch isolierende Kohleschicht. Die isolierende Wirkung der Kohleschicht reduziert durch die geringe Temperaturleitfähigkeit die Durchwärmung des Ausgangsmaterials infolge der thermischen Einwirkung aus der Verbrennung der Pyrolysegase. Mit anhaltender thermischer Beanspruchung findet eine vollständige Zersetzung der isolierenden Kohleschicht statt, welche zur Reduktion des Ausgangs-Querschnittes führt.

Die freigesetzte Wärmeenergie infolge der Verbrennung der Pyrolysegase ermöglicht eine ausreichende thermische Einwirkung für eine Aufrechterhaltung der Pyrolyse des Ausgangsmaterials, sodass der Zersetzungsprozess selbstständig erhalten bleibt.

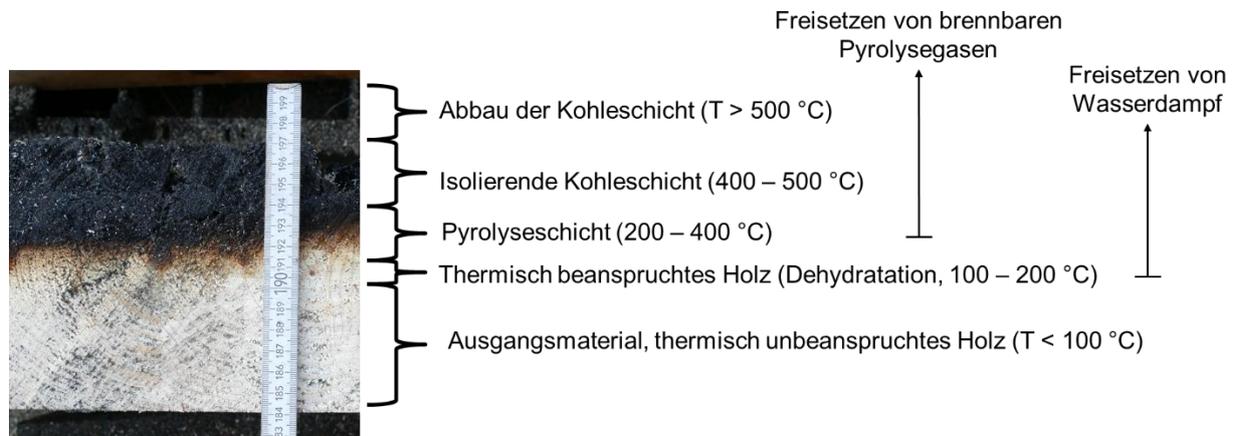


Abbildung 3: Thermische Zersetzung von Nadelholz (Fichte)

Das zeitliche Voranschreiten der Pyrolysefront in das Ausgangsmaterial kann als Abbrandrate in der Einheit mm/min beschrieben werden. Die Abbrandrate von Holz ist, wie experimentelle Untersuchungen zeigen [7], [8], [9] und [10], als gekoppeltes System mit der thermischen Einwirkung zu betrachten. Außerdem ist die Abbrandrate von verschiedenen Materialeigenschaften wie z. B. Dichte, Feuchtegehalt, Holzart abhängig. Einen Einfluss auf die Abbrandrate besitzen ebenso der Profilmfaktor sowie eine ein- oder mehrdimensionale Brandbeanspruchung.

Normative Abbrandraten für die im Bauwesen gängigen Holzarten unter thermischer Beanspruchung durch die ETK sind in DIN EN 1995-1-2 [11] enthalten. Tabelle 1 stellt die normativen Abbrandraten aus [11] dar. Gekennzeichnet von einer besonders schnellen Aufheizrate, in Verbindung mit einem kontinuierlichen Temperaturanstieg der ETK, können die tabellierten Abbrandraten über die gesamte Beanspruchungsdauer als nahezu konstant angesetzt werden.

Infolge der Abhängigkeit der Abbrandrate gegenüber der thermischen Einwirkung sind die in Tabelle 1 aufgeführten Abbrandraten für die veränderlichen Temperaturverläufe von Naturbränden mit unterschiedlichen Aufheiz- und Abkühlraten nur bedingt anwendbar. Die Abbildung eines realen Brandverlaufes durch ein Naturbrandszenario beinhaltet neben einer Brandentwicklungsphase, bei der die Aufheizraten deutlich geringer gegenüber der ETK ausfallen können, eine Vollbrandphase (stationäre Brandphase) auch eine Abkühlphase. Sinkt die Massenverlustrate der ungeschützten Holzflächen innerhalb der Abkühlphase aufgrund der thermischen Einwirkung aus Temperatur oder Wärmestrom unter unterhalb $3,5\text{ g}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ [12] kann ein Selbstverlöschen der brennenden Holzflächen eintreten. Aus systematischen Untersuchungen [12] konnte festgestellt werden, dass der Grenzwert der Massenverlustrate von geometrischen Größen (Menge und Anordnung der ungeschützten Holzflächen und Ventilationsfaktor) und materialspezifischen Größen (thermische Eigenschaften der Umfassungsbauteile und Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung) abhängt. Somit stellt sich bei einer Naturbrandbeanspruchung eine nichtlineare Abbrandrate ein.

Tabelle 1: Bemessungswerte der Abbrandraten β_0 und β_n für Bauholz, Furnierschichtholz, Holzbekleidungen und Holzwerkstoffe [11]

Material	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Nadelholz und Buche		
Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Vollholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Laubholz		
Vollholz oder Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Vollholz oder Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) Furnierschichtholz		
mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Platten		
Holzbekleidungen	0,9 ^a	–
Sperrholz	1,0 ^a	–
Holzwerkstoffplatten außer Sperrholz	0,9 ^a	–
a Die Werte gelten für eine charakteristische Rohdichte von 450 kg/m^3 und eine Werkstoffdicke von 20 mm, für andere Werkstoffdicken und Rohdichten, siehe 3.4.2 (9)		

Ist die thermische Einwirkung aufgrund des Abkühlens der einwirkenden Temperaturbeanspruchung oder zunehmender Wärmeverluste infolge der endothermen Reaktionen (Dehydratation und erste thermische Zersetzungen) zu gering für die selbstständige Aufrechterhaltung des Zersetzungsprozesses, kann das Fortschreiten der Pyrolysefront zum Erliegen kommen. In diesem Fall kann ein Selbstverlösch der brennenden Holzbauteile eintreten. Hierbei erfolgt zunächst ein Verlösch des sichtbaren Flammenbrandes und der Übergang in einen Glimmbrand innerhalb der Pyrolysefront stellt sich ein. Bei zunehmenden Wärmeverlusten in der Pyrolysefront findet abschließend ein Verlösch des Glimmbrandes statt, wodurch die thermische Zersetzung des Ausgangsmaterials beendet wird.

3. Naturbrandmodelle

Soll im Zuge der Betrachtung eines realen Brandes bzw. eines natürlichen Brandverlaufes in einem Raum eine leistungsorientierte und realitätsnahe Ermittlung der thermischen Einwirkung erfolgen, können vereinfachte und allgemeine Brandmodelle angewendet werden. Für diese Brandmodelle können individuelle Annahmen hinsichtlich einer Vielzahl an möglichen bzw. erforderlichen Eingangsparameter erfolgen.

Bei den vereinfachten Brandmodellen handelt es sich um Näherungsverfahren, mit denen in einer einfachen Handrechnung bzw. Tabellenkalkulation der Temperaturzeitverlauf eines natürlichen Brandes in Abhängigkeit der wesentlichen physikalischen Eingangsgrößen wie Brandlastdichte und Ventilationsbedingungen berechnet werden kann [3]. Beispielhaft ist hier das in DIN EN 1991-1-2/NA [13] enthaltene vereinfachte Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände zu nennen.

Eine Differenzierung der vereinfachten Brandmodelle ist hinsichtlich der Anwendungsgebiete in Preflashover-Modelle, Postflashover-Modelle und Flashover-Modelle möglich. Die Preflashover-Modelle beschreiben den Brandverlauf bevor ein Flashover bzw. ein Vollbrand eingetreten ist. Die Postflashover-Modelle beschreiben den Brandverlauf auch nach dem Eintritt des Flashovers inkl. der anschließenden Vollbrandphase. Ein Flashover-Modell ermittelt in Abhängigkeit der Raumgeometrie und Ventilationsverhältnisse die benötigte Wärmeenergie, die zum Eintritt eines Flashovers führt. In diesen Modellen sind häufig empirische Ansätze enthalten, die aufgrund von Experimenten bezüglich einer spezifischen Fragestellung gewonnen wurden. Durch geeignete Experimente lassen sich die wesentlichen Einflussparameter und ihr physikalischer Zusammenhang ermitteln und in Form vereinfachter Gleichungen darstellen.

Allgemeine Brandmodelle, wie Zonen- oder CFD-Modelle (Feldmodelle), berechnen die thermische Einwirkung rechnergestützt. Bei den Zonenmodellen erfolgt eine Wärme- und Massenbilanzierung für Zonen mit annähernd homogenen Verhältnissen, wie einer oben liegenden Heißgas- und einer unten liegenden Kaltgasschicht. Die Einmischung von Luft in die Flamme und in die aufsteigenden Flammengase (Plume) wird zusätzlich modelliert. Dies geschieht mithilfe von Plume-Modellen, die den Transport von Rauchgasen vom Brandherd in die Rauchgasschicht beschreiben. Bei den CFD-Modellen wird der Berechnungsraum in viele hinreichend kleine Kontrollvolumina (Zellen) diskretisiert, für die die Erhaltungsgleichungen von Masse, Energie und Impuls numerisch gelöst werden und die zeitliche und örtliche Variation elementarer Größen wie Druck, Dichte der Gase, Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen berechnet werden [3]. Bei den CFD-Modellen wird der Einfluss empirischer, durch Anpassung an experimentellen Daten festzulegender Modellparameter möglichst klein gehalten [3]. Ein im Brandschutz-ingenieurwesen weit verbreitetes CFD-Modell ist der Fire Dynamics Simulator (FDS) [14].

Die Auswahl des Brandmodells hängt maßgeblich von der Fragestellung ab, wie z. B. die Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen oder die Bestimmung von Temperaturverläufen. Entsprechend der Aufgabenstellung sind beispielsweise das gewählte Brandmodell, die zugrundeliegenden Anwendungsgrenzen oder die Ergebnisgüte zu beachten. Eine allgemeine Gegenüberstellung von prinzipiellen Eigenschaften in Zonen- und CFD-Modellen zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Prinzipielle Eigenschaften von Zonen- und CFD-Modellen unter dem Gesichtspunkt des Brandschutz-ingenieurwesens [15]

Eigenschaft	Zonenmodell	CFD-Modelle
Geometrieerfassung	angenähert	angenähert bis exakt
Lüftungserfassung	angenähert	angenähert bis exakt
Wärmefreisetzung	angenähert	angenähert
Modellaufwand	gering	hoch
Aussagen	global , bzw. Mittelwerte	lokal
Validierung	aufwendig	aufwendig
Rechenaufwand	gering bis mittel	hoch

Grundlage für Naturbrandmodelle sollte ein reales Bemessungsbrandszenario mit dem zugehörigen Bemessungsbrand sein. Der Bemessungsbrand beschreibt den durch das Bemessungsbrandszenario hervorgerufenen möglichen Brandverlauf quantitativ in Form von zeitabhängigen Brandparametern und ist Grundlage eines risikogerechten Auslegungsverfahrens. Der Verlauf des Bemessungsbrandes ist von den wesentlichen Brandparametern, wie z. B. Brandlast, anlagentechnischen Maßnahmen oder Ventilation, abhängig.

4. Brandversuche in Holzbauten

Zur Analyse der Branddynamik bei ungeschützten und anfänglich geschützten Holzbauteilen wurden in den letzten 10 Jahren mehrere Naturbrandversuche an Räumen in Holzbauweise (z. B. [16], [17], [18], [19] und [20]) durchgeführt. Wesentlich waren hierbei die Untersuchungen zum Einfluss struktureller Brandlasten auf den Brandverlauf, wie die drei Brandphasen (Brandentwicklungsphase, stationäre Brandphase und Abkühlphase), zum Flashoverzeitpunkt, zum Brandübersprung auf die strukturelle Brandlast und zum Nachbrandverhalten inklusive möglichem Selbstverlöschen. Auch Fragen zum allgemeinen Brandverhalten von Massivholzbauteilen als strukturelle Brandlasten sowie zur Leistungsfähigkeit einer Brandschutzbekleidung unter Naturbrandbeanspruchung wurden analysiert. Die Mehrheit der Versuchsserien enthielten auch Referenzversuche mit ausschließlich

mobiler Brandlast zur Verdeutlichung des Einflusses der strukturellen Brandlasten. Nachfolgend folgt eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse von ausgewählten Serien an realmaßstäblichen Raumbrandversuchen in Holzbauweise.

In Zelinka et al. (2018) [16] erfolgte die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Mengen und der Anordnung von ungeschützten Holzflächen auf den Brandverlauf. Weitere Untersuchungspunkte stellten die Brandweiterleitung in angrenzende Räume sowie die Leistungsfähigkeit von anlagentechnischen Maßnahmen dar. Die Brandraumgrundfläche von 83,54 m², die Ventilationsöffnung von 17,86 m² und die mobile Brandlastdichte von 550 MJ/m² wurden über die Versuchsserie konstant gehalten.

Es wurde festgestellt, dass mit zusätzlicher struktureller Brandlast die maximale Wärmefreisetzungsrate zunimmt. Der Einfluss auf die Temperaturen im Brandraum bleibt bei der konstanten Ventilationsöffnung marginal, wodurch deutlich wird, dass vermehrt eine Verbrennung vor der Fassade stattfindet. Außerdem zeigten die anlagentechnischen Maßnahmen (Sprinkleranlage) eine sehr gute Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Ansprechzeit und Brandunterdrückung. Die Versuche ohne anlagentechnische Maßnahmen zeigten im Nachbrandverhalten ein Selbstverlöschten der ungeschützten Holzbauteile nach dem Ausbrand der mobilen Brandlast auf.

Su et al. (2018) [17] analysierten den Einfluss von unterschiedlicher Menge an ungeschützten Holzflächen in Kombination mit verschiedenen Ventilationsbedingungen auf den Brandverlauf. Als konstante Größen wurden die Brandraumgrundfläche zu 41,86 m² und eine mobile Brandlastdichte von 550 MJ/m² festgelegt. Die Ventilationsöffnung betrug 3,6 m² bzw. 7,2 m².

Die Versuchsergebnisse bestätigten die Erkenntnisse zum Brandverlauf aus [16]. Zudem zeigten die Versuchsdaten einen signifikanten Einfluss der Ventilationsbedingungen auf den Brandverlauf, welches sich in der stationären Brandphase und der Abkühlphase deutlich widerspiegelt. Eine kleinere Ventilationsöffnung führt zu einer Zunahme der Verbrennung von der Fassade, aufgrund des ventilationsgesteuerten Brandregimes.

Robert et al. (2020) [18] befassten sich mit der experimentellen Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen. Neben den Versuchen mit struktureller Brandlast wurden auch Versuche mit ausschließlich mobiler Brandlast zur Bewertung durchgeführt. Die Konzeption der Versuche enthielt eine konstante Brandraumgrundfläche von 24,0 m², eine konstante Menge an struktureller Brandlast (Massivholzdecke mit 24,0 m² bzw. 0 m²) und einer konstanten mobilen Brandlastdichte von 891 MJ/m².

Die Versuchsergebnisse bestätigen die in [17] festgestellten Einflüsse der Ventilationsbedingungen auf den Brandverlauf. Infolge der deutlich größeren mobilen Brandlast konnte eine Zunahme der Verbrennung vor der Fassade mit der Verringerung der Ventilation festgestellt werden. Ebenfalls führten die geringeren Ventilationsöffnungen zu einer etwas längeren Brandentwicklung und einer länger anhaltenden Brandbeanspruchung, welche mit einer höheren Abbrandtiefe korreliert.

In Brandon et al. (2021) [19] erfolgte eine Untersuchung zum Nachbrandverhalten bei strukturellen Brandlasten. Die Versuche wiesen eine sehr hohe Menge an strukturellen Brandlasten auf, welche das Nachbrandverhalten maßgeblich beeinflussen. Der Versuchsserie lagen eine konstante Brandraumgrundfläche von 53,80 m², zwei verschiedene Ventilationsöffnungen (8,0 m² und 31,2 m²) und eine gleichbleibende mobile Brandlastdichte von 560 MJ/m² zugrunde.

Die grundlegende Auswirkung von der Menge der strukturellen Brandlasten und den Ventilationsbedingungen auf den Brandverlauf stehen im Einklang mit den Erkenntnissen aus [16], [17] und [18]. Die Versuchsdaten zeigen zudem, dass bei einer hohen Menge an strukturellen Brandlasten ein Selbstverlöschten eintreten kann, sofern die mobile Brandlast aufgezehrt ist.

In [20] wird in einer Versuchsserie der Einfluss von unterschiedlichen Mengen an strukturellen Brandlasten und die Auswirkung eines Versagens von Brandschutz-bekleidungen auf den Brandverlauf gezeigt. Es wurden zwei unterschiedliche Brandraumgrundflächen von 20,25 m² und 40,50 m² betrachtet. Die Ventilationsbedingungen sowie die mobile Brandlastdichte von 1085 MJ/m² wurden für die Versuchsserie konstant gehalten.

Der Einfluss des Beitrages von strukturellen Brandlasten ist in der Versuchsserie in den berechneten Wärmefreisetzungsraten und in den Temperaturmessungen im Brandraum und vor der Fassade sichtbar. Bezogen auf die Brandraumtemperaturen zeigt sich der Einfluss 1) durch einen geringfügig früheren Eintritt des Flashovers und 2) in Form eines intensiveren Nachbrandverhaltens während der Abkühlphase, welches maßgeblich durch ein Versagen der Brandschutzbekleidung und dem Beitrag der anfänglich geschützten Holzbauteile am Brandgeschehen beeinflusst wurde.

5. Erweiterung vereinfachter Naturbrandmodelle zur Berücksichtigung struktureller Brandlasten

Aus den Erkenntnissen der Versuche an Räumen in Holzbauweise mit ungeschützten Holzoberflächen wurde in [21] ein Ansatz für eine Erweiterung des vereinfachten Naturbrandmodells nach DIN EN 1991-1-2/NA [13] mit Berücksichtigung des Einflusses von ungeschützten strukturellen Brandlasten vorgestellt. Die zusätzliche Wärmefreisetzung aus den strukturellen Brandlasten kann im vereinfachten Naturbrandmodell in den Gleichungen für die Brandlastdichte (Gl. 1) und der maximalen Wärmefreisetzungsrate (Gl. 2) für den brandlastgesteuerten Brandfall berücksichtigt werden. Die Erweiterung dieser Gleichungen, zur Berücksichtigung der strukturellen Brandlast, erfolgt jeweils über den zweiten Term in Gl. 1 und Gl. 2. Die Brandlastdichte ergibt sich aus der Summe der mobilen und strukturellen Brandlasten ($q_{f,tot}$) entsprechend Gl. 1 zu:

$$q_{f,tot} = q_{f,k} \cdot \chi + A_{tim} \cdot d_{char,t} \cdot \chi \cdot H_{c,tim} \cdot \rho_{tim} / A_f \quad \text{Gl. 1}$$

mit:

$q_{f,k}$	Charakteristische Wert der mobilen Brandlastdichte nach DIN EN 1991-1-2/NA [14] in MJ/m ²
χ	Verbrennungseffektivität
A_{tim}	Oberfläche der ungeschützten Holzflächen in m ²
$d_{char,t}$	Abbrandtiefe der ungeschützten Holzflächen in m
$H_{c,tim}$	Netto-Verbrennungswärme von Holz in MJ/kg
ρ_{tim}	Dichte von Holz in kg/m ³
A_f	Brandraumgrundfläche in m ²

Die maximale Wärmefreisetzungsrate des brandlastgesteuerten Brandes wird mittels Gl. 2 berechnet.

$$Q_{max,f,k} = RHR_f \cdot A_f + RHR_{tim} \cdot A_{tim} \quad \text{mit} \quad RHR_{tim} = \dot{r}_{tim}'' \cdot \chi \cdot H_{c,tim} \quad \text{Gl. 2}$$

mit:

RHR_f	Charakteristische Wert flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrates nach DIN EN 1991-1-2/NA [14] in MW/m ²
A_f	Brandraumgrundfläche in m ²
RHR_{tim}	Wert der flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrates der ungeschützten Holzflächen in MW/m ²
A_{tim}	Oberfläche der ungeschützten Holzflächen in m ²
\dot{r}_{tim}''	Flächenbezogenen Massenverlustrate von Holz in kg/(s m ²)
χ	Verbrennungseffektivität
$H_{c,tim}$	Netto-Verbrennungswärme von Holz in MJ/kg

Die flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate der ungeschützten Holzflächen RHR_{tim} wurde aus Messdaten von Cone-Calorimeter Untersuchungen nach [23] bestimmt. Für die vereinfachte Betrachtung wurde als Näherung ein Mittelwert der gemessenen Maxima der flächenbezogenen Massenverlustraten von $\dot{r}_{tim}'' = 0,0136 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ herangezogen.

Die in Gl. 1 und Gl. 2 angegebene Netto-Verbrennungswärme von Holz ($H_{c,tim}$) wurde mit 17,28 MJ/kg und die Verbrennungseffektivität mit 0,8 angesetzt. Die in Gl. 1 enthaltene Größe $d_{char,t}$ beschreibt die Abbrandtiefe der ungeschützten Holzflächen, wodurch eine zusätzliche Wärmefreisetzung entsteht und länger anhaltende und ggf. höhere Brandraumtemperaturen resultieren. Zur Berechnung der Abbrandtiefe unter einer Naturbrandbeanspruchung wurde ein empirisch erarbeiteter Äquivalenzansatz [8], [22] (siehe Gl. 3) gewählt. Der Äquivalenzansatz ermittelt die Abbrandtiefe unter Berücksichtigung einer Regressionsgleichung, welche durch systematische Auswertung einer Vielzahl an Versuchsdaten abgeleitet wurde, die die kumulierte thermische Einwirkung kT beinhaltet.

$$d_{char,t} = \left(\frac{kT}{1,35 \cdot 10^5} \right)^{1/1,6} \quad \text{mit} \quad kT = \int_0^t (T + 273,15)^2 dt \quad \text{Gl. 3}$$

Die Addition der mobilen Brandlastdichte mit der strukturellen Brandlastdichte aus dem Abbrand hat zur Folge, dass das erweiterte Naturbrandmodell in einen iterativen Prozess zur Ermittlung der Naturbrandkurve übergeht. Dieses ergibt sich infolge des verwendeten Ansatzes zur Ermittlung der Abbrandtiefe, welche eine Kopplung zur berechneten Brandraumtemperatur aufweist.

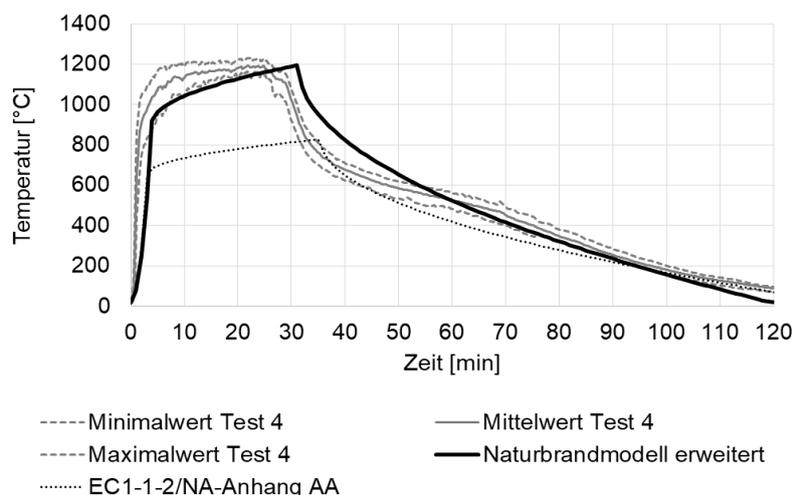


Abbildung 4: Vergleich des berechneten Temperaturzeitverlaufs des erweiterten Naturbrandmodells zu gemessenen Temperaturzeitkurven der «Epernon Fire Tests» nach [18]

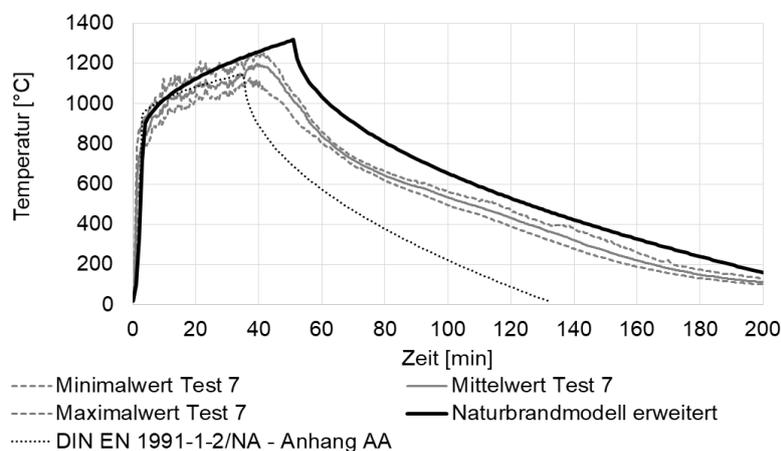


Abbildung 5: Vergleich des berechneten Temperaturzeitverlaufs des erweiterten Naturbrandmodells zu gemessenen Temperaturzeitkurven der «Epernon Fire Tests» nach [18]

Eine Gegenüberstellung von berechneten Temperaturzeitverläufen mit dem erweiterten Naturbrandmodell und Messdaten von zwei ausgewählten Versuchen aus [18] weist eine hinreichende Übereinstimmung auf, wie Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen. Zusätzlich ist der berechnete Temperaturzeitverlauf mit dem vereinfachten Naturbrandmodell nach DIN EN 1991-1-2/NA [13] als gepunktete Linie dargestellt. Der Einfluss aus der Erweiterung um die strukturelle Brandlast ungeschützter Holzflächen ist deutlich erkennbar.

Lediglich die Temperaturen für Test 4 in Abbildung 4 zu Beginn des Vollbrandes 5. – 15. Minute sowie zum Ende der Abkühlphase (50. – 120. Minute) werden leicht unter- bzw. überschätzt. In Abbildung 5 werden zu Beginn der Abkühlphase werden die Messergebnisse leicht überschätzt.

Die mit dem erweiterten Naturbrandmodell berechneten Temperaturzeitverläufe liegen weitestgehend auf der sicheren Seite.

Die aktuelle Formulierung des erweiterten Naturbrandmodells weist noch Schwächen bei der Prognose der Raumtemperaturen in der Abkühlphase auf, da z. B. das Versagen der Brandschutzbekleidung von anfänglich geschützten Holzbauteilen nicht abgebildet werden kann. Des Weiteren führt die zusätzliche Brandlast aus den strukturellen Brandlasten teilweise zu einer Überschreitung der Modell-Anwendungsgrenze der Brandlastdichte. Dadurch erfolgt ein Übersteuern des erweiterten Naturbrandmodells und die berechneten Naturbrandkurven liegen zunehmend auf der sicheren Seite.

6. Ansatz zur Berücksichtigung struktureller Brandlasten für die Modellierung mit allgemeinen Naturbrandmodellen

Bei der Anwendung von allgemeinen Naturbrandmodellen stellt die hinreichend genaue Modellierung der Auswirkung von strukturellen Brandlasten auf den Brandverlauf zurzeit noch eine besondere Herausforderung dar. Dieses beruht zum einen auf das nichtlineare Abbrandverhalten von Holz unter Naturbrandbeanspruchung und zum anderen auf dem im Nachbrandverhalten möglichen Selbstverlöschen, welches durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird.

Nach [14] sind drei grundlegende Varianten zur Modellierung der Wärmefreisetzung von ungeschützten Holzflächen bzw. strukturellen Brandlasten in dem CFD-Programm Fire Dynamics Simulator (FDS) möglich.

1) Abbildung über eine zeitlich vordefinierte Wärmefreisetzungsrates

Eine Variante der Modellierung ist die Verwendung einer vordefinierten zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrates, welche ab dem Erreichen einer Zündtemperatur, welche sich auf die Oberflächentemperatur der modellierten strukturellen Brandlast bezieht, freigesetzt wird. Voraussetzung hierfür ist, dass der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrates bereits bekannt ist, was in den seltensten Fällen zutrifft, oder im Vorfeld angenommen werden muss. Aufgrund der zeitlich definierten Wärmefreisetzung lässt sich das im Nachbrandverhalten zu beobachtende Selbstverlöschen bei dieser Variante abbilden.

2) Abbildung über eine konstante Wärmefreisetzungsrates

Die Modellierung einer konstanten, flächenbezogenen Wärmefreisetzung unter Definition einer Zündtemperatur sowie einer Extinktionstemperatur stellt eine weitere Modellierungsvariante dar. Bei dieser Variante müssen der Wert der konstanten Wärmefreisetzungsrates und die beiden Temperaturgrößen bekannt bzw. abgeschätzt werden. Ab Erreichen der Zündtemperatur wird die konstante Wärmefreisetzungsrates freigesetzt. Mit dem Unterschreiten der Extinktionstemperatur wird vereinfacht ein Selbstverlöschen der strukturellen Brandlast abbildet. Beide Temperaturwerte beziehen sich auf die Oberflächentemperatur der modellierten strukturellen Brandlast.

3) Abbildung über ein eindimensionales Pyrolysemodell

Der Ansatz über ein eindimensionales Pyrolysemodell beschreibt die physikalisch korrekteste und modellierungstechnisch komplexeste Variante der Modellierung. Die Modellierung der thermischen Zersetzung kann hierbei unterschiedlich detailliert erfolgen, wie in Abbildung 6 beispielhaft dargestellt wird. Herausfordernd sind die Festlegung der erforderlichen kinetischen Reaktionsparameter und der Reaktionswärme der Pyrolyse von Holz sowie die

thermischen Materialparameter der Zersetzungskomponenten. Die Berechnung der thermischen Zersetzung in FDS findet über die Arrhenius-Gleichung statt. Für die Darstellung der Pyrolyse von Holz zur Ermittlung der Wärmefreisetzung für Bemessungszwecke empfiehlt sich aus vorgenannten Gründen Detaillierungsgrad a).

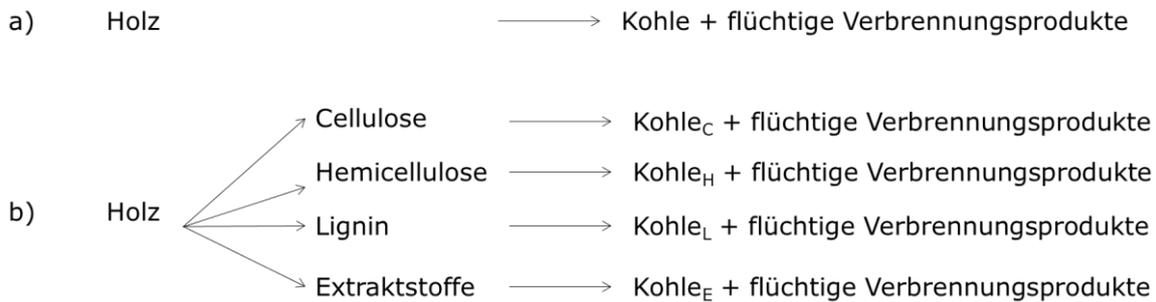


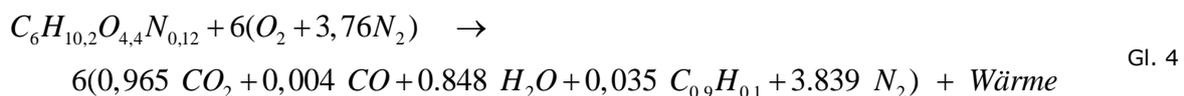
Abbildung 6: Unterschiedlicher Detaillierungsgrad bei der Modellierung der Pyrolyse von Holz

Zur Berechnung der Verbrennung innerhalb von FDS ist für die Varianten 1) und 2) eine vereinfachte Reaktionsgleichung ausreichend. Während bei dem Ansatz eines Pyrolysemodells zumeist eine komplexe stöchiometrische Reaktionsgleichung erforderlich wird, da die bei der Pyrolyse freigesetzten brennbaren Pyrolysegase die Verbrennung maßgeblich steuern.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Ansätze zur Modellierung von strukturellen Brandlasten erfolgt anhand von Simulationen zu Versuchsergebnissen aus einem mittelmaßstäblichen Room Corner Versuch (RC_V1) zur Analyse der Branddynamik [24], [25]. Für den Ansatz 1) ist aus den Versuchsergebnissen der Verlauf der flächenbezogenen Wärme-freisetzungsrates abgeleitet worden. Über die Zuordnung einer angenommenen Zündtemperatur von 300 °C wird der Beitrag der strukturellen Brandlast am Brandverlauf erst berücksichtigt, wenn diese Oberflächentemperatur erreicht ist. Analog dazu ist für den Ansatz 2) nur eine konstante flächenbezogene Wärmefreisetzungsrates mit der Zündtemperatur von 300 °C und einer Extinktionstemperatur von 500 °C verwendet worden. Bei dem Ansatz 3) eines Pyrolysemodells findet die Modellierung der thermischen Zersetzung und der gekoppelten Wärmefreisetzung von Holz vereinfacht in einer dreistufigen Zersetzungsreaktion ab:

- *Dehydration* – endothermer Vorgang,
- *Pyrolyse* – endothermer Vorgang,
- *Oxidation* – exothermer Vorgang.

Die notwendigen Eingangsparameter der Arrhenius-Gleichung präexponentieller Faktor und Aktivierungsenergie wurden über recherchierte Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse iterativ angenähert. Jede der angesetzten Zersetzungsreaktionen führen in dem Pyrolysemodell zu einer Massenreduktion, was in den Stufen *Pyrolyse* und *Oxidation* mit dem Freisetzen von brennbaren Pyrolysegasen einhergeht. Die hochkomplexe Verbrennung von Holz lässt sich vereinfachend mit der in Gl. 4 dargestellten stöchiometrischen Reaktionsgleichung beschreiben. Als Verbrennungswärme wird 17,28 MJ/kg angesetzt über die im Pyrolysemodell enthaltenen Werte für Soot-, CO-Yield und Materialfeuchte wird die Verbrennungseffektivität vereinfacht abgebildet.



Es ist jedoch anzumerken, dass mit dem Ansatz 1) der vordefinierten zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrates pro Flächeneinheit der Zeitpunkt des Beginns der Abkühlphase für die strukturelle Brandlast vor dem Simulationsdurchlauf zu definieren ist. Entsprechend eignet sich dieser Ansatz nur zur Nachrechnung von Versuchsergebnissen und weniger zur Prognose von Brandverläufen.

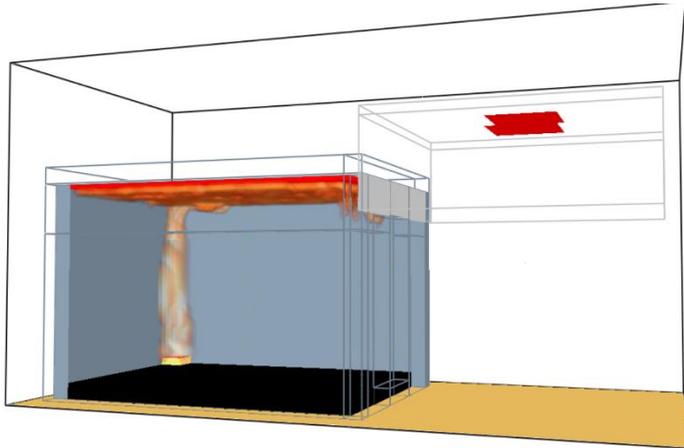


Abbildung 7: Darstellung der flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrate ($HRR_{PUA} > 200 \text{ kW}$) des Simulationsmodells vom Room Corner Test (RC_V1) aus [24] zur 15. Minute

Die Modellierungsvarianten wurden mittels Vergleichsrechnungen zu einem in [24] und [25] beschriebenen mittelmaßstäblichen Brandversuch im Room Corner Testraum analysiert. Der Versuchsaufbau beinhaltet eine Brandquelle in Form eines Gasbrenners mit den Leistungsstufen (0. – 10. Min $\rightarrow 100 \text{ kW}$; 11. – 40. Min $\rightarrow 300 \text{ kW}$). Als strukturelle Brandlast wurde der nichtbrennbare Versuchsstand an der Decke mit einer 42 mm starken ungeschützten Massivholzplatte in Fichte ausgekleidet. Im Versuch erfolgte der Brandübersprung von der Brandquelle auf die strukturelle Brandlast mit dem Erhöhen der Leistung der Brandquelle auf 300 kW. Nach dem Abschalten der Brandquelle in der 40. min erfolgte für die ungeschützte Massivholzdecke ein Selbstverlöschen. Der modellierte Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 ersichtlich, wobei zum besseren Verständnis zwei Wände nur mit den Außenlinien dargestellt sind.

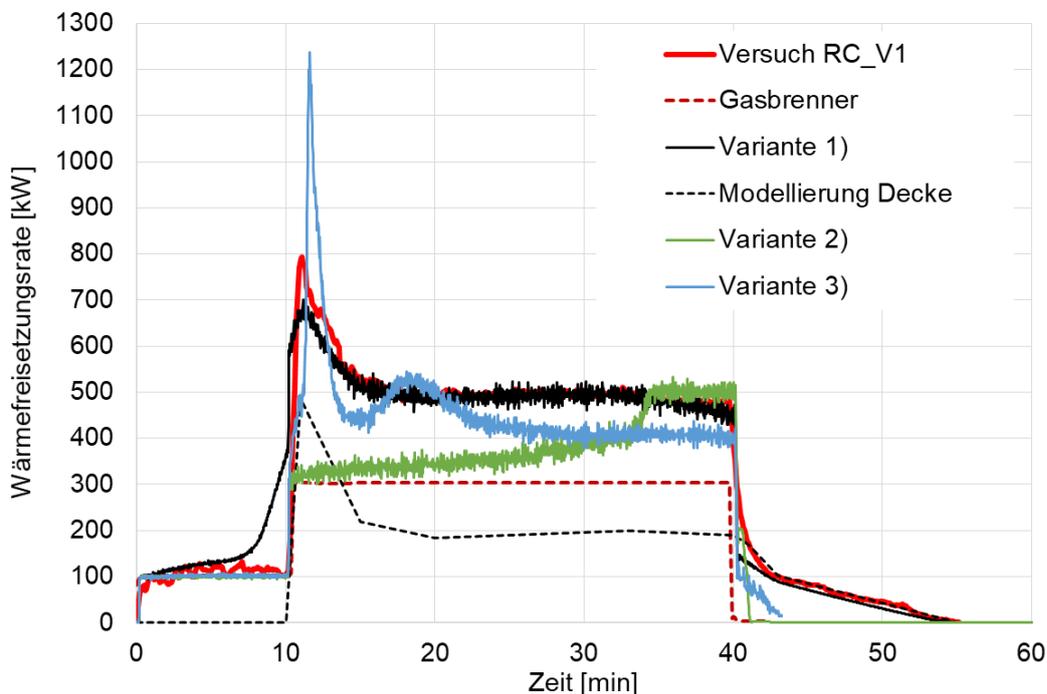


Abbildung 8: Vergleich der unterschiedlichen Varianten zur Modellierung anhand der Wärmefreisetzungsrate

In Abbildung 8 ist der Vergleich zwischen der im Versuch gemessenen Wärmefreisetzungsrate (HRR) und der in den Simulationen, aus den drei unterschiedlichen Varianten 1) bis 3) zur Modellierung, berechneten Wärmefreisetzungsrate ersichtlich. Die Kurve ‚Versuch RC_V1‘ stellt die im Versuch über die Sauerstoffverbrauchsmethode gemessene HRR dar. In gestrichelter Linie ist mit ‚Gasbrenner‘ die HRR der Brandquelle dargestellt, welche aus der Durchflussmessung berechnet wurde. Die Variante 1) der zeitlich vordefinierten Wärmefreisetzungsrate, bei der die gestrichelte Linie ‚Modellierung Decke‘ die vordefinierte

HRR abbildet, zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsdaten auf. Lediglich im Zeitbereich 0. – 10. Minute zeigt sich im Simulationsmodell eine bereichsweise verfrühte lokale Entzündung der Decke. In der Variante 2), hier wurde die HRR über ein konstante flächenbezogene HRR von 23,2 kW/m² festgelegt (abgeleitet aus dem Versuch RC_V1), erfolgt die Entzündung der Decke deutlich verzögert bzw. bleibt lokal begrenzt. Erst ab der 35. Minute beteiligte sich die gesamte Decke am Brandgeschehen. Gegenüber der Variante 1) fehlt der Peak bei dem Brandübersprung von der Brandquelle auf die Decke. Entsprechend erfolgt die Brandausbreitung an der Decke in Variante 2) nur sehr träge. Die Intensität der Brandquelle ist als ein wesentlicher Einflussparameter auf die Brandausbreitung der Variante 2) zu benennen. Einen etwas dynamischeren Kurvenverlauf zeigt die HRR der Variante 3). Zunächst zeigt sich nach Entzündung der Decke im Modell ein starker Peak mit einem anschließenden Abfall der HRR. Im Bereich ab der 25. Minute bis zum Abstellen der Brandquelle in der 40. Minute wird die im Versuch gemessene HRR von der Variante 3) unterschätzt.

Für die untersuchten Varianten konnte der Zeitpunkt der Entzündung nur in den Varianten 1) und 3) hinreichend abgebildet werden. Bezogen auf das Selbstverlöschen nach dem Abschalten der Brandquelle zeigten alle Varianten eine passable Abbildung.

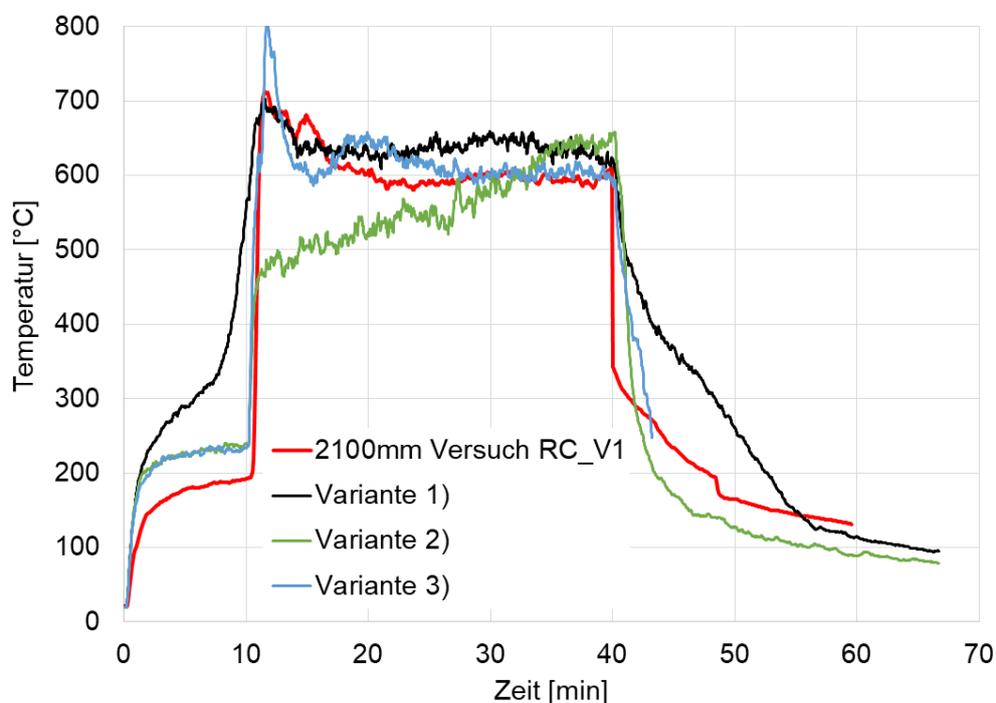


Abbildung 9: Vergleich der unterschiedlichen Varianten zur Modellierung anhand der Brandraumtemperatur mittig des Raumes in 2100 mm Höhe

Die Gegenüberstellung der Temperaturen in Raummitte in 2100 mm Höhe zeigt Abbildung 9. Analog zu den Verläufen der HRR ist die Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Brandraumtemperaturen zu bewerten. Bei der Variante 3) zeigt sich trotz der leichten Abweichung der Wärmefreisetzungsrates eine gute Abbildung der Temperaturen im Brandraum. Für alle Varianten lässt sich jedoch eine geringe Abweichung im Bereich bis zum Brandübersprung auf die Decke (0. – 10. Min) und nach Abschalten der Brandquelle (ab 40. Min) feststellen.

7. Bemessung nach ETK und mit Naturbrandmodellen im Vergleich

Die vorliegenden Erkenntnisse aus Raumbrandversuchen an Holzkonstruktionen zeigen, dass der Brandverlauf bei gleicher mobiler Brandlast wesentlich von der Menge der strukturellen Brandlasten sowie dem Ventilationsverhältnis abhängt. Die Menge der strukturellen Brandlast wird weitgehend vom Anteil der ungeschützten Holzoberfläche an der Gesamtfläche bestimmt.

Bei der Bemessung mit Naturbrandmodellen ist der Temperaturzeitverlauf abhängig von der Brandlast, den Ventilationsbedingungen, der Brandraumgeometrie und den thermischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile. Die mobilen Brandlasten werden gemäß [13] entsprechend der 90%-Quantile für die jeweilige Nutzung festgelegt. Für Wohnnutzung entspricht das einer Brandlastdichte von 1.085 MJ/m^2 an mobilen Brandlasten. Es ergeben sich für Massivbauten typischer Weise Brandverläufe, bei denen die Temperaturen in der Vollbrandphase die ETK übersteigen können, nach dem Aufzehren der Brandlasten diese jedoch abfallen, wobei die ETK stetig ansteigt. Abbildung 10 zeigt den Temperaturzeitverlauf von Brandversuchen in einem Massivbau für 3 unterschiedliche Ventilationsverhältnisse, die im Zuge der Epernon Fire Tests durchgeführt wurden [18]. Die maximalen Temperaturen liegen teilweise deutlich oberhalb 1000°C . Die Abkühlphase setzt je nach Ventilationsverhältnis zwischen der 30. und 55. Minute ein. Nach 90 Minuten liegt die Temperatur deutlich unterhalb der ETK (standard test).

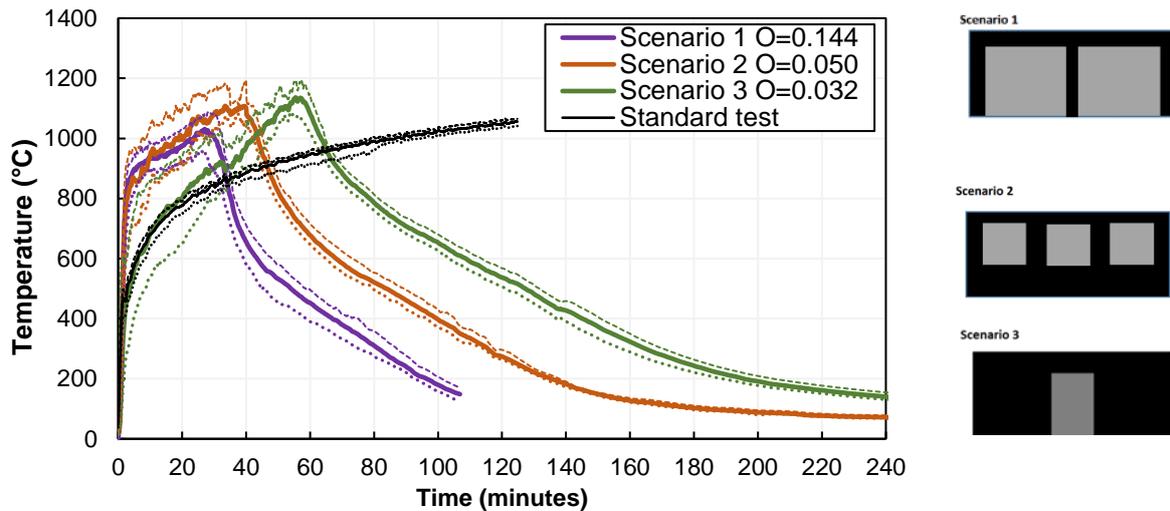


Abbildung 10: Temperaturzeitverläufe von Raumbränden in Massivbauten für unterschiedliche Ventilationsverhältnisse O im Vergleich zur ETK (standard test) [18]

In Abbildung 11 werden die Temperaturzeitverläufe in den gleichen Räumen mit gleicher mobiler Brandlast gezeigt, bei denen jedoch anstatt einer Stahlbetondecke eine Deckenplatte aus Brettsperrholz (CLT) verwendet wurde. Die Temperaturen liegen nur geringfügig höher als in den Versuchen mit den Stahlbetondecken, die Abkühlphase verläuft jedoch etwas langsamer. Bei den Szenarien 1 und 2 mit der größeren Ventilation liegen die Temperaturen nach 90 Minuten deutlich unterhalb der ETK.

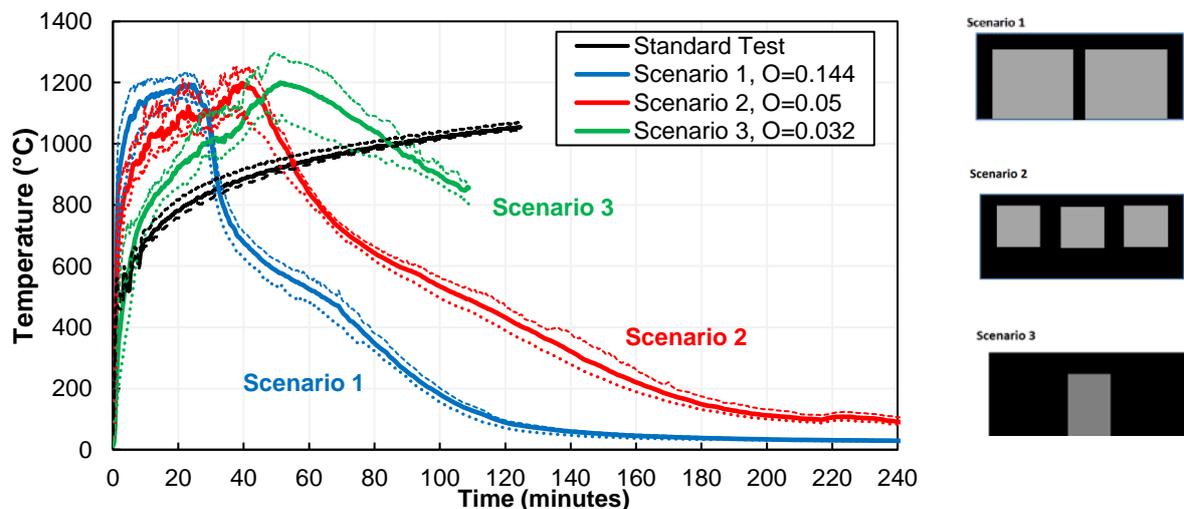


Abbildung 11: Temperaturzeitverläufe von Raumbränden mit einer Decke aus Brettsperrholz (CLT) und massiven Wänden für unterschiedliche Ventilationsverhältnisse O im Vergleich zur ETK (standard test) [18]

Ausgehend von einem geforderten Feuerwiderstand von 90 Minuten, wie er für tragende und raumabschließende Bauteile der Gebäudeklasse 5 in Deutschland gefordert wird, können sich bei der Anwendung von Naturbrandmodellen, unter der Voraussetzung einer ausreichend großen Ventilation (Wärmeabzug) sowie der Begrenzung des Anteils der brennbaren Oberflächen, Erleichterungen für den Holzbau ergeben.

8. Zusammenfassung und Fazit

Ausgangslage dieses Beitrages ist der Ansatz einer leistungsorientierten Bemessung für Gebäude in Holzbauweise mit teilweise ungeschützten Holzbauteilen unter Anwendung von Naturbrandmodellen. Die als strukturelle Brandlasten bezeichneten ungeschützten Holzbauteile beteiligen sich am Brandgeschehen und sind somit in der Ermittlung einer Brandbeanspruchung mit Naturbrandmodellen zu berücksichtigen.

Für die Berücksichtigung von strukturellen Brandlasten in vereinfachten oder allgemeinen Brandmodellen folgt eingangs eine kurze Darstellung des Brandverhaltens von Holz sowie eine kurze Beschreibung der Brandmodelle.

Aus den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen zeigt sich, dass sich durch die strukturelle Brandlast eine kürzere Brandentwicklungsdauer bis zum Eintritt des Flashovers und eine Steigerung der Wärmefreisetzungsrate ergeben. Zudem wird durch die zusätzliche strukturelle Brandlast ein ventilationsgesteuertes Brandregime zu einem früheren Zeitpunkt im Brandverlauf erreicht, welches eine geringere maximale Wärmefreisetzungsrate aber eine längere Branddauer zur Folge hat. Außerdem erfolgt durch eine geringere Ventilationsöffnung bzw. ein ventilationsgesteuertes Brandregime die Zunahme der Flammen vor der aufgehenden Fassade. In einzelnen Versuchen konnte ein Selbstverlöschen immer beim Verlöschen der mobilen Brandlast (Stützfeuer) beobachtet werden, sofern die Menge an ungeschützte Holzoberfläche begrenzt wurde.

Auf Grundlage der Messdaten von Brandversuchen an Räumen in Holzbauweise wird eine Erweiterung des vereinfachten Naturbrandmodells nach DIN EN 1991-1-2/NA bezüglich struktureller Brandlasten vorgestellt. Ein Vergleich mit Brandversuchen zeigt bereits eine hinreichende Übereinstimmung zu Versuchsergebnissen mit ungeschützten Holzdecken.

Zur Berücksichtigung von strukturellen Brandlasten in dem Feldmodell FDS wurden drei mögliche Modellierungsvarianten vorgestellt. Die Eignung der Ansätze zur Abbildung der strukturellen Brandlast wurde anhand von Simulationen eines mittelmaßstäblichen Room-Corner Versuches dargestellt. Der Vergleich zeigt die grundlegende Eignung der Varianten zur Abbildung struktureller Brandlasten. Die Modellierungsvarianten 2) und 3) ermöglichen durch die Formulierung eine Prognose von Raumbrandtemperaturen. Die Variante 2) zeigte zwar eine trägere Brandausbreitung der strukturellen Brandlast auf, welche bei Verwendung einer Brandquelle mit einer größeren Brandleistung eine vermutlich bessere Annäherung aufweist. In Bezug auf die Güte der Variante zur Abbildung der strukturellen Brandlast weisen die Varianten 1) und 3) eine hinreichende Übereinstimmung auf. Anzumerken ist dazu, dass durch die Variante 1) nur eine Nachrechnung von Bränden zielführend ist, da die zeitlich vordefinierte Wärmefreisetzungsrate in den meisten Fällen eine Unbekannte darstellt.

Die vorliegenden Erkenntnisse aus Raumbrandversuchen an Holzkonstruktionen zeigen, dass der Brandverlauf bei gleicher mobiler Brandlast wesentlich von der Menge der strukturellen Brandlasten sowie dem Ventilationsverhältnis abhängt. Die Menge der strukturellen Brandlast wird weitgehend vom Anteil der ungeschützten Holzoberfläche an der Gesamtfläche bestimmt. Ausgehend von einem geforderten Feuerwiderstand von 90 Minuten wie er für tragende und raumabschließende Bauteile der Gebäudeklasse 5 in Deutschland gefordert wird, können sich bei der Anwendung von Naturbrandmodellen unter der Voraussetzung einer ausreichend großen Ventilation (Wärmeabzug) sowie der Begrenzung des Anteils der brennbaren Oberflächen Erleichterungen für den Holzbau ergeben.

9. Literatur

- [1] DIN EN 13501-2:2016-12. Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13501-2:2016.
- [2] DIN EN 1991-1-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009.
- [3] Zehfuß, J. (Hrsg.) (2020): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht TB 04-01 der vfdb. Technischer Bericht.
- [4] Zehfuß, J.; Paliga, K. (2017): Anwendung von Naturbrandmodellen für die brandschutztechnische Bemessung. Bautechnik 94. <https://doi.org/10.1002/bate.201700030>.
- [5] Zehfuß, J.: Naturbrandverfahren für die Bauteilbemessung – Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen. In: Jahresfachtagung 2013 der vfdb, Weimar, 27. bis 29. Mai 2013, Tagungsband. Altenberge: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), 2013.
- [6] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL). Fassung Oktober 2020.
- [7] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.; Scheer, C. (1994): Holzbau Brandschutz Handbuch. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, München.
- [8] Werther, N. (2016): Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren. Dissertation am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München.
- [9] Schmid, J; et al. (2016): Timber under Real Fire Conditions – the Influence of Oxygen Content and Gas Velocity on the Charring Behavior, 9th International Conference on Structures in Fire (SiF), Princeton, USA.
- [10] Engel, T.; Brunkhorst, S.; Steeger, F.; Winter, S.; Zehfuß, J.; Kampmeier, B.; Werther, N. (2020): TIMpuls Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau – Abbrandraten, Schutzzeiten von Bekleidungen und Nachbrandverhalten von Holz. Bautechnik 97. <https://doi.org/10.1002/bate.202000043>.
- [11] DIN EN 1995-1-2:2010-12: Eurocode 5, Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2009.
- [12] Bartlett, A. I. (2018): Auto-Extinction of Engineered Timber. Dissertation. The University of Edinburgh.
- [13] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [14] McGrattan, K., et al. (2020): Fire Dynamics Simulator - User's Guide (Sixth Edition). NIST Special Publication 1019. Revision: FDS6.7.4-0-gbfaa110. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>.
- [15] Schneider, U (2009). Ingenieurmethoden im Brandschutz. Werner Verlag, 2. Auflage. ISBN 978-3-8041-5238-0.
- [16] Zelinka, S. et al. (2018): Compartment Fire Testing of a Two-Story Mass Timber Building – General Technical USDA Report: FPL-GTR-247.
- [17] Su, J. et al. (2018): Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests. Final NFPA Report: FPRF-2018-01.
- [18] Robert, F.; Zehfuß, J. et al. (2020): Épernon Fire Tests Programme - Synthesis Report n° EFTP-2020/01. <http://www.epernon-fire-tests.eu>.
- [19] Brandon, D. et al. (2021): Fire Safe implementation of visible mass timber in tall buildings - compartment fire testing. RISE Fire Research Report 2020:94.
- [20] Brunkhorst, S.; Zehfuß, J., Engel, T.; Steeger, F.; Butscher, D.; Kurzer, C.; Werther, N. (2021): TIMpuls Großversuche an Holzbauten. In Tagungsband Braunschweiger Brandschutz-Tage 2021. ISBN 978-3-89288-226-8.
- [21] McNamee, R., Zehfuß, J.: et al. (2020): Enclosure fire dynamics with a cross-laminated timber ceiling. Fire and Materials. 2020;1 – 11. <https://doi.org/10.1002/fam.2904>
- [22] prEN 1995-1-2:2025 (E): Eurocode 5 – Design of timber structures Part 1-2: Structural fire design. Final Draft. September 2021.
- [23] ISO 5660-1:2015-03: Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen - Wärmefreisetzung- Rauchentwicklungs- und Masseverlustrate - Teil 1: Wärmefreisetzungsrates (Cone Calorimeter-Verfahren) und Rauchentwicklungsrate (dynamische Messung)
- [24] Brunkhorst, S.; Zehfuß, J. (2019) Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Brandverlauf von Raumbränden mit immobilen Brandlast. In 6th Symposium Structural Fire Engineering. Braunschweig.
- [25] Brunkhorst, S.; Zehfuß, J. (2020) Experimental and Numerical Analysis of Fire Development in Compartment Fires with Immovable Fire Load. In: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7>.

TIMpuls: Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen in Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus

Thomas Engel
Technische Universität München
München, Deutschland



TIMpuls – mehrgeschossige Holzbauten im Realbrandversuch

Thomas Engel¹, Christoph Kurzer¹, Norman Werther¹, Sven Brunkhorst², Stefan Winter¹

Weitere Projektpartner im Vorhaben

Jochen Zehfuß², Felix Steeger³, Björn Kampmeier³, Daniel Butscher⁴, Michael Neske⁴

¹ Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

² Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Fachgebiet Brandschutz

³ Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachgebiet Brandschutz und Baukonstruktion im Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

⁴ Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge, Abteilung Forschung – Institut der Feuerwehr

1. Einleitung

Das Bauen mit Holz erfreut sich steigender Beliebtheit. Holz ist der wichtigste nachwachsende Rohstoff der Zukunft und kann für die notwendige Dekarbonisierung der Erde einen wesentlichen Beitrag leisten. Im Verbundforschungsvorhaben TIMpuls [1] der Technischen Universität München, Technischen Universität Braunschweig, Hochschule Magdeburg-Stendal und des Instituts für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge wird ein wissenschaftlich begründeter Nachweis erarbeitet, mit dem die unbedenkliche Verwendbarkeit tragender und raumabschließender Holzbaukonstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden bis zur Hochhausgrenze gezeigt wird. Die hierzu erforderlichen Grundlagen zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Brandschutzregelungen für die erweiterte Anwendung des Holzbaus werden auf Basis experimenteller und numerischer Untersuchungen erarbeitet.

2. Ziele und Strategien des Forschungsvorhabens TIMpuls

Für die bauordnungsrechtliche Anwendbarkeit der Holzbauweise bis zur Hochhausgrenze werden verschiedene Strategien zum Nachweis der Erfüllung des brandschutztechnischen Sicherheitsniveaus verfolgt. Einhergehend mit dem erweiterten Einsatz der Holzbauweise ist nachzuweisen, dass durch die zusätzliche Brandlast aus der tragenden und aussteifenden Gebäudestruktur das bauaufsichtlich geforderte Sicherheitsniveau im Hinblick auf den Brandschutz nicht bzw. allenfalls nur auf ein gesellschaftlich akzeptierbares Niveau gesenkt wird. Eine Form des Nachweises kann über die Gleichwertigkeit der Holzbauweise gegenüber den konventionellen, nicht brennbaren Bauweisen erbracht werden. Hierbei werden unterschiedliche Aspekte und Lösungswege verfolgt, wie der Nachweis über eine Naturbrandbemessung, das Selbstverlöschten von Bauteilen, die brandschutztechnische Bekleidung «Kapselung» der Bauteile und die Bewertung der Leistungsfähigkeit der abwehrenden und anlagentechnischen Maßnahmen. Innerhalb der themenbezogenen Risikobetrachtung werden so alle beeinflussenden Parameter des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes berücksichtigt und ganzheitliche Maßnahmen für sichere mehrgeschossige Konstruktionen in Holzbauweise erarbeitet.

Das Ziel ist die Bereitstellung eines vollständigen, wissenschaftlich begründbaren Konzepts, um die Verwendbarkeit von Holzbaukonstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden, auch unter teilweiser Verwendung sichtbarer Bauteiloberflächen, bis zur Hochhausgrenze in ganz Deutschland geregelt zu ermöglichen.

3. Ablauf des Forschungsvorhabens TIMpuls

Das Forschungsvorhaben TIMpuls hatte eine Laufzeit von dreieinhalb Jahren (August 2017 bis März 2021). Im Rahmen dieser Projektlaufzeit wurde eine Vielzahl an Themen und Fragestellungen untersucht. Nachfolgend werden auszugsweise einzelne zentrale Punkte dargestellt.

Eine der Grundlagen zu Beginn war die Untersuchung der national sowie international bauordnungsrechtlichen Verwendbarkeit des Baustoffes Holz. Welche aktuellen Regelungen und Richtlinien existieren und auf welche Thesen bzw. Untersuchungen sind diese zurückzuführen. Diese Ergebnisse dienten u. a. auch als Grundlage für die Erstellung eines Ratgebers [2] zum nationalen Stand der bauordnungsrechtlichen Verwendbarkeit des Baustoffes Holz, der unter www.brandschutznavigator.de abgerufen werden kann.

Eine weitere wichtige Grundlage zu Beginn war die Wahl eines repräsentativen Naturbrandverlaufes für die weiteren experimentellen Untersuchungen in diesem Vorhaben. Aus der Fülle möglicher Brandverläufe wurden, mit Blick auf reale Brandverläufe vorhandener Versuche, vereinfachend zwei repräsentative Naturbrandkurven für einen Raum in Holzbauweise abgeleitet, die einerseits ein thermisches Beanspruchungsniveau oberhalb der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) und andererseits einen moderaten Temperatur-Zeitverlauf bei langer Beanspruchungsdauer darstellen, vgl. Bild 1 [3]. Die repräsentativen Naturbrandkurven wurden mittels dem vereinfachten Naturbrandmodell aus DIN EN 1991-1-2/NA, Anhang AA [15] berechnet. Dem Naturbrand_1 liegt eine Brandlastdichte von 1250 MJ/m^2 zugrunde, bei einem Öffnungsfaktor von $0,094 \text{ m}^{0,5}$. Die Brandlastdichte bei Naturbrand_2 beträgt 625 MJ/m^2 mit einem Öffnungsfaktor von $0,013 \text{ m}^{0,5}$. Beide Szenarien wurden für die im Projekt durchgeführten Brandversuche genutzt. Zugehörige Versuchsergebnisse bilden damit die Grundlage für die Validierung weiterführender numerischer Modelle zur Beschreibung des Abbrandes und der Erwärmung im Bauteil unter abweichenden Naturbrandbeanspruchungen.

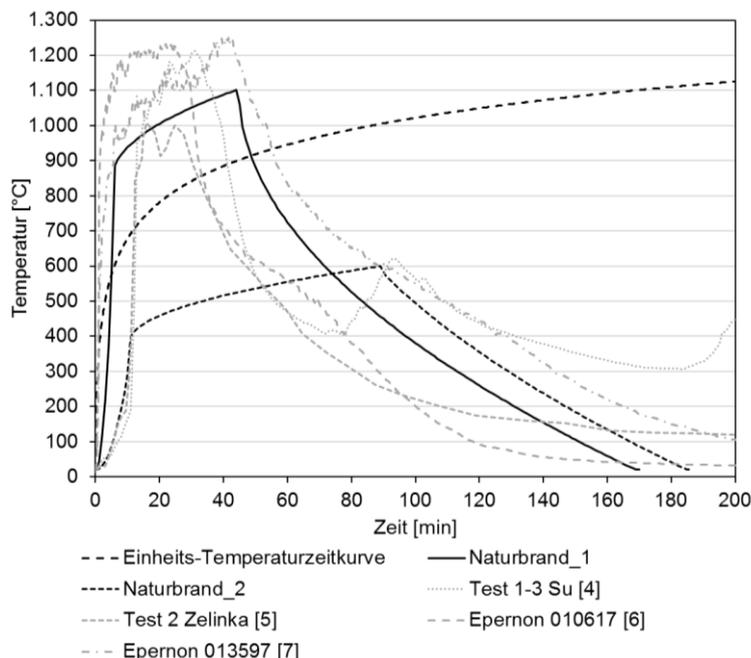


Bild 1: Die beiden gewählten repräsentativen Naturbrandkurven im Vergleich zur ETK sowie zu experimentellen Brandkurven

Diese beiden Naturbrandkurven stellten neben der ETK die Basis für die zu Beginn durchgeführten Kleinbrandversuche dar. Der Fokus lag hierbei auf den Untersuchungen zum Abbrandverhalten von verschiedenen Holzarten, der Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen und dem Nachbrandverhalten von ungeschützten und anfänglich geschützten Bauteilen aus Holz unter Naturbrandbeanspruchung. Für die Abbrandraten von Holz konnten die bisher bekannten normativen Werte unter Normbrandbeanspruchung im Wesentlichen bestätigt und ergänzt werden. Maßgebend für die Abbrandrate sind, neben Einflüssen wie

dem Einwirkungsszenario der Brandbeanspruchung, die jeweilige Holzart, die Holzfeuchte und die damit einhergehenden Parameter [16]. Insbesondere für die Holzart Esche zeigten sich größere Abweichungen zu den bis dato normierten Abbrandraten.

Im Konzept zum Ausschluss oder Reduktion des Abbrandes kommen brandschutztechnisch wirksame Bekleidungen zur Anwendung. Grundsätzlich wurde hierzu festgestellt, dass bei einer Grenzschichttemperatur von ca. 270 °C sichtbare Verfärbungen, jedoch kein Entzünden der Trägerplatte, auftrat. Bei 90-minütiger ETK-Brandbeanspruchung wurde mit einer Kombination von 2 × 18 mm Gipskarton-Feuerschutz- bzw. Gipsfaserplatten ein Entzünden der Trägerplatte verhindert [8].

Ein weiterer zentraler Baustein waren die experimentellen und numerischen Untersuchungen zum Brandverlauf von Raumbränden mit ungeschützten Holzoberflächen. Hierzu wurden in Braunschweig mittelmaßstäbliche Brandversuche im Room Corner-Versuchsstand nach ISO 9705-1 [11] durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass sich durch die Anordnung der immobilen Brandlast (ungeschützte Holzoberflächen) eine schnellere Brandentwicklungsdauer bis zum Eintritt des Flashovers ergibt. Eine Verkleinerung der Ventilationsöffnung führt zum früheren Übergang in ein ventilationsgesteuertes Brandregime, welches eine geringere maximale Wärmefreisetzungsrate aber eine längere Branddauer zur Folge hat. Dementsprechend zeigten die Raumtemperaturen, vergleichend zu einem identischen Aufbau mit größerer Ventilationsöffnung, eine höhere Maximaltemperatur. Mit zunehmender Menge an ungeschützten Holzoberflächen und in Abhängigkeit der Leistung der Brandquelle verkürzt sich die Dauer bis zum Eintritt des Flashovers. Die geometrische Anordnung der ungeschützten Holzoberflächen als Decken- oder Wandfläche besaß in Bezug auf die Zeit bis zum Flashover in dieser Versuchsreihe nur eine untergeordnete Rolle. Zudem erhöht sich die Menge der aus der Öffnung schlagenden Flammen mit zunehmender ungeschützter Holzoberfläche, da die freigesetzten Pyrolysegase erst mit dem Sauerstoff außerhalb des Brandraumes oxidieren können. Ein Selbstverlösch nach Abstellen bzw. Verzehren der mobilen Brandlast zeigte sich zuverlässig bei allen Raumbrandversuche mit einer ungeschützten Holzfläche (Decke oder eine Wand) und bei einzelnen Versuchen mit mehreren ungeschützten Holzflächen (jeweils Decke und eine Wand) [3, 9, 10].

Darauf aufbauend wurden Großbrandversuche zur Untersuchungen von Raumbränden sowie dem Feuerwiderstandsverhalten von Holzbauteilen im Großmaßstab unter Beachtung von Element- und Bauteilanschlüssen in Braunschweig durchgeführt. Ziele waren hierbei I) die Analyse des Feuerwiderstandsverhalten von Holzbauteilen bei Naturbrandbeanspruchung sowie 90-minütiger ETK-Beanspruchung (Äquivalenzbetrachtung), II) die Ermittlung von Konstruktionen und Anschlüssen die den Anforderungen der Gebäudeklasse 5 gerecht werden, III) die Bestätigung der zuvor genannten Room Corner Versuche zur Menge von ungeschützten Holzoberflächen im Großmaßstab, IV) die Analyse zur Skalierbarkeit der Ergebnisse der Kleinbrandversuche zur Brandschutzbekleidung und zum Abbrandverhalten und V) die Verwendung der Messdaten für die numerischen Untersuchungen (CFD- / FEM - Modelle).

Weiter wurden auch Fragestellung wie beispielsweise die Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden experimentell untersucht. Hierbei lag der Fokus insbesondere auf der Verwendung von Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtungen. Im Rahmen der Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass das Risiko eines Auftretens von Elektrobränden innerhalb der Konstruktion gering ist, die vorhandenen Schutzeinrichtungen eines Hausanschlusses einen Teil möglicher Defekte bereits abdecken und bei allen durchgeführten Versuchen ein Selbstverlösch innerhalb der Holztafelbaukonstruktion bei Vorhandensein von nichtbrennbaren Dämmstoffe auftrat [12].

Der Einfluss eines vermehrten Einsatzes von Holz für das mehrgeschossige Bauen auf den abwehrenden Brandschutz war ebenfalls Teil dieses Vorhabens. So bestätigte u.a. die Auswertung einer Befragung der deutschen Feuerwehren eine grundsätzlich positive Haltung gegenüber dem Holzbau, führte aber gleichzeitig den nachdrücklichen Wunsch nach einer breiten Ausbildung mit Fokus auf die Feuerwehren in diesem Themenfeld auf [13].

Dies soll nur einen Auszug aus den Erkenntnissen im Rahmen des Forschungsvorhabens sein. Alle diese Untersuchungen im kleinen, mittleren oder Großmaßstab liefern wichtige Erkenntnisse und stellen die Basis für die abschließenden Realbrandversuche dar, die als Beleg der innerhalb des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse dienen und in diesem Beitrag genauer dargestellt werden.

4. Abschließende Realbrandversuche im Forschungsvorhaben TIMpuls

4.1. Ziele der großmaßstäblichen Realbrandversuche

Die Realbrandversuche dienen zum Beleg der innerhalb des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse und als Grundlage zum Nachweis der bauordnungsrechtlichen Schutzziele, wie die Tragfähigkeit, der Raumabschluss, das Selbstverlöschten bzw. die Löschbarkeit der Konstruktionen durch die Feuerwehr (Nachbrandverhalten) sowie die Begrenzung der Brandausbreitung. Untersucht werden Raumbrände in Holzkonstruktionen mit einer normativen mobilen Brandlast und bautypischen Ausführungen. Besonders die Variation zwischen ungeschützten, anfänglich geschützten und vollständig geschützten Holzoberflächen ist hierbei von hoher praxisrelevanter Bedeutung.

Konkrete Untersuchungsziele sind hierbei:

- Beleg der Ergebnisse der vorherigen, im Bauteilmaßstab durchgeführten Versuche im «realen Versuchsbauwerk» unter Naturbrandbedingungen
- Einfluss brennbarer Bauteiloberfläche auf den Brandverlauf
- Verhalten der Brandschutzbekleidung und deren Schutzzeiten unter Naturbrandbeanspruchung
- Verhalten bzgl. Selbstverlöschten und Nachbrandverhalten von Holzkonstruktionen
- Löschbarkeit der praxisüblichen Konstruktionen im Holzbau
- Analyse der Brandweiterleitung über die Fassade in das Geschoss über dem Brandgeschoss durch brennbare Oberflächen im Raum
- Untersuchung der Auswirkungen von brandschutztechnischen Schutzmaßnahmen im Stoß- und Fügungsbereich von Bauteilen
- Bewertung der Standsicherheit unter Naturbrandbeanspruchung
- Bewertung des Raumabschlusses (Feuer und Rauch, Wärmedämmung) unter Naturbrandbeanspruchung
- Überprüfung und abschließende Beurteilung der Vorgaben des Entwurfes der M-HolzBauRL

Zusammenfassend soll unter realen Bedingungen untersucht werden, wie ein Vollbrand in mehrgeschossigen Holzgebäuden verläuft. Im Rahmen der Versuche werden daher umfangreiche Messdaten (Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Gewichtsverlust der mobilen Brandlast und Bauteile usw.) aufgezeichnet, die ausgewertet ein klareres Bild davon geben, wie sich die Gesamtkonstruktion im Brandfall und während des Löschvorgangs verhält, vgl. Bild 2. Letzteres nimmt auch bei diesen Versuchen einen großen Stellenwert ein. Hierdurch soll eine gesamtheitliche Betrachtung von Bränden in Holzgebäude ermöglicht werden, da von der Entstehung bis zur Brandbekämpfung durch die Feuerwehr alle Phasen eines realistischen Brandereignisses eingeschlossen sind.



Bild 2: Werkfeuerwehr TUM Garching bei der Brandbekämpfung

4.2. Beschreibung der Versuche

Der erste Versuch dient als Referenzversuch und soll durch die massive Brandschutzbekleidung aller Bauteile ein nichtbrennbares Gebäude, z.B. aus Mauerwerk bzw. Stahlbeton, darstellen. Bei den weiteren vier Versuchen sind unterschiedliche Kombinationen von Holzkonstruktionen, wie Brettsperrholz (BSP), Brettschichtholz (BSH) und Holztafelbauweise (HTB) jeweils in Verbindung mit Gipskarton-Feuerschutz- (GKF) oder Gipsfaserplatten (GF) bzw. ungeschützt im Einsatz, vgl. Tabelle 1.

Das Innenmaß der Versuchsraumgrundfläche beträgt bei drei kleineren Versuchen $4,5 \times 4,5 \text{ m}^2$ und bei zwei großen Versuchen $4,5 \times 9 \text{ m}^2$. Dadurch entsteht ein geometrisches Verhältnis von ein zu zwei für die Grundfläche, den Wandabstand und das Volumen, wodurch der räumliche Einfluss auf den Brandverlauf beobachtet werden kann, vgl. Bild 3 bis Bild 10. Um bautypische Raumhöhen abzubilden beträgt das Innenmaß der Versuchsräume ca. 2,4 m, vgl. Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht zu den Konstruktionsformen der Versuche

Versuch	V0	V1	V2	V3	V4
Raumgröße (B × L × H)	4,5 m × 4,5 m × 2,4 m			4,5 m × 9,0 m × 2,4 m	
Grundfläche	20,25 m ²			40,5 m ²	
Öffnungsgröße (B × H)	2,4 m × 2,2 m			4,2 m × 2,2 m	
Öffnungsfaktor	0,094 m ^{0,5}				
Brandlastdichte	1085 MJ/m ²				
Wand 1	100 mm BSP 2×25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	150 mm BSP	140 mm HTB 2×12,5 mm GF	150 mm BSP
Wand 2	100 mm BSP 2×25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	140 mm HTB 2×18 mm GF	140 mm HTB 2×18 mm GF	140 mm HTB 2×18 mm GF
Wand 3	100 mm BSP 2×25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	150 mm BSP	140 mm HTB 2×18 mm GKF	140 mm HTB 2×18 mm GKF
Wand 4	100 mm BSP 2×25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	140 mm HTB 2×18 mm GF	140 mm HTB 2×18 mm GF	140 mm HTB 2×18 mm GF
Decke	180 mm BSH 2×25 mm GKF	180 mm BSH	220 mm HTB 2×18mm GF	180 mm BSH	180 mm BSH
Lineare Bauteile	-	-	-	-	2× Stütze 1× Unterzug
Sichtbare Holzoberfläche	-	35 %*	37 %*	42 %*	58 %*

BSP – Brettsperrholz; HTB – Holztafelbau mit Steinwolle gedämmt; BSH – Brettschichtholz; GKF – Gipskartonfeuerschutzplatte; GF – Gipsfaserplatte; Stütze – 300×300 mm² BSH; Unterzug – 300×320 mm² BSH

* Prozent der gesamten Bauteiloberflächen ohne Fußboden und Fensteröffnung

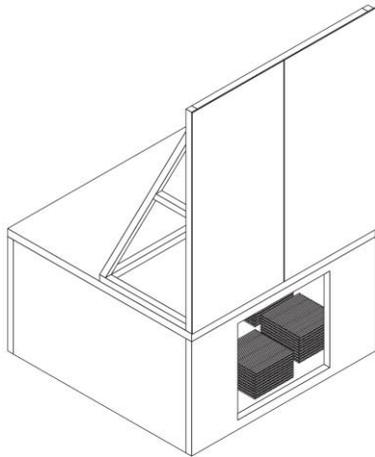


Bild 3: Perspektiven V0, V1, V2

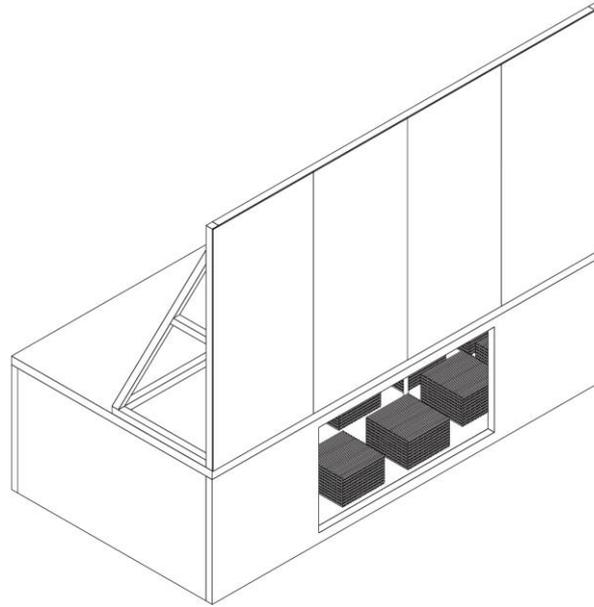


Bild 4: Perspektiven V3, V4

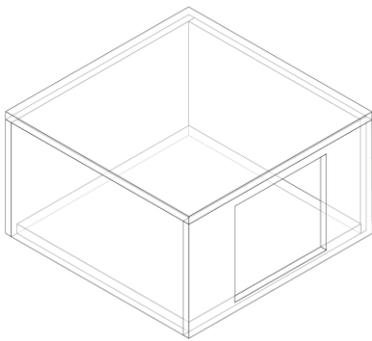


Bild 5: Raummodell V0, V1, V2

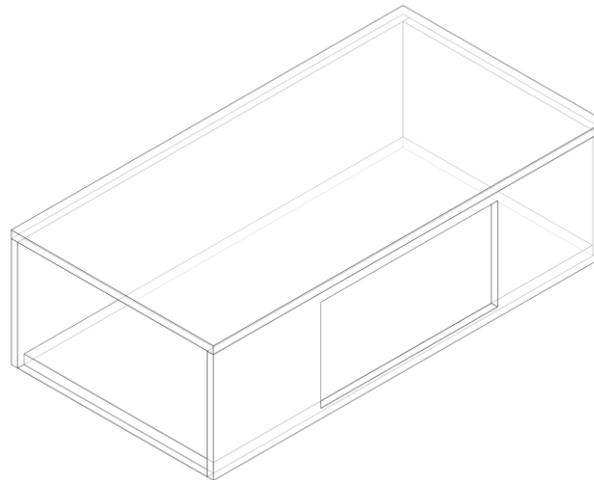


Bild 6: Raummodell V3

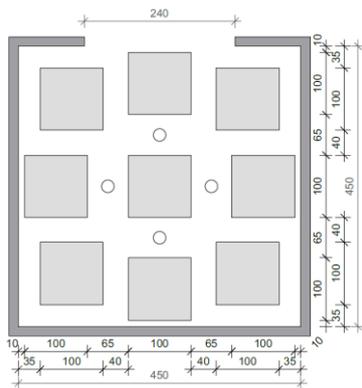


Bild 7: Grundriss mit Anordnung der neun Holzkippen und der vier Messbäume für V0, V1, V2

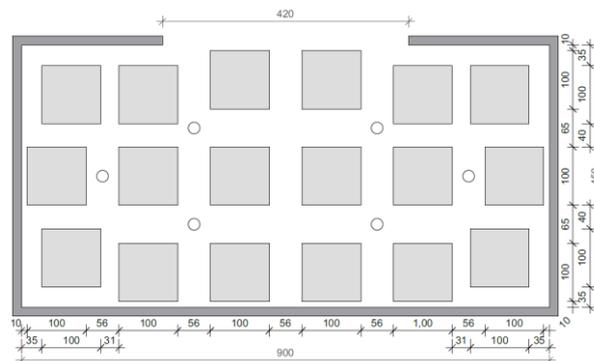


Bild 8: Grundriss mit Anordnung der 18 Holzkippen und der sechs Messbäume für V3

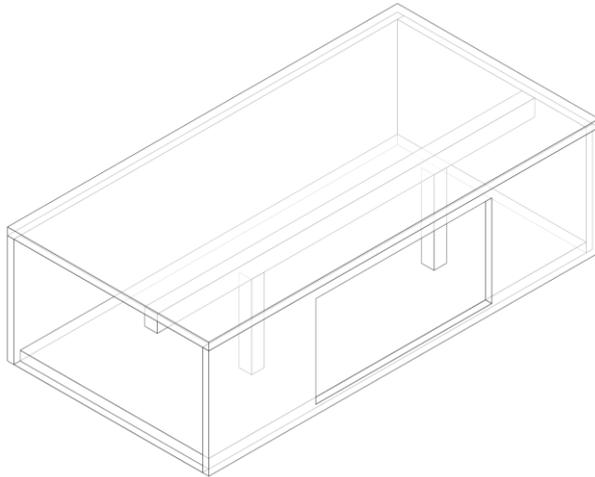


Bild 9: Raummodell V4

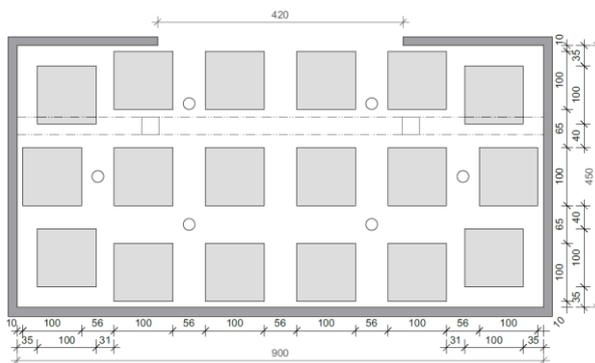


Bild 10: Grundriss mit Anordnung der 18 Holzkrippen und der sechs Messbäume für V4

Alle Raumkonstellationen bzw. Versuchsdurchgänge verfügen über eine Fensteröffnung. Der Öffnungsfaktor wird in Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen und auf Basis der im Rahmen des Vorhabens verwendeten Naturbrandkurve nach DIN EN 1991-1-2 Anhang AA [14] zu $O = 0,094 \text{ m}^{1/2}$ gewählt. Dies entspricht einer Öffnung von $2,4 \times 2,2 \text{ m}^2$ (b×h) im kleinen Raum ($4,5 \times 4,5 \text{ m}^2$) und $4,2 \times 2,2 \text{ m}^2$ (b×h) im großen Raum ($4,5 \times 9 \text{ m}^2$). Das «Fenster» ist von Beginn an geöffnet. Dies dient der Vergleichbarkeit zwischen den Realbrandversuchen und den vorher gelaufenen kleinmaßstäbigen Grundlagenversuchen.

4.3. Bauteilkatalog

Die Auswahl der Wand- und Deckenkonstruktionen soll die baupraktischen Ausführungen im Holzbau widerspiegeln und gleichzeitig die bauordnungsrechtlich gewünschten Veränderungen mitbetrachten. Hierfür wurden Abstimmungen mit Praxispartnern geführt und mit den Erkenntnissen aus diesem und anderen Forschungsvorhaben, wie z. B. dataholz, zusammengeführt.

Eine Übersicht der eingesetzten Wand- und Deckenaufbauten der Versuche sind in Tabelle 2 abgebildet und beschrieben.

Tabelle 2: Übersicht der Holzkonstruktionen aus den Versuchen

Wandaufbauten

		<p>100 mm Brettsperrholzwand (fünfläsig 20 20 20 20 20 mm) mit 18 mm GKF/GF</p>
		<p>150 mm Brettsperrholzwand (fünfläsig 34 24 34 24 34 mm)</p>
		<p>140 mm Holztafelbauwand mit 2x 18 mm mit 2x 18 mm GKF/GF-Bekleidung</p>
		<p>140 mm Holztafelbauwand mit 12 mm Grobspanplatte (OSB) und 2x 12,5 mm GF-Bekleidung</p>

Deckenaufbauten

		<p>180 mm Brett-schichtholzdielendecke</p>
		<p>220 mm Holztafelbaudecke mit 22 mm Abhängung und 2x 18 mm GF-Bekleidung</p>

4.4. Anschlüsse und Elementfugen

Die Bauteilanschlüsse (Wand-Decke und Wand-Wand) sowie die Elementstöße erfolgen nach typischen baupraktischen Vorgaben (inkl. Fugenspalte von bis zu 20 mm), vgl. Bild 11, und nach den Erkenntnissen aus 0. Dementsprechend können später für die bauordnungsrechtlichen Empfehlungen bereits die zu erwartenden Toleranzen der Bauausführung und Gebrauchszustände mitberücksichtigt werden.

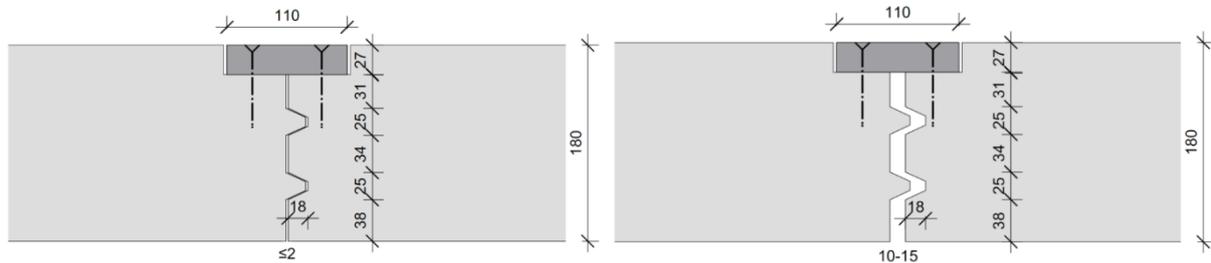


Bild 11: Darstellung von zwei beispielhaften Elementstößen der Brettschichtholzdecke

4.5. Brandlast

Für die Versuche wird eine Brandlastdichte für die Nutzung «Wohnraum» gewählt. Damit ergibt sich nach 0 für das 90 % - Quantil eine charakteristische Brandlastdichte von 1.085 MJ/m^2 .

Die Brandlast wird in Form von Holzkrippen in den Versuchen ausgeführt. Die Grundfläche der einzelnen im Brandraum gleichmäßig verteilten Holzkrippen betragen jeweils $1.000 \times 1.000 \text{ mm}^2$. Sie sind aus Stäben mit den Abmessungen $B \times H = 40 \times 40 \text{ mm}^2$ ausgeführt. Das Materialoberfläche zu Luft Verhältnis der Krippen beträgt 1:1. Unter Berücksichtigung der Holzfeuchte und der Rohdichte der Holzkrippen entspricht die oben beschriebene Brandlast von 1085 MJ/m^2 ca. 74 kg/m^2 Holz, also in Summe ca. 1,5 Tonnen im kleinen Raum ($4,5 \times 4,5 \text{ m}^2$) und ca. 3 Tonnen Holz im großen Raum ($4,5 \times 9 \text{ m}^2$). Mit Blick auf die sehr hoch angesetzte Brandlast lassen sich die durchgeführten Versuche als in ihrer Form einzigartig definieren.

4.6. Beschreibung der einzelnen Versuche

Versuch V0

Als Referenz zwischen den üblichen Bauweisen des mehrgeschossigen Bauens dient der Versuch V0. Durch die massive Brandschutzbekleidung ($2 \times 25 \text{ mm}$ Gipskarton-Feuerschutzplatte) der brennbaren Konstruktion soll ein Mitbrennen des Holzes ausgeschlossen werden und somit das Brandverhalten einer nichtbrennbaren Konstruktion imitiert werden, vgl. Bild 12. Folglich können die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Versuchsreihe ins Verhältnis mit anderen Brandversuchen gesetzt werden und ein Vergleich zwischen brennbarer und nichtbrennbarer Bauweise (z.B. Mauerwerk, Beton) ermöglichen.



Bild 12: Drohnenaufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V0)

Erkenntnisse:

- Brandschutzbekleidung $2 \times 25 \text{ mm}$ Gipskartonfeuerschutzplatte verhindert den Mitbrand und die Verfärbung der Holzbauteile unter der resultierenden Naturbrandbeanspruchung.
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C .
- Flashover nach ca. 9 min.

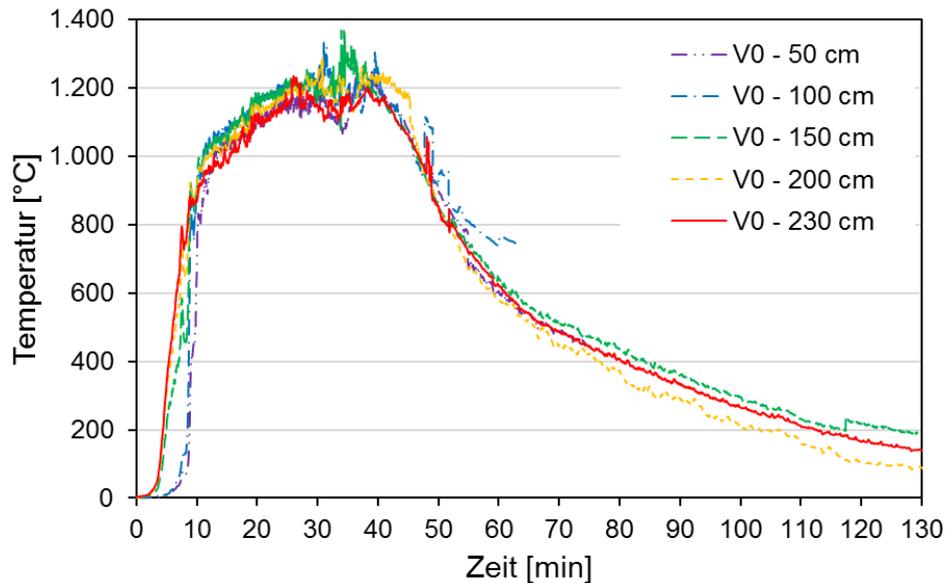


Bild 13: Temperatur-Zeit-Verläufe V0 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Versuch V1

Versuch V1 verfolgt das Ziel baupraktische Ausführungen des mehrgeschossigen Holzbaues abzubilden.



Bild 14: 180° Drohnenaufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V1)

Die gewählten Massivholzkonstruktionen mit der sichtbaren Decke und den einlagig bekleideten Wänden entsprechen den Vorgaben des bis dato veröffentlichten Entwurfs der M-HolzBauRL [17]. Der Anteil der ungeschützten, sichtbaren Holzoberfläche beträgt 35 % der gesamten Bauteiloberflächen ohne Fußboden und Fenster zu Brandbeginn.

Erkenntnisse:

- Nach ca. 40 min erstes Abfallen der Brandschutzbekleidung
1× 18 mm und folglich Mitbrand der Brettsperrholzwandbauteile unter der hier resultierenden Naturbrandbeanspruchung.
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C.
- Flashover nach ca. 9 min.

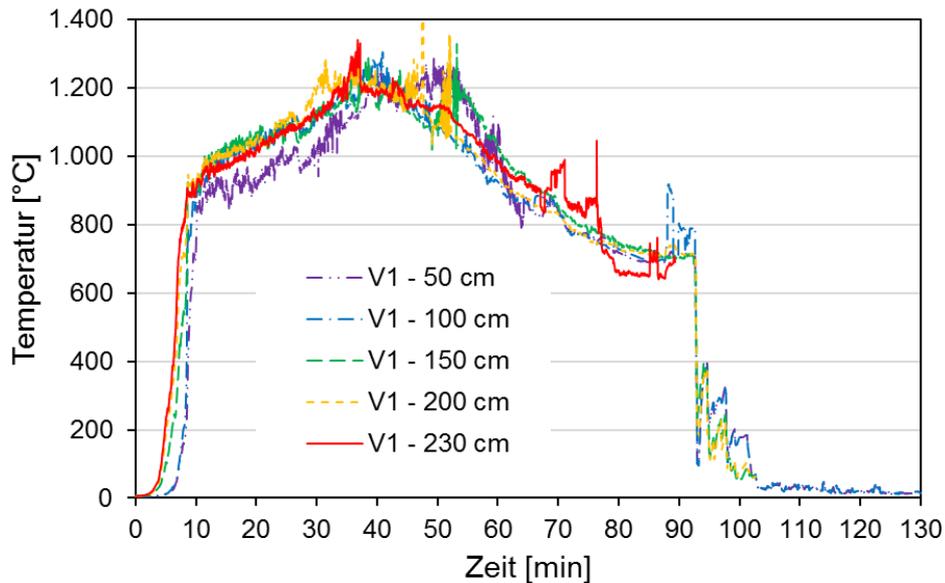


Bild 15: Temperatur-Zeit-Verläufe V1 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Versuch V2

Zur Variation der Anordnung der brennbaren Oberflächen sind im Versuch V2 anstatt der Decke zwei Wände unbekleidet ausgeführt. Der Anteil der brennbaren Holzoberfläche an der Bauteiloberfläche ist mit 37 % in etwa identisch zum Versuch V1. Die unbekleideten Wände sind gegenüberliegend angeordnet, um eine gegenseitige Beeinflussung der Wände zu untersuchen. Zur Betrachtung von bautypischen Schwächungen der Wände durch Elektroeinbauten wurden vier Bohrungen in eine der Massivholzwände vorgesehen und mit für den Brandschutz klassifizierten Einbaudosen für Steckdosen oder Schaltern und Einbauteil bestückt. Hiermit sollte ein möglichst ungünstiger Fall aus der Praxis abgedeckt werden.



Bild 16: 180° Drohnenaufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V2)

Erkenntnisse:

- Nach ca. 33 min erstes Abfallen der ersten und nach ca. 62 min erstes Abfallen der zweiten Lage der Brandschutzbekleidung an der Decke unter der hier resultierenden Naturbrandbeanspruchung.
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C.
- Flashover nach ca. 8 min.

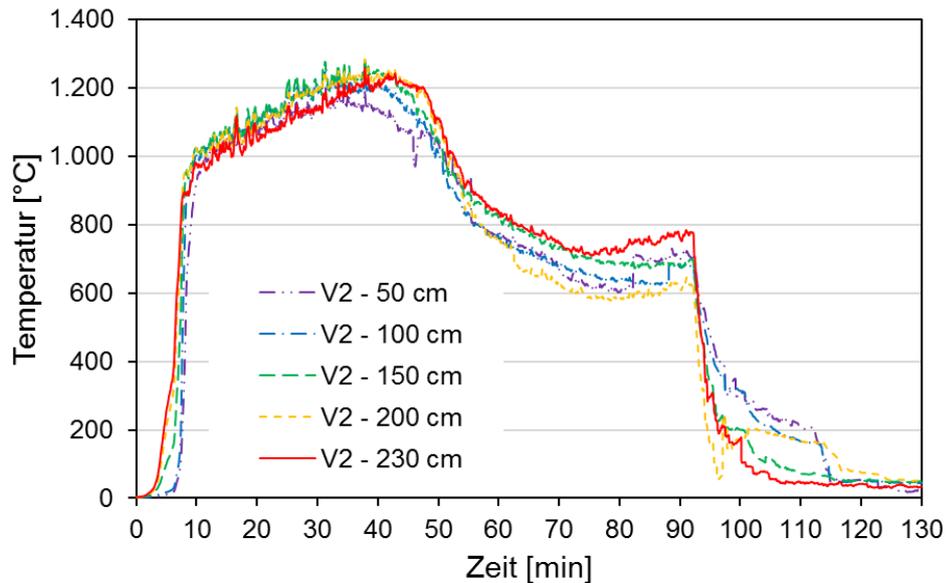


Bild 17: Temperatur-Zeit-Verläufe V2 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Versuch V3

Versuch V3 stellt ein Gebäude mit einer sichtbaren Brettschichtholz-Decke und vier bekleideten Holztafelbauwänden (2×18 mm GKF/GF) dar, wobei eine Wand geringer ($2 \times 12,5$ mm GKF/GF + OSB) bekleidet war. Hiermit soll die Vergleichbarkeit zwischen den holzbauspezifischen Bauweisen Massivholz zu Holztafelbau erbracht werden. Der Anteil von brennbarer Holzoberfläche an der Bauteiloberfläche beläuft sich auf 42 % und ist damit nur leicht erhöht zu den vorherigen Versuchen.



Bild 18: 180° Drohnenaufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V3)

Erkenntnisse:

- Nach ca. 90 min beteiligt sich die Decke kaum noch am Brand.
- Brandschutzbekleidung 2×18 mm verhindert den Mitbrand der Holzbauteile nicht über die gesamte Branddauer. Lokale Brände an den Ständern und den OSB Platten ab ca. 65. Min.
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C
- Flashover nach ca. 10 min

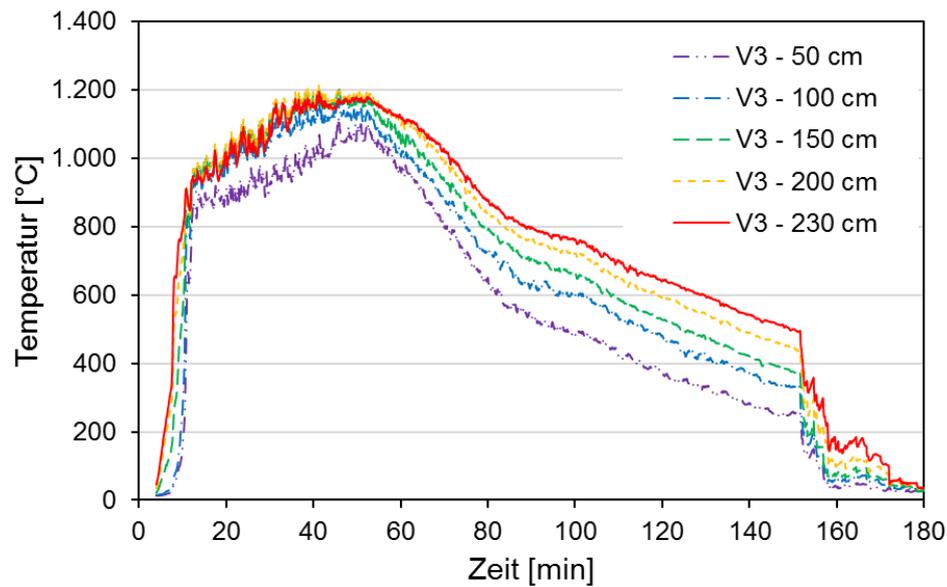


Bild 19: Temperatur-Zeit-Verläufe V3 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Versuch V4

Als Abschluss der Versuchsreihe ist im Versuch V4 der größte Anteil an brennbarer Holzoberfläche an der Bauteiloberfläche mit 58 % vorgesehen. Neben der Decke und einer Wand sind zusätzlich ein Unterzug und zwei Stützen im Brandraum angeordnet, vgl. Bild 21. Hiermit soll auch nochmals der Einfluss der brennbaren Oberfläche im Raum auf die Brandausbreitung über die Fassade betrachtet werden. Zusätzlich ist auch das Eingreifen der Feuerwehr nach über 60 Minuten aber weiterhin in der Vollbrandphase vorgesehen. Hiermit werden dann Aussagen zur Lösbarkeit von Holzgebäuden gewonnen.



Bild 20: 180° Drohnenaufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V4)

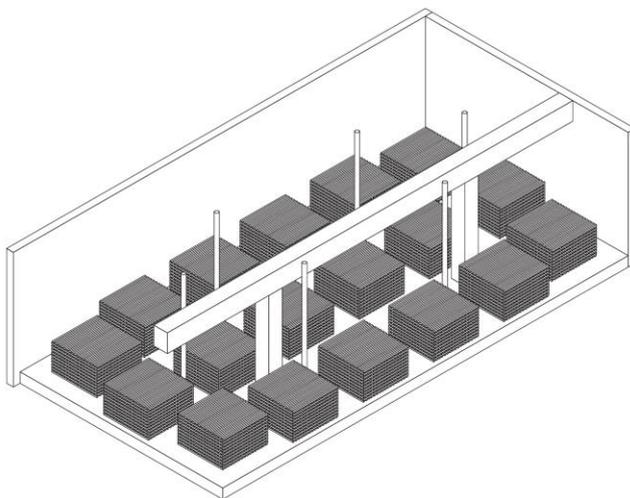


Bild 21: Anordnung der linearen Bauteile (zwei Stützen und Unterzug), der sechs Messbäume und der 18 Holzkruppen bei V4

Erkenntnisse:

- Unproblematisches Ablöschen der Konstruktion bis «Feuer in Gewalt».
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C
- Flashover nach ca. 10 min

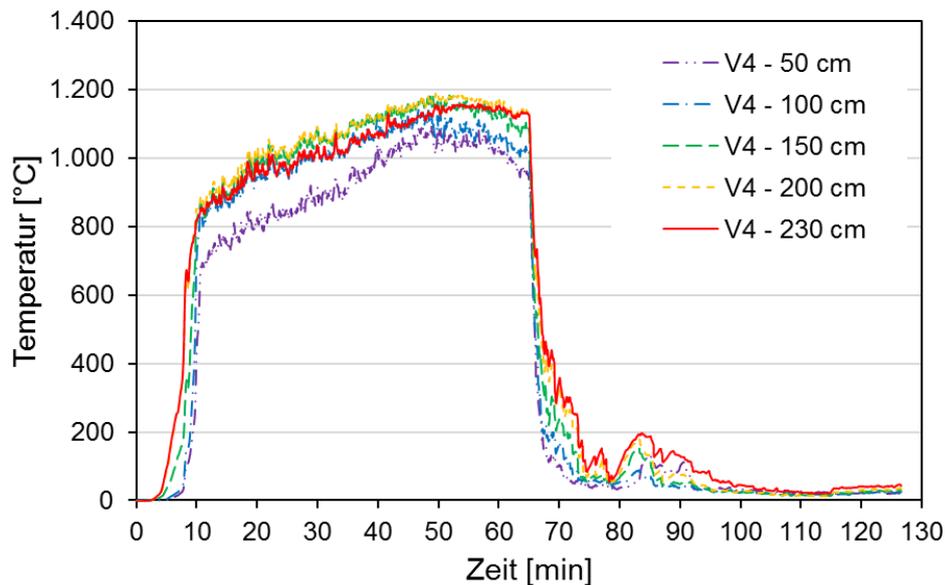


Bild 22: Temperatur-Zeit-Verläufe V4 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

5. Vorläufiges Fazit und Zusammenfassung

Die abschließenden Realbrandversuche dienen als «Beleg» der innerhalb des Forschungsvorhabens TIMpuls gewonnenen Erkenntnisse für mehrgeschossige Holzgebäude. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Klein- und Großbrandversuchen sollen diese Realbrandversuche - im Vorhaben Belegversuche genannt - zum Ende des Vorhabens die Ergebnisse abschließend unter realen Randbedingungen und natürlichen Brandlasten nachweisen. Dabei werden bautypische, im mehrgeschossigen Holzbau übliche Kombinationen aus verschiedenen Konstruktionsformen (z.B. Brettsperrholz, Brettschichtholz und Holztafelbau) berücksichtigt. Es werden sowohl Decken und Wände mit bekleideten als auch mit sichtbaren Holzoberflächen berücksichtigt. Die Versuche sollen für alle Interessenvertreter/innen ein klareres Bild liefern, wie sich die gesamte Holzkonstruktion im Brandfall und während des Löschvorgangs durch die Feuerwehr verhält. Dies unter ganz realen Bedingungen, also praxisnah, so wie es am Ende wirklich brennt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen soll die bauordnungsrechtliche Öffnung der Gebäudeklasse 4 und 5 für den mehrgeschossigen Holzbau bekräftigt werden. Bezogen auf die sehr hoch angesetzte mobile Brandlast sind diese Versuche zum aktuellen Zeitpunkt einzigartig.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Tagungsbandes werden die Ergebnisse dieser Versuche noch intensiv ausgewertet. Als vorläufiges Fazit mit Blick auf erste Auswertungen lassen sich folgende Punkte festhalten:

- Unter Berücksichtigung des hier gewählten «kritischen Falls» (große Öffnung, hohe Brandlast) lässt sich kein signifikanter Einfluss des Baustoffes Holz auf die Brandentwicklung erkennen, vgl. Bild 23.

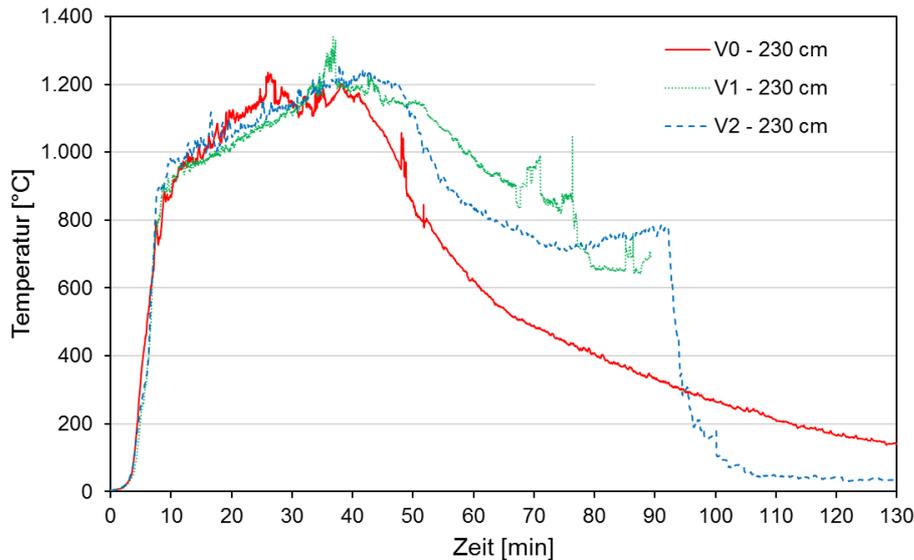


Bild 23: Vergleich Temperatur-Zeit-Verläufe V0, V1, V2 im Brandraum in 230 cm Höhe (Mittelwert)

- Das Vorhandensein zusätzlicher immobiler Brandlast führt bei einem Brand zu einer zusätzlichen Einwirkung auf die Fassade. Diese ist nach aktuellem Stand der Auswertung bei hoher mobiler Brandlast nicht stark ausgeprägt. Hier sind jedoch weitere Auswertungen und Betrachtungen vor einer finalen Aussage notwendig, vgl. Bild 24.

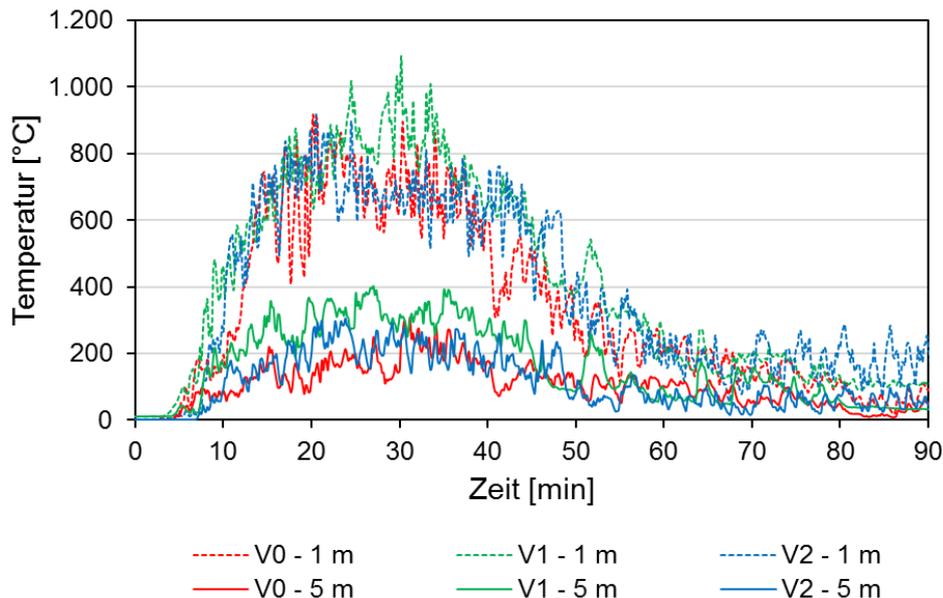


Bild 24: Vergleich der Temperatur-Zeit-Verläufe in der Mitte des Fassadenschildes in den Höhe 1 m und 5 m über die Brandraumöffnung für die Versuche V0, V1, V2

- Wirksame Löscharbeiten waren bei allen Versuchen und Konstruktionen zielführend und ohne besondere Maßnahmen möglich.
- Die Stoß- und Fügungsbereiche von Bauteilen und Elementen erzielten unter Naturbrandbeanspruchung raumabschließende Wirkung und verhinderten eine Übertragung von Feuer und Rauch wirkungsvoll.

6. Ausblick

Nachdem zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Tagungsbandes noch Ergebnisse intensiv ausgewertet werden müssen, beschränkt sich dieser Artikel auf ein vorläufiges Fazit für die abschließenden Realbrandversuche.

Unter www.timpuls.tum.de [1] können unter dem Reiter – Aktuelles – die Videoaufzeichnungen der Versuche abgerufen werden. Unter Berücksichtigung der Versuchsbeschreibung zuvor können diese Interessierten weitere Aufschlüsse liefern. Des Weiteren wird auf der gemeinsamen Projektseite regelmäßig auf neue Ergebnisse und Veröffentlichungen der Forschergruppe verwiesen.

7. Fördernachweis

Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) gefördert. Eine Kofinanzierung der Holzwirtschaft erfolgt koordinierend über den Landesinnungsverband des Bayerischen Zimmererhandwerks.

8. Literatur

- [1] Technische Universität München (2021) *Forschungsvorhaben TIMpuls* [online]. München: <https://www.timpuls.tum.de>
- [2] Engel, T.; Lechner, M. (2020) *Baurechtskonformes Planen und Bauen mit Holz - Verwendbarkeitsnachweise und technische Regeln für den Brandfall im Holzbau*. Version 1 März 2020; Technische Universität München. <https://doi.org/10.14459/2020md1543153>
- [3] Winter, S., Zehfuß, J.; Engel, T.; Brunkhorst, S., Werther, N. (2019) *Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung für eine erweiterte Anwendung des Holzbaus*. In: Tagungsband der Braunschweiger Brandschutz-Tage vom 25. – 26. September 2019 in Braunschweig.
- [4] Su, J. et al. (2018) *Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 2 & 3 – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests*. National Research Council of Canada, Report number: FPRF-2018-01, Ottawa, Ontario, Kanada.
- [5] Zelinka, S. et al. (2018) *Compartment Fire Testing of a Two-Story Mass Timber Building. General Technical Report FPL-GTR-247*, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- [6] Robert, F. et al. (2019) *ÉPERNON FIRE TESTS PROGRAMME - Test report n° 010617: CLT slab (Natural Fire Test – Scenario 1)*, CERiB Fire Testing Centre, Frankreich. <http://www.epernon-fire-tests.eu>
- [7] Robert, F. et al. (2019) *ÉPERNON FIRE TESTS PROGRAMME - Test report n° 013597: CLT slab (Natural Fire Test, Scenario 2)*, CERiB Fire Testing Centre, Frankreich. <http://www.epernon-fire-tests.eu>
- [8] Engel, T.; Brunkhorst, S.; Steeger, F.; Winter, S.; Zehfuß, J.; Kampmeier, B.; Werther, N. (2020) *TIMpuls Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau – Abbrandraten, Schutzzeiten von Bekleidungen und Nachbrandverhalten von Holz*. Bautechnik. <https://doi.org/10.1002/bate.202000043>
- [9] Brunkhorst, S.; Zehfuß, J. (2019) *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Brandverlauf von Raumbränden mit immobilen Brandlasten*. Tagungsband des SYMPOSIUM 2019 Heißbemessung -Structural Fire Engineering am 24. September 2019 in Braunschweig.
- [10] Brunkhorst, S.; Zehfuß, J. (2020) *Experimental and Numerical Analysis of Fire Development in Compartment Fires with Immobile Fire Load*. International Scientific Conference on Woods & Fire Safety. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7_28

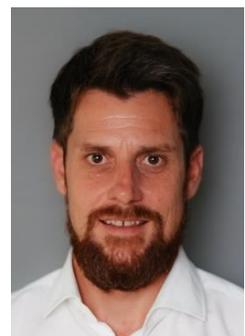
- [11] ISO 9705-1:2016-02 (2016) *Reaction to fire tests - Room corner test for wall and ceiling lining products - Part 1: Test method for a small room configuration*.
- [12] Engel, T.; Moosmüller, K.; Werther, N. (2020) *Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden*. Bautechnik. <https://doi.org/10.1002/bate.202000076>
- [13] Engel, T.; Butscher, D. (2019) *Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen für das Bauen mit Holz*; BRANDSchutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung; Ausgabe 5/2019
- [14] Suttner, E.; Werther, N.; Dumler, P. (2020) *Stand der Technik zur Qualität von Bauteil- und Elementfugen in Holzbaukonstruktionen im Hinblick auf den Durchtritt von Feuer und Rauch*; <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20566.80964>
- [15] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09: *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke*. Berlin: Beuth. Ausgabe Sept. 2015.
- [16] Werther, N. (2016) *Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren* [Dissertation]. Technische Universität München.
- [17] Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (2021) *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL)*. Fassung Oktober 2020. Ausgabe 4, 21.06.2021.

BRAND

Plandaten und Planungssicherheit

Gebäudetechnische Installationen an und durch Bauteile in Holz

Ivan Brühwiler
B3 Kolb AG
Romanshorn, Schweiz



Gebäudetechnische Installationen an und durch Bauteile in Holz

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Für ein optimales Zusammenspiel von Holzbaukonstruktionen und gebäudetechnischen Installationen ist eine frühzeitige und integrale Planung unabdingbar. Bereits in der Entwurfsphase ist die Architektur, Tragkonstruktion wie auch die Gebäudetechnik in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Planenden zu entwickeln, damit wirtschaftliche Holzbauten entstehen. Die Praxis zeigt aber, dass die Haustechnik in der Konzeptphase oft zu spät oder zu wenig berücksichtigt wird, sodass aufwendige Lösungen entstehen bzw. bei der Umsetzung Konflikte und Fehler resultieren.

Die fortschreitende Holzanwendung in unterschiedlichen Gebäudetypologien wie auch Nutzungen fordert zur einfachen Planung und Ausführung einfache und standardisierte Lösungen bezüglich der Führung von gebäudetechnischen Installationen an und durch Bauteile in Holz.

Durch den Einzug des Holzbaus in anspruchsvollere und komplexere Gebäudetypologien und Nutzungen sind zunehmend auch gebäudetechnische Anlagen mit Feuerwiderstand/Funktionserhalt an Bauteile in Holz zu installieren. Diese müssen während einer definierten Zeitdauer die an sie gestellten Anforderungen unter bestimmten Bedingungen erfüllen. Häufig sind diese Systeme auf Massivbauten geprüft und können nicht ohne weiteres in Holzbauten verbaut werden.

Anhand der Grundlagen und Möglichkeiten in der Schweiz wird auszugsweise aufgezeigt, wie gebäudetechnische Installationen in Holzbauten brandsicher geplant und installiert werden können.

1.2. Grundlagen

In der Schweiz werden die Brandschutzanforderungen an gebäudetechnische Anlagen in den VKF-Brandschutzrichtlinien [1] definiert, wobei ein Grossteil der Richtlinien betroffen ist. Auf die brandschutztechnische Planung gebäudetechnischer Anlagen haben zudem gewerksspezifische Normen und Vorschriften Einfluss.

Für den Holzbau zeigt die Lignum-Dokumentation Brandschutz die Möglichkeiten der Holz-anwendung auf, welche sich durch die schweizerischen VKF-Brandschutzvorschriften ergeben. Sie ist für Architekten, Ingenieure, Brandschutzbehörden und Ausführende ein wichtiges Arbeitsinstrument in Planung, Vollzug und Umsetzung. Sie vermittelt ein breites Wissen über den Brandschutz im Holzbau, fördert die fachliche Kompetenz und bildet damit die Voraussetzungen, die den Holzbau als brandschutztechnisch sichere Bauweise entscheidend prägen.

In Bezug auf gebäudetechnische Anlagen dient die Publikation «Haustechnik – Installationen und Abschottungen» [2] als Hilfsmittel zur Planung der brandschutztechnischen Schnittstellen zwischen Holzbau und gebäudetechnischen Anlagen unter Berücksichtigung der Anforderungen gemäss den schweizerischen VKF-Brandschutzvorschriften.

Im Rahmen dieses Referats sind für bestimmte Themen auszugsweise Inhalte dieser Publikation aufgeführt, um mögliche Lösungsansätze aufzuzeigen. Die Inhalte sind nicht abschliessend dargestellt, für die Planung und Ausführung solcher Anlagen ist die Publikation zu konsultieren.

2. Installationskonzepte

2.1. Allgemeines

Gebäudetechnische Anlagen beziehungsweise deren Installationen verursachen Durchdringungen durch brandabschnittsbildende Bauteile und dadurch eine Schwächung des baulichen Brandschutzes (Abbildung 1). Durch geeignete Massnahmen soll die Brandweiterleitung durch brandabschnittsbildende Bauteile verzögert und ein Brandeintrag in die Bauteile vermindert werden.

In die Planung und Ausführung der baulichen Brandschutzmassnahmen einerseits und der gebäudetechnischen Anlagen andererseits sind üblicherweise mehrere am Bau Beteiligte involviert. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Brandsicherheit empfiehlt es sich deshalb, während der Planung ein Installationskonzept zu erstellen und eine klare Schnittstellenregelung zu definieren. Im Installationskonzept sind folgende brandschutztechnisch relevanten Punkte zu definieren:

- Vertikale Erschliessung
- Horizontale Erschliessung
- Leitungsdurchdringungen durch Bauteile
- Zuständigkeiten/
Schnittstellenregelung

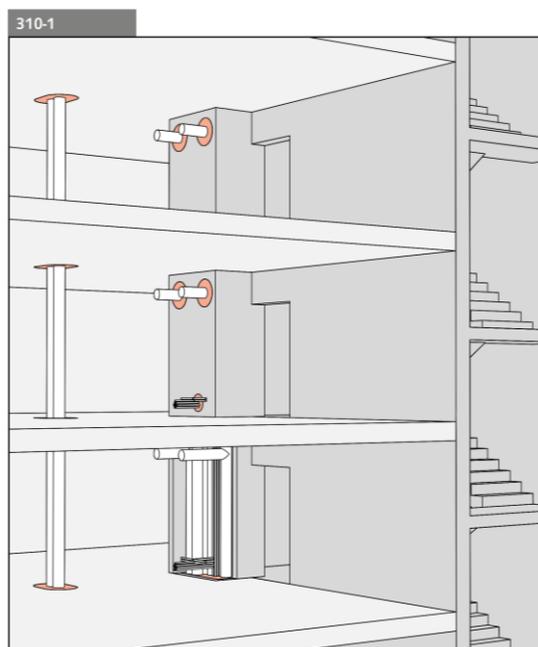


Abbildung 1: Durchdringungen durch brandabschnittsbildende Bauteile aufgrund gebäudetechnischer Installationen (Abbildung 310-1 gemäss [2])

2.2. Vertikale Erschliessung

Bei mehrteiligen Gebäuden erfolgt die vertikale Erschliessung optimalerweise separat pro Gebäudeteil beziehungsweise nahe den entsprechenden Verbrauchern. Diese Konzeption ermöglicht eine Reduktion der horizontalen Erschliessung, was insbesondere für Holzbauten vorteilhaft ist. Abbildung 2 zeigt schematisch eine mögliche Anordnung von Installationsschächten am Beispiel eines Mehrfamilienhauses.

Aus brandschutztechnischer Sicht bestehen mehrere Möglichkeiten für die vertikale Erschliessung, wobei unterschieden wird zwischen Installationen in feuerwiderstandsfähigen Schächten und offen geführten Installationen in verschiedenen Ausführungsvarianten. Letztere sind als Ergänzung zu Vertikalerschliessungen in Installationsschächten zu verstehen und sollten nur in Einzelfällen angewendet werden. Installationen in feuerwiderstandsfähigen Schächten können in der Regel leichter kontrolliert und unterhalten werden als offen geführte Installationen.

Im Anhang der Publikation [2] sind mögliche Konstruktionsbeispiele von feuerwiderstandsfähigen Installationsschächten für häufig verwendete Schachtkonzeptlösungen in Wohn- und Bürogebäuden dargestellt.

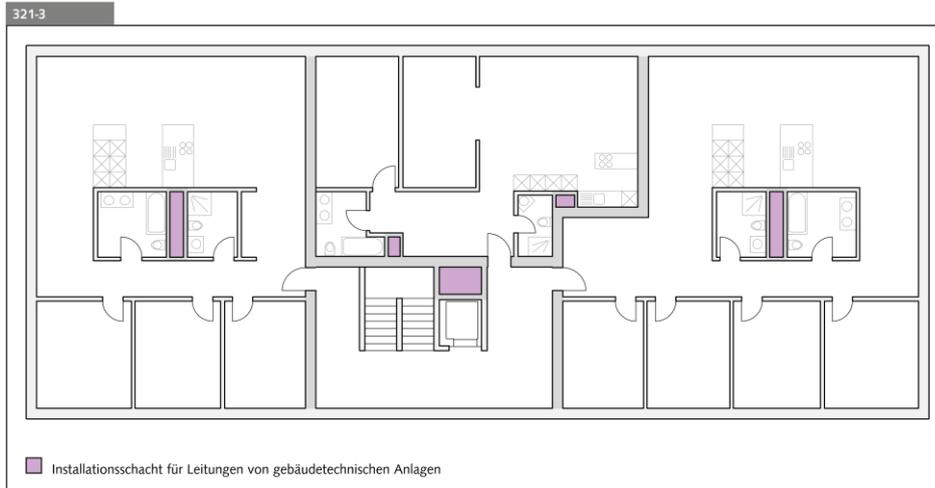


Abbildung 2: Beispiele für die Anordnung von Installationsschächten im Mehrfamilienhaus (Abbildung 321-3 gemäss [2])

2.3. Horizontale Erschliessung

Als horizontale Erschliessung wird einerseits die Erschliessung der Installationsschächte in den Technikbereichen und andererseits die horizontale Feinverteilung der gebäudetechnischen Installationen innerhalb der Geschosse bezeichnet.

Empfehlenswert ist es, die horizontale Erschliessung so zu konzipieren, dass Installationen nicht innerhalb von brandschutzwirksamen Bauteilen geführt werden, sondern in nicht brandschutzwirksamen Installationsebenen (Bodenaufbauten, Vorwandkonstruktionen, Unterdecken, Abbildung 3).

Bei der Leitungsführung sind die Anforderungen hinsichtlich der Verwendung von Baustoffen zu berücksichtigen.

Bei Installationen, die in vertikalen oder horizontalen Fluchtwegen geführt werden, sind zusätzliche Anforderungen zu beachten.

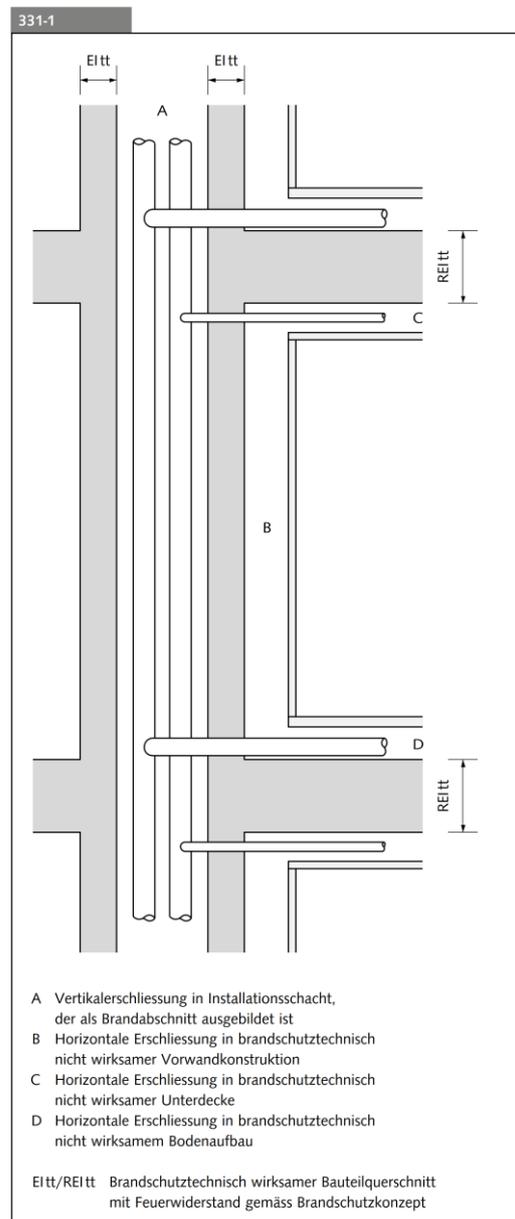


Abbildung 3: Horizontale Erschliessung in brandschutztechnisch nicht wirksamen Installationsebenen (Abbildung 331-1 gemäss [2])

3. Leitungsdurchführung durch brandabschnittsbildende Bauteile

3.1. Allgemeines

In brandabschnittsbildenden Bauteilen sind Durchbrüche und Leitungsdurchführungen feuerwiderstandsfähig zu verschliessen. Damit wird der Durchgang von Feuer, Wärme und Rauch begrenzt. Abbildung 4 enthält eine Übersicht über verschiedene Situationen von Leitungsdurchführungen durch brandabschnittsbildende Bauteile.

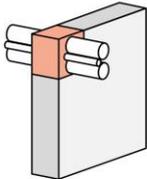
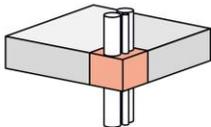
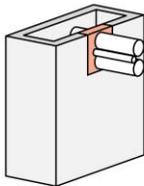
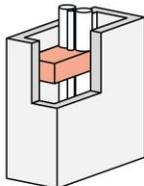
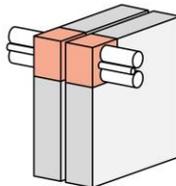
1020-1				
Wand	Decke	Installationsschacht		Brandmauer
				
Leitungsdurchführung durch brandabschnittsbildende Wand	Leitungsdurchführung durch brandabschnittsbildende Decke	Leitungsdurchführung durch brandabschnittsbildende Schachtwand (Leitungseintritt bzw. -austritt aus Installationsschacht)	Horizontale Schachtunterteilung eines Installationsschachtes (Kap. 3.2.3.3)	Leitungsdurchführung durch Brandmauer

Abbildung 4: Übersicht Leitungsdurchdringungen durch brandabschnittsbildende Bauteile (Abbildung 1020-1 gemäss [2])

3.2. Verschlüsse RF1 und Abschottungen

Zum Verschliessen beziehungsweise Abschotten von Leitungsdurchführungen durch brandabschnittsbildende Bauteile wird unterschieden zwischen:

- Feuerwiderstandsfähigen Verschlüssen RF1 (RF1 = kein Brandbeitrag)
- VKF-anerkannten Abschottungssystemen

Unter feuerwiderstandsfähigen Verschlüssen RF1 wird das dichte Verschliessen der Aussparungen aus Baustoffen RF1 verstanden. Folgende Möglichkeiten stehen gemäss VKF-Brandenschutzvorschriften zur Auswahl:

- Gips, Mörtel, Beton, Leichtbeton
- Mineralwolle, Schmelzpunkt ≥ 1000 °C, Rohdichte ≥ 40 kg/m³, Dicke ≥ 50 mm
- Andere Materialien im Einvernehmen mit der Brandschutzbehörde

Dem Schwindverhalten der Materialien sowie Bewegungen der Bauteile ist Rechnung zu tragen, zudem sind brennbare Rohrdämmungen bis auf wenige Ausnahmen zu unterbrechen.

Unter VKF-anerkannten Abschottungssystemen werden geprüfte Systeme verstanden, der Einbau hat gemäss den Vorgaben der jeweiligen Inhaber (Gesuchsteller) der VKF-Anerkennung, VKF-Technischen Auskunft oder Leistungserklärung zu erfolgen. Mögliche Beispiele von VKF-anerkannten Abschottungssystemen sind aus Abbildung 5 ersichtlich.

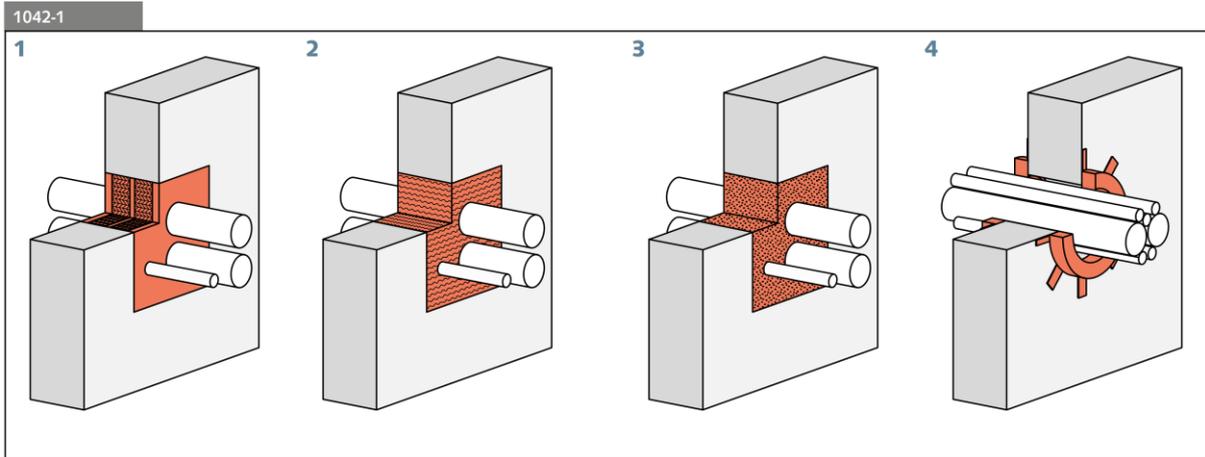


Abbildung 5: Beispiele für VKF-erkannte Abschottungssysteme (Abbildung 1042-1 gemäss [2]):

- 1) Weichschott (Mineralfaserschott, Plattenschott)
- 2) Schaumstoff, Brandschutzschaum, Brandschutzstein
- 3) Hartschott, Ausmörtelung
- 4) Brandschutzmanschette

VKF-erkannte Abschottungssysteme, welche in Normkonstruktionen der Massivbauweise (MBW) oder Leichtbauweise (LBW) geprüft wurden, können in Holzbauteile aus zusammengesetzten Querschnitten und aus Vollquerschnitten eingebaut werden, sofern gewisse Rahmenbedingungen und Konstruktionsdetails im Durchdringungsbereich eingehalten werden. VKF-erkannte Abschottungssysteme, welche in Holzbauteilen aus zusammengesetzten Querschnitten und Vollquerschnitten geprüft wurden, sind gemäss Herstellerangaben einzubauen. VKF-erkannte Abschottungssysteme, die in Holzbauteilen aus zusammengesetzten Querschnitten geprüft wurden, können ohne weitere Massnahmen in Holzbauteile aus Vollquerschnitten eingebaut werden. Abschottungssysteme, die in Holzbauteilen aus Vollquerschnitten geprüft wurden, können in Holzbauteile aus zusammengesetzten Querschnitten eingebaut werden, wenn gewisse Rahmenbedingungen im Durchdringungsbereich eingehalten sind.

Abbildung 6 gibt eine Übersicht für den Einbau von VKF-erkannten Abschottungssystemen in Holzbauteile und verweist auf die entsprechenden Kapitel in der Publikation mit Ausführungsbestimmungen. Bezüglich der Durchführung von Rohrdämmungen durch die Abschottungssysteme sind die Angaben der VKF-Anerkennung, VKF-Technischen Auskunft oder Leistungserklärung für das verwendete Abschottungssystem zu beachten.

1042-3		
Art des Abschottungssystems	Einbauart Bauteil	Ausführungsbestimmungen
Abschottungssystem in Massivbauweise (MBW) oder Leichtbauweise (LBW) geprüft	Bauteil aus zusammengesetzten Querschnitten	Bauteilbildung gemäss Kap. 10.5.2, Einbau Abschottungssystem gemäss Kap. 10.4.2
	Bauteil aus Vollquerschnitten	
Abschottungssystem in Holzbauweise aus zusammengesetzten Querschnitten geprüft	Bauteil aus zusammengesetzten Querschnitten	Bauteilbildung gemäss Herstellerangaben, Einbau Abschottungssystem gemäss Kap. 10.4.2
	Bauteil aus Vollquerschnitten	Bauteilbildung ohne weitere Massnahmen, Einbau Abschottungssystem gemäss Kap. 10.4.2
Abschottungssystem in Holzbauweise aus Vollquerschnitten geprüft	Bauteil aus zusammengesetzten Querschnitten	Bauteilbildung gemäss Kap. 10.5.3, Einbau Abschottungssystem gemäss Kap. 10.4.2
	Bauteil aus Vollquerschnitten	Bauteilbildung gemäss Herstellerangaben, Einbau Abschottungssystem gemäss Kap. 10.4.2

Abbildung 6: Übersicht für den Einbau von Abschottungssystemen (Abbildung 1042-3 gemäss [2])

3.3. Ausbildung der Bauteile im Durchdringungsbereich

Sowohl für Verschlüsse RF1 als auch die verschiedenen Situationen von VKF-anerkannten Abschottungssystemen gemäss Abbildung 6 sind detaillierte Angaben für die Ausbildung der Bauteile im Durchdringungsbereich zu finden.

Nachfolgend werden mögliche Lösungsansätze für den Einbau eines VKF-anerkannten Abschottungssystems dargestellt, welches in Normkonstruktionen der Massivbauweise (MBW) oder Leichtbauweise (LBW) geprüft wurde.

Die Bauteilleibungen sind mit einer Brandschutzplatte mit 30 Minuten Feuerwiderstand aus Baustoffen der RF1 (BSP 30-RF1, z.B. Gipsfaserplatte 15 mm) auszukleiden. Durchgehende Fugen ohne Versatz sind zu meiden. Bei Bauteilen mit Beplankungen/Bekleidungen aus Baustoffen der RF1 kann der erforderliche Versatz wie in Abbildung 7, Bild 1 dargestellt ausgebildet werden. Bei Bauteilen mit brennbarer Oberfläche wird der Versatz durch das Anbringen eines mindestens 50 mm breiten Kragens um die Bauteilleibung aus einer Brandschutzplatte mit 30 Minuten Feuerwiderstand aus Baustoffen der RF1 (BSP 30-RF1) hergestellt (Abbildung 7, Bild 2). Auf den Kragen kann verzichtet werden, wenn die Beplankungen/Bekleidungen bestimmten Mindestdicken genügen (Abbildung 7, Bild 3).

In Konstruktionen aus zusammengesetzten Querschnitten (beplankten Wänden, Balkendecken, Kasten- und Rippendecken) sind die Durchbrüche zur Stabilisierung mit umlaufenden Füllhölzern zu umrahmen. Die Befestigung der Leibungsauskleidung an das umlaufende Füllholz beziehungsweise an das Bauteil selbst sowie die Befestigung der flächigen Beplankung/Bekleidung erfolgen gemäss Herstellerangaben, jedoch mit einem maximalen Verbindungsmittelabstand von 100 mm. Die Herstellerangaben zu den Zwischen- und Randabständen sind zusätzlich zu beachten.

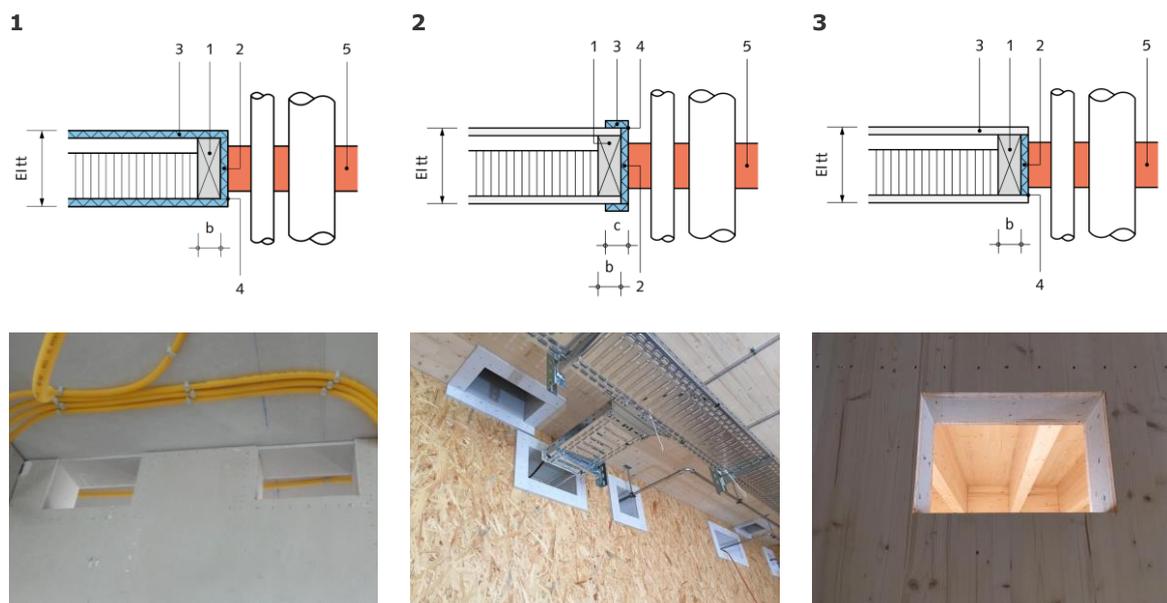


Abbildung 7: Möglichkeiten für die Ausbildung der Bauteilleibung für den Einbau eines VKF-anerkannten Abschottungssystems (Auszug aus Abbildungen 1052-1, 1052-2 und 1052-3 gemäss [2]):

- 1) Beplankungen/Bekleidungen aus Baustoffen der RF1
- 2) Beplankungen/Bekleidungen brennbar, Variante Kragen
- 3) Beplankungen/Bekleidungen brennbar, Variante ohne Kragen

Für die Durchführung von einzelnen Leitungen oder gebündelten Leitungen mit einer Ausschnittgrösse bis maximal 70 mm gelten vereinfachte Ausführungsbestimmungen (z.B. Verzicht auf umlaufendes Füllholz mit Auskleidung der Bauteilleibung). Für detaillierte Angaben wird an dieser Stelle auf die Publikation verwiesen.

4. Befestigungen für Anlagen mit Feuerwiderstand/ Funktionserhalt

4.1. Allgemeines

Gebäudetechnische Anlagen mit Feuerwiderstand und/oder Funktionserhalt müssen die an sie gestellten Anforderungen während einer definierten Zeitdauer unter bestimmten Bedingungen gewährleisten. Mögliche Beispiele sind Kabelanlagen mit Funktionserhalt, Lüftungskanäle mit Feuerwiderstand, Kanäle von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen mit Feuerwiderstand und Funktionserhalt.

Die jeweiligen Leistungskriterien sind den VKF-Brandschutzvorschriften [1], dem Stand der Technik oder dem Brandschutzkonzept zu entnehmen.

Bezogen auf die Schnittstelle zwischen Bauteilen in Holz und gebäudetechnischen Anlagen können folgende Gruppen unterschieden werden:

- Ungeschützte Befestigungen (Kap. 4.3):
 - Schraubenverbindungen mit Beanspruchung in Schaftrichtung
 - Schraubenverbindungen mit Beanspruchung rechtwinklig zur Schaftrichtung
 - Schraubenverbindungen mit kombinierter Beanspruchung
- Geschützte Befestigungen (Kap. 4.4)
- Befestigungen mit Holzkonstruktionen (Kap. 4.5)

4.2. Ausführungsbestimmungen

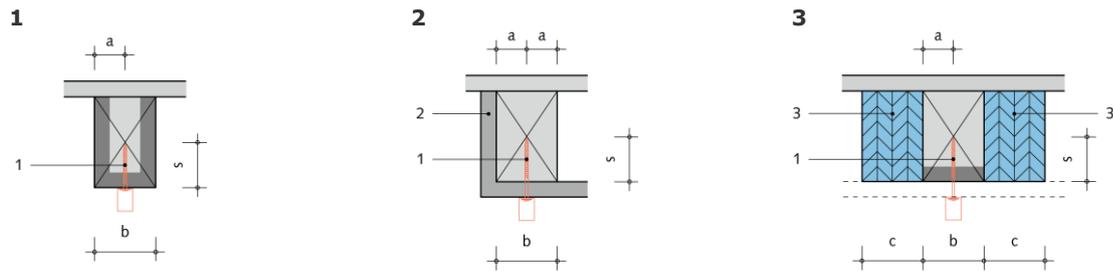
Holzbauteile, an denen gebäudetechnische Anlagen mit Feuerwiderstand und/oder Funktionserhalt befestigt werden, müssen die zu erwartenden Einwirkungen aufnehmen können.

Für gebäudetechnische Anlagen mit Feuerwiderstand und/oder Funktionserhalt müssen für die Anwendung zulässige Brandschutzprodukte verwendet werden. Üblicherweise werden die Brandschutzprodukte in Verbindung mit einer Normtragkonstruktion in Massivbauweise (MBW) oder Leichtbauweise (LBW) geprüft, können aber unter Einhaltung der Rahmenbedingungen gemäss den nachfolgenden Kapiteln auch bei Bauteilen in Holz verwendet werden.

4.3. Ungeschützte Befestigungen

Bei ungeschützten Befestigungen wird unterschieden zwischen Schraubenverbindungen mit einer Beanspruchung auf Zug, auf Druck oder rechtwinklig zur Schaftrichtung. Dabei werden einerseits geometrische Bedingungen an die Befestigung definiert (z.B. Randabstände, Überdeckungen, Erfordernis Grundplatte) und andererseits Bemessungswerte pro Verbindungsmittel für eine Brandbeanspruchung von 30, 60 und 90 Minuten Feuerwiderstand aufgeführt. Auch ist ein Nachweis für eine kombinierte Beanspruchung in und rechtwinklig zur Schaftrichtung möglich.

Abbildung 8 zeigt die Systematik der geometrischen Bedingungen von ungeschützten Befestigungen für ungeschützte und geschützte Holzbauteile am Beispiel einer Beanspruchung auf Zug. Zudem sind zwei Bilder von ungeschützten Befestigungen (Kabelanlage und Sammelhalterung mit Funktionserhalt) an einem ungeschützten Holzbauteil aufgeführt.



Bildquelle: OBO Bettermann, www.obo.de



Bildquelle: OBO Bettermann, www.obo.de

Abbildung 8: Geometrische Bedingungen von ungeschützten Verbindungen bei Beanspruchung auf Zug (Auszug aus Abbildung 1141-1 gemäss [2]):

- 1) Ungeschützte Holzbauteile
- 2) Geschützte Holzbauteile, Schutz durch Bekleidung
- 3) Geschützte Holzbauteile, Schutz durch Mineralwolle

4.4. Geschützte Befestigungen

Der Feuerwiderstand/Funktionserhalt der Befestigung wird durch feuerwiderstandsfähige Bekleidungen an der gebäudetechnischen Anlage sichergestellt (z. B. durch eine brandschutzwirksame Dämmung einer Lüftungsleitung). Für die Befestigung an Bauteile in Holz gelten aufgrund der geschützten Verbindungsmittel reduzierte Anforderungen gegenüber ungeschützten Verbindungen (Abbildung 9).

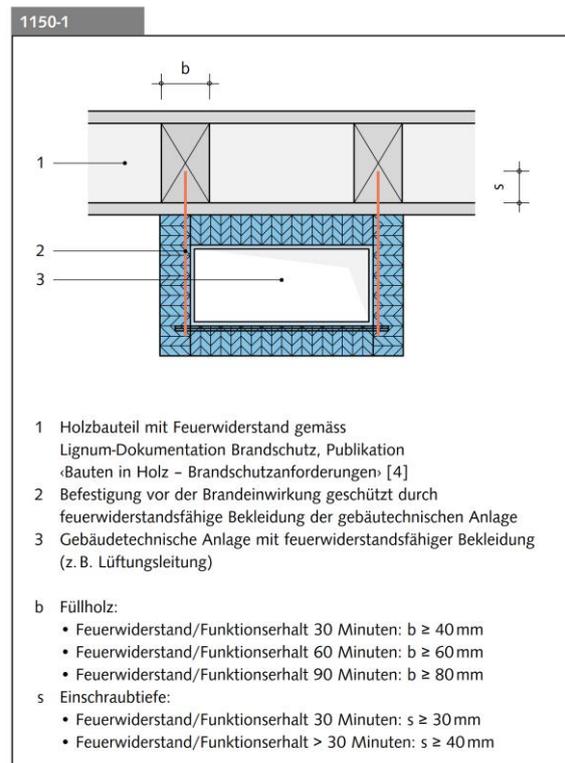


Abbildung 9: Geschützte Befestigungen (Abbildung 1150-1 gemäss [2])

4.5. Befestigungen mit Holzkonstruktionen

Der erforderliche Feuerwiderstand/Funktionserhalt wird mit einer Holzkonstruktion sichergestellt, auf welcher die gebäudetechnische Anlage aufgelegt wird (Abbildung 10). Die Holzkonstruktion ist mindestens mit dem gleichen Feuerwiderstand wie die Anforderungen an den Feuerwiderstand/Funktionserhalt der gebäudetechnischen Anlage auszubilden.

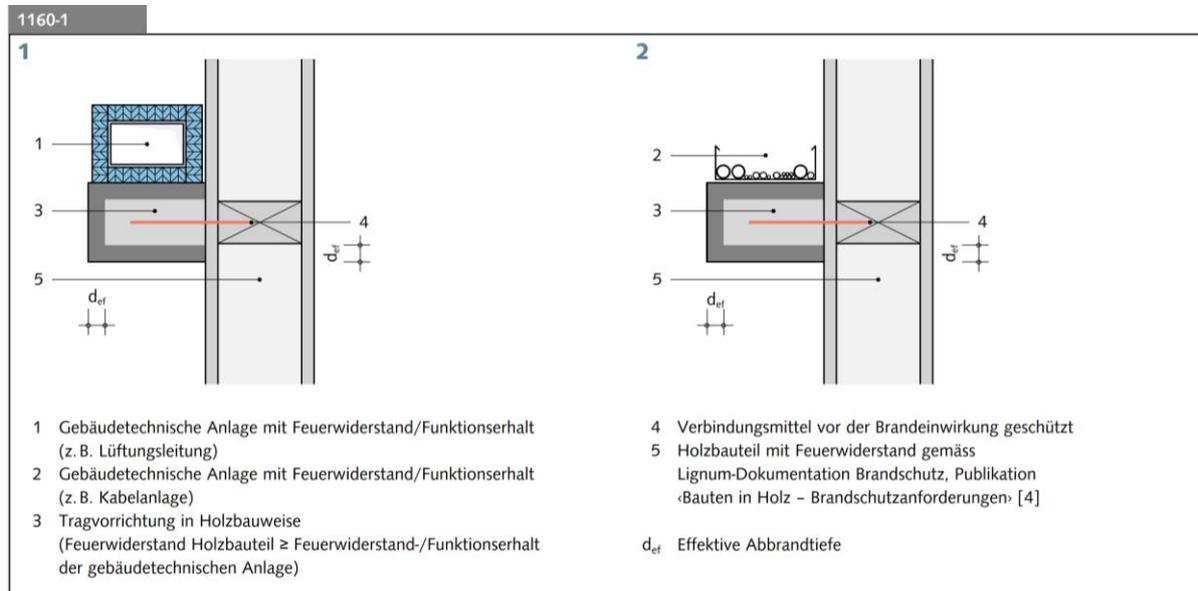


Abbildung 10: Befestigungen mit Holzkonstruktionen (Abbildung 1160-1 gemäss [2]):

- 1) Lüftungsleitung
- 2) Kabelanlage

5. Schlusswort

Mit der Lignum-Dokumentation Brandschutz liegt ein ganzheitliches System vor, mit welchem sich Holzbauten brandsicher planen und ausführen lassen. Für die Planung und Ausführung von gebäudetechnischen Anlagen dient als Grundlage die Publikation Haustechnik – Installationen und Abschottungen [2]. Für die unterschiedlichsten Gewerkspezifischen Themenbereiche der Haustechnik sind darin Antworten zur Schnittstelle zwischen den gebäudetechnischen Anlagen und dem Holzbau zu finden.

In der Anwendung einfache und standardisierte Lösungsansätze ermöglichen die Integration von im Massivbau oder Leichtbau geprüften Systemen auch im Holzbau. Damit stehen für den Holzbau eine Vielzahl an Systemen zur Verfügung, welche für die Umsetzung der aktuellen wie auch künftigen Gebäudetypologien und -nutzungen im fortschreitenden Holzbau von hoher Wichtigkeit sind.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Schweizerische VKF-Brandschutzvorschriften, 2015, Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen VKF, Bern
Online: www.bsvonline.ch
- [2] Lignum-Dokumentation Brandschutz, 6.1 Haustechnik – Installationen und Abschottungen, 2020, Lignum, Zürich

Die neue Generation der Eurocodes – Entwicklungen bei EN 1995-1-2

Prof. Dr. Andrea Frangi
ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion
Zürich, Schweiz



Dr. Joachim Schmid
IGNIS Fire-Design-Consulting, Zürich & ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion
Zürich, Schweiz



Dr. Norman Werther
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München
München, Deutschland



Die neue Generation der Eurocodes – Entwicklungen bei EN 1995-1-2

1. Einführung

Der Eurocode 5 (EC 5) bzw. die Bemessungsnormen EN 1995 – «Bemessung und Konstruktion von Holzbauten» wurden 2004 in Europa eingeführt. Ziel war es, die unterschiedlichen oder gar fehlenden Richtlinien für die Bemessung von Holzbauten in den Mitgliedsstaaten des Europäischen Normungskomitees (CEN) durch ein gemeinsames technisches Regelwerk mit vergleichbarem Sicherheitskonzept zu ersetzen und so damit beizutragen Barrieren innerhalb Europas weiter abzubauen.

Um die Anwendbarkeit über den Lauf der Zeit zu gewährleisten und damit die stetigen technischen Entwicklungen und Erkenntnisgewinne abzubilden, erteilte die Europäische Kommission 2012 das Mandat zur Überarbeitung und damit zur Erarbeitung für eine zweite Generation dieser Normenreihe. Neben der Aktualisierung der technischen Inhalte sollte im Prozess der Überarbeitung vor allem der «ease of use», also die Praxistauglichkeit und die Anwenderfreundlichkeit als eines der wesentlichen Kernziele für die zweite Generation der Normenreihe verfolgt werden. Ab dem Jahr 2025 werden so nach umfassender Überarbeitung der gesamten Eurocode 5 Reihe neue Versionen erhältlich sein.

Gemeinsam mit den Bemessungsregeln zum Nachweis der Standsicherheit von Holzbaukonstruktionen unter Normaltemperatur (EN 1995-1-1) entstehen mit der EN 1995-1-2 neue begleitende Regeln zum Nachweis von Holzbaukonstruktionen für den Brandfall. Die Erarbeitung der neuen EN 1995-1-2 wurde im Auftrag des Europäischen Normungskomitees (CEN) von einem Projektteam (PT) durchgeführt, das aus den folgenden Personen bestand: Andrea Frangi (ETH Zürich), Jouni Hakkarainen (Eurofins Expert Services, Helsinki), Alar Just (TalTech University, Tallinn), Joachim Schmid (ETH Zürich & IGNIS Fire-Design-Consulting, Zürich), Norman Werther (TU München). Grundlage dieser Überarbeitung bilden die in den letzten Jahren auf nationaler und internationaler Ebenen entstandenen Forschungsberichte, prüftechnische Erkenntnisse und zugehörige Veröffentlichungen, die den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf das brandschutztechnische Verhalten und die Brandschutzbemessung von Holzbauwerken abbilden. Hierzu zählen unter anderem die European Technical Guideline «Fire Safety in Timber Buildings» [3] oder die Berichte die aus der COST Action FP1404 «Fire Safe Use of Bio-Based Building Products» resultieren [4-6].

2. Struktur der neuen EN 1995-1-2

Tabelle 1 gibt einen Überblick zum Aufbau des Normenentwurfes und einen Vergleich zur aktuell gültigen EN 1995-1-2:2004. Im Vergleich zwischen der aktuellen EN 1995-1-2 [1] und dem vorliegenden Normenentwurf [2] wird deutlich, dass im neuen Dokument der Fokus darauf liegt, die ganzheitliche brandschutztechnische Bemessung von Holzbaukonstruktionen durch die Regelungen des Hauptteils abzudecken, ohne dabei wie in EN 1995-1-2:2004 den Regelungen des Anhangs zu bedürfen.

Gleichwohl führte eine Abstimmung mit der «Horizontal Fire Group» dazu, dass nun zwischen den materialspezifischen Eurocodes (EN 199x-1-2) in der Brandschutzbemessung eine gleiche harmonisierte Struktur im Aufbau vorliegt, was der Anwenderfreundlichkeit beiträgt. Hierbei wurde das bereits in anderen Eurocodes bekannte Prinzip einer dreistufigen Möglichkeit von Nachweisebenen mit unterschiedlicher Komplexität und Genauigkeit auch für den Holzbau vollständig etabliert. Somit werden zukünftig

- tabellierte Nachweise (Kapitel 6),
- vereinfachte Bemessungsmodelle (Kapitel 7) und
- die Grundlagen für erweiterte numerische Bemessungsmodelle (Kapitel 8)

parallel und gleichwertig zur Verfügung gestellt.

Neben den bereits in der aktuellen EN 1995-1-2 bekannten Prinzipien zu vereinfachten (Hand)-Bemessungsmodellen und den Grundlagen für numerische Simulationsmodelle, wird mit dem **Kapitel 6** in der neuen EN 1995-1-2 erstmals durch die Listung nachgewiesener Konstruktionsaufbauten oder vordefinierter Kennwerte (wie zur Schutzwirkung (t_{prot}) von Bekleidungen oder für die vom Aufbau des Querschnitts abhängige Kompensationsschicht ($d_{0,\text{ef}}$) bei Brettsperrholz) dem Anwender eine sehr einfache und effiziente Möglichkeit zum Nachweis des Feuerwiderstandes gegeben. In Deutschland oder der Schweiz sind solche Ansätze bisher aus den tabellierten Nachweisen der DIN 4102-4 oder den Lignum Dokumentationen bekannt. Trotz des gestiegenen Umfangs an Regelungen und der Erweiterung des Anwendungsbereiches soll durch die so angepasste Struktur weiterhin eine einfache Anwendung ermöglicht werden.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Inhalte und Aufbau zwischen der aktuellen EN 1995-1-2 [1] und dem vorliegenden Normenentwurf [2]

EN 1995-1-2:2004 [1]		EN 1995-1-2:2025 Entwurf [2]	
1	Allgemeines	1	Allgemeines
-	-	2	Normative Verweise
-	-	3	Begriffe, Definitionen, Symbole
2	Grundlagen der Bemessung	4	Grundlagen der Bemessung
3	Materialeigenschaften	5	Materialeigenschaften
4	Bemessungsverfahren für mechanische Beanspruchbarkeit	6	Tabellierte Nachweise
5	Bemessungsverfahren für Wand- und Deckenkonstruktionen	7	Vereinfachte Bemessungsverfahren
-	-	8	Numerische Bemessungsverfahren
6	Verbindungen	9	Verbindungen
7	Konstruktive Ausführung	10	Konstruktive Ausführung und Detailierung
Anhang A Parametrische Brandbeanspruchung		Anhang A Naturbrandbemessung von Holzkonstruktionen	
Anhang B Allgemeine Berechnungsverfahren		Anhang B Beurteilung des Verhaltens der Klebefuge bei Brandeinwirkung	
Anhang C Tragende Deckenbalken und Wandstiele in vollgedämmten Konstruktionen		Anhang C Bestimmung der Abbrandrate von Holz und Holzwerkstoffen	
Anhang D Abbrand von Bauteilen in Wand- und Deckenkonstruktionen mit ungedämmten Hohlräumen		Anhang D Bestimmung der Schutzwirkung für Gefachdämmstoffe	
Anhang E Berechnung der raumabschließenden Funktion von Wand- und Deckenkonstruktionen		Anhang E Externe Brandeinwirkung durch Brände in Holzbauten	
Anhang F Anleitung für Benutzer dieses Teils des Eurocodes		Anhang F Bestimmung der Abfallzeiten von Bandschutzmaterialien	
-	-	Anhang G Bestimmung der Brandschutzwirkung von Schichten für die brandabschnittsbildende Funktion	
-	-	Anhang I Bemessungsmodell für Holz-Stegträger	
-	-	Anhang M Materialkennwerte	

3. Inhalt der neuen EN 1995-1-2

Mit der Überarbeitung der EN 1995-1-2 werden die produkttechnologischen Entwicklungen der letzten 20 Jahre nun auch in der Brandschutzbemessung im Holzbau aufgegriffen. Gleichzeitig wird dabei den aktuellen nationalstaatlichen Brandschutzanforderungen innerhalb Europas und ingenieurtechnischen Bedürfnissen im Hinblick auf das mehrgeschos- sige Bauen mit Holz bis und über die Hochhausgrenze hinaus Rechnung getragen. So werden die Bemessungsverfahren für Verbindungen als auch für den Raumabschluss von Holzbauelementen, die bisher auf 60 Minuten ausgelegt sind, zukünftig auf eine Anwendung für bis zu 120 Minuten Feuerwiderstand angepasst und erweitert. Zudem werden auf Basis zahlreicher Forschungsaktivitäten der letzten Jahre weiterführende Ansätze zur Naturbrandbemessung von Holzbauteilen bereitgestellt [6-8]. In diesem Gesamtkontext wurden Bemessungsregeln für Brettsperrholz, Holz-Beton-Verbundelemente und Holz- Stegträger berücksichtigt, aber auch inzwischen praxisrelevante Holzarten (wie z.B. Esche), Dämmstoffe (wie z.B. biogene Dämmstoffe) und Bekleidungen (wie z.B. Gipsfa- serplatten) mit in die Bemessungskonzepte aufgenommen.

Eine wesentliche Konkretisierung und Differenzierung erfolgt mit der zweiten Generation der EN 1995-1-2 bezüglich des Modells zur Beschreibung des Abbrandverhaltens (**Kapitel 5**). Der Grund hierfür ist einerseits die Notwendigkeit auch den Einfluss von Verklebungen auf das Abbrandverhalten erfassen zu können und andererseits anwendungsbezogen den Einfluss innerer und äußerer Parameter auf das Abbrandverhalten situationsspezifisch ab- zubilden. Hierzu werden verklebte Holzprodukte unterschieden, deren «bond line integrity maintained» und Produkte deren «bond line integrity» innerhalb der Brandeinwirkung als «not maintained», jeweils für anfänglich geschützte sowie ungeschützte Bauteile. Falls es zu einem Versagen der Klebefuge kommt und damit ein Versagen der «bond line integrity» eintritt, kann es zu einem Abfallen der verkohlenden und den Restquerschnitt schützenden Kohleschicht kommen. Zur Bewertung dieses Leistungsmerkmals der Verklebung wurde im **Anhang B** des EN 1995-1-2 Normentwurfs ein entsprechendes Bewertungsverfahren zur Einstufung des Verhaltens aufgenommen [9]. Innerhalb der Brandeinwirkung werden so fünf verschiedene Phasen des Abbrandes (Phase 0 – Phase 4) unterschieden, vgl. Ab- bildung 1 und Abbildung 2.

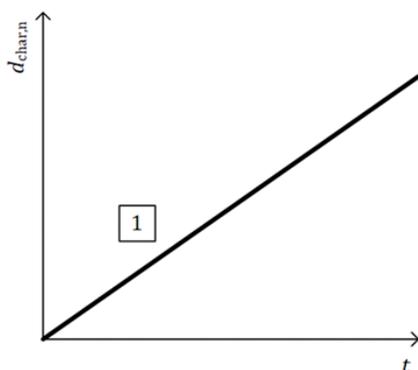


Abbildung 1: Phasen des Abbrandes für anfänglich ungeschützte Seiten von Holzbauteilen, wenn die Klebefuge keinen Einfluss auf das Abbrandverhalten hat

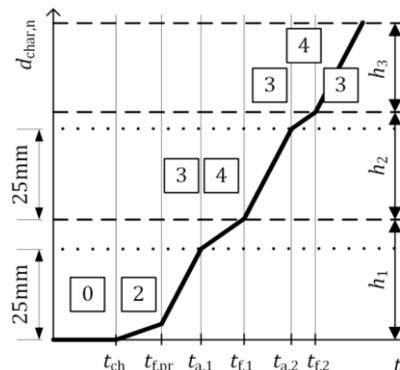


Abbildung 2: Phasen des Abbrandes für anfänglich geschützte Seiten von Holzbauteilen, wenn die Klebefuge einen Einfluss auf das Abbrandverhalten hat

mit

0	Encapsulated phase (Phase 0)
1	Normal charring phase (Phase 1)
2	Protected charring phase (Phase 2)
3	Post-protected charring phase (Phase 3)
4	Consolidated charring phase (Phase 4)
t_{ch}	Start time of charring
$t_{f,pr}$	Failure time of the fire protection system
h_i	Lamella thickness

Die Abbrandrate jeder Phase ergibt sich dabei unter der systematischen Berücksichtigung der spezifischen Rand- und Einbaubedingungen. So kann für das jeweils vorliegende Szenario über zugehörige Modifikationsfaktoren dem Einfluss von Fugen, der Faserorientierung, der Mehrseitigkeit der Brandeinwirkung, der Schutzwirkung von Bekleidungen oder auch z.B. der Vorerwärmung Rechnung getragen werden, vgl. Gleichung (1).

$$\beta_n = \prod k_i \cdot \beta_0 \quad (1)$$

β_n Bemessungswert der ideellen Abbrandrate innerhalb einer Phase [mm/min]

β_0 Basiswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung [mm/min]

$\prod k_i$ Produkt der zu berücksichtigenden Modifikationsfaktoren [-]

Da bezüglich der Anwendung der Abbrandrate in der aktuellen Norm auch Fehlinterpretationen auftraten, werden nun in der zweiten Generation der EN 1995-1-2 die Abbrandphasen und die Modifikationsfaktoren dem Anwender erstmals ganzheitlich in **Kapitel 5** gegeben. Hieraus wird auch ersichtlich, dass für anfänglich geschützte sowie auch für Produkte, bei denen ein Abfallen von verkohlten Brettlagen infolge des thermischen Versagens der Klebefuge auftritt, stufenförmige Phasen des Abbrandes auftreten, vgl. Abbildung 2.

Für anfänglich geschützte Bauteile erlaubt die zukünftige zweite Generation der EN 1995-1-2 nun auch normativ die Berücksichtigung der erhöhten Schutzfunktion bezüglich des Abfallens von Bekleidungen ($t_{f,pr}$) für Gipskartonplatten Typ A, F und Gipsfaserplatten im Hinblick auf einen daraus resultierenden reduzierten Abbrand in der «protected charring phase» (Phase 2). Im Vergleich zum heutigen Ansatz, der normativ nur die Schutzwirkung für den Beginn des Abbrandes (t_{ch}) für einige Bekleidungsmaterialien liefert, wird so eine deutliche Optimierung der Bemessung möglich. Ein zugehöriges Bestimmungsverfahren für beide Schutzfunktionen (t_{ch}) und ($t_{f,pr}$) liefert die EN 13381-7 [10].

Eine wesentliche Änderung in der Nachweisstruktur der neuen EN 1995-1-2 mit dem **Kapitel 7** ist die Streichung des Verfahrens der «Methode mit reduzierten Eigenschaften» und die damit verbundene Erweiterung der Bemessungsregeln für die «Methode mit reduziertem Querschnitt» (künftig umbenannt in «Methode mit effektivem Querschnitt»). Hierdurch wird für alle Holzbauteile einheitlich und vergleichbar mit den bisherigen Regelungen durch die Ermittlung des ideellen (effektiven) Restquerschnittes in Verbindung mit angepassten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften und einer reduzierten Einwirkung im Brandfall eine Bemessung in Anlehnung an die Regelungen bei Normaltemperatur ermöglicht.

Eine Anpassung im Hinblick auf die Bestimmung des ideellen (effektiven) Restquerschnittes erfuhr auch der Parameter d_0 (Tiefe der Schicht, bei der die Festigkeit und Steifigkeit zu Null angenommen wird, Kompensationsschicht), da hierbei bisher den unterschiedlichen beanspruchungsspezifischen thermischen Entfestigungen für Druck und Zug sowie dem Einfluss der Dauer der Brandbeanspruchung nicht vollständig Rechnung getragen wurde. Resultierend daraus enthält die zweite Generation der EN 1995-1-2 angepasste beanspruchungsabhängige d_0 Werte.

Die bisherigen Anhänge C (Tragende Deckenbalken und Wandstiele in vollgedämmten Konstruktionen) und D (Abbrand von Bauteilen in Wand- und Deckenkonstruktionen mit ungedämmten Hohlräumen) wurden umfassend überarbeitet und ins **Kapitel 7** integriert. Das neue Bemessungsmodell für Holztafelkonstruktionen mit gefüllten Gefachhohlräumen basiert nun auf der Methode mit effektivem Querschnitt und ermöglicht die Berücksichtigung der Schutzfunktion verschiedener Dämmstoffe (Mineralwolle, Zellulose, Holzfasern, usw.) auf den Abbrand der Holzrippen. Dieses Leistungsmerkmal der Dämmstoffe «Protection Level, PL» kann über den **Anhang D** des Normenentwurfs bestimmt werden. Innerhalb der Tragfähigkeitsbemessung für Wandstiele oder Deckenbalken werden in der Bestimmung des ideellen (effektiven) Restquerschnittes zugehörige d_0 Werte abhängig vom Protection Level des Dämmstoffs bereitgestellt.

Basierend auf zahlreichen Forschungsarbeiten [11-14] wurde der bisherige Anhang E (Berechnung der brandabschnittsbildenden Funktion von Wand- und Deckenkonstruktionen) überarbeitet und ins **Kapitel 7** eingebettet. Das so entstandene Verfahren der «Separation Function Method» erlaubt es die brandabschnittsbildende Funktion unter Normbrandbeanspruchung für aus einzelnen Schichten zusammengesetzte Holztafel- oder Massivholzelemente zu bestimmen bzw. die Schutzfunktion eines «fire protective systems» für Holzbauteile zu ermitteln. Innerhalb des Verfahrens werden wie bisher die verschiedenen Übertragungswege bei der Ermittlung der rechnerischen Wärmedämmung (Kriterium I) berücksichtigt, vgl. Abbildung 4. Das Raumabschlusskriterium E wird hierbei als erfüllt angenommen, wenn das Kriterium I und die konstruktiven Regeln gemäss Kapitel 10 eingehalten sind.

Dem Grundprinzip des bisherigen Ansatzes folgend, wird der schützende Beitrag der jeweiligen Schichten einer Konstruktion ermittelt und zur Gesamtschutzzeit (t_{ins}) des Bauteils aufaddiert, vgl. Abbildung 3 und Gleichung (2). Rechnerisch wird von einem Versagen der Einzelschicht bei einer Temperaturerhöhung von 250 K ($t_{prot,i}$) sowie von 140 K für die letzte Schicht auf der feuerabgewandten Seite ($t_{ins,n}$) ausgegangen.

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n} \quad (2)$$

t_{ins} Gesamtschutzzeit (Feuerwiderstand) des Bauteils [min]

$t_{prot,i}$ Schutzzeit einer Schicht i [min]

$t_{ins,n}$ Schutzzeit bezüglich der Wärmedämmwirkung der letzten Schicht n [min]

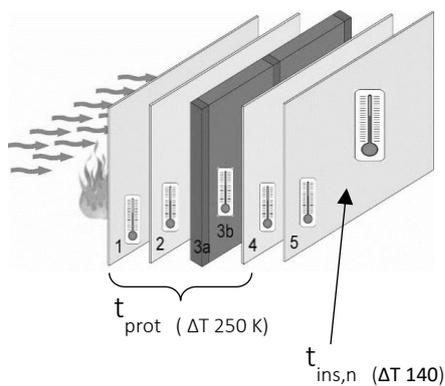
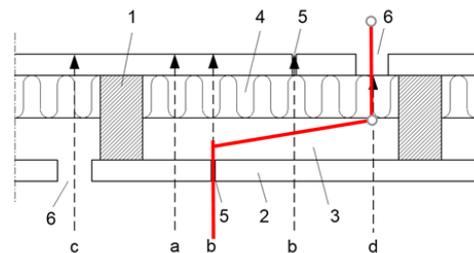


Abbildung 3: Systematik zur Ermittlung der Gesamtschutzzeit nach der «Separating Function Method»



- 1 Holzrippe
- 2 Bekleidung
- 3 Hohlraum
- 4 Gefachdämmung
- 5 Bekleidungsfuge
- 6 Einbauteile
- a-d Wärmeübertragungswege

Abbildung 4: Wärmeübertragungswege durch das Bauteil

Durch die spezifische Berücksichtigung des Einflusses von Schichten vor und hinter einer betrachteten Schicht mittels entsprechender Positionsbeiwerte, wodurch eine Vorerwärmung aber auch ein Wärmestau erfasst wird sowie die Berücksichtigung der erhöhten Schutzwirkung von Gipsplatten des Typs F oder von Gipsfaserplatten und die Erfassung der spezifischen Fugenausführungen wird der Anwendungsbereich gegenüber dem bisherigen Verfahren nach Anhang E massgeblich erweitert. Ebenso zur praktischen Akzeptanz und Vielseitigkeit der neuen EN 1995-1-2 trägt die Aufnahme neuer Materialien, wie Gipsfaserplatten, Lehmbauplatten, Holzwerkstoffen, Putzen, biogenen Dämmstoffen oder Estriichen bei. Weiterführend wurde das Bemessungsverfahren auf eine Anwendbarkeit von bis zu 120 Minuten Feuerwiderstand validiert und damit erweitert.

Mit der Notwendigkeit der Praxis auch brandschutztechnische Lösungen für besondere Ausführungen und Konstruktionsdetails anzubieten, die außerhalb der Anwendungsgrenzen von vereinfachten Nachweisverfahren liegen, wurde mit dem **Kapitel 8** die Grundlage für eine weiterführende numerische Betrachtung bei Holzbauten gelegt. Hierzu wurden neben effektiven thermischen Materialkennwerten für Nadelholz nun auch temperaturabhängige Kennwerte für Holzwerkstoffplatten, Gips- und Gipsfaserplatten sowie für Gefachdämmstoffe integriert. In Verbindung mit den temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften von Holz kann so eine thermische und mechanische Analyse von ETK (Einheits-Temperaturzeitkurve) brandbeanspruchten Holzkonstruktionen auf der Grundlage von Finite Elemente Analysen erfolgen.

Auf der Grundlage umfangreicher experimenteller und numerischer Analysen der letzten Jahre konnten mit dem **Kapitel 9** auch die bisher auf 60 Minuten begrenzten Bemessungsregeln für Verbindungen auf bis zu 120 Minuten Feuerwiderstand erweitert werden [15-17]. Besonders im Fokus stehen hier weiterhin Verbindungen mit auf Abscheren beanspruchte stiftförmige Verbindungsmittel in ungeschützter oder geschützter Ausführung. Hierfür stellt die zweite Generation der EN 1995-1-2 drei Nachweisebenen bereit.

- Nachweis des Feuerwiderstandes (maximal 20 Minuten im ungeschützten Zustand) auf Basis von Mindestanforderungen nach EN 1995-1-1, Auslastungsgrad und Mindestseitenholzdicke
- Nachweis des Feuerwiderstandes bis maximal 120 Minuten für Verbindungen mit maximal sechs Scherfugen auf Basis tabellierter Kennwerte unter Einhaltung geometrischer Randbedingungen, vgl. Tabelle 2
- Nachweis des Feuerwiderstandes auf Basis der «Exponential Reduction Method» bis maximal 120 Minuten, wodurch individuelle Verbindungsmitteldesigns nachweisbar bleiben.

Tabelle 2: Tabellierte Nachweise mit geometrischen Anforderungen für eine Stahl-Holz-Verbindung mit Stabdübeln und drei Schlitzblechen

Feuerwiderstand Zeit t_{fi}	$t_{1,fi}$			a_{fi}
	$\eta_{fi} \leq 0,1$	$\eta_{fi} \leq 0,2$	$\eta_{fi} \leq 0,3$	
30 min	≥ 25	≥ 35	≥ 40	≥ 15
60 min	≥ 50	≥ 60	≥ 65	≥ 50
90 min	≥ 75	≥ 85	≥ 100	≥ 90
120 min	≥ 100	≥ 110	≥ 115	≥ 130
Die Bemessung darf auch beim Ersatz von zwei Stabdübeln durch zwei Bolzen (Schrauben) erfolgen				

- $t_{1,fi}$ Seitenholzdicke [mm]
- η_{fi} Ausnutzungsfaktor ($E_{d,fi} / R_k$)
- a_{fi} Mass der End- und Randabstände für die Feuerwiderstandsdauer [mm]

Besonders über die tabellierten Nachweise wird eine schnelle und anwenderfreundliche Möglichkeit zum Nachweis entsprechender Standardverbindungen gegeben. Erweiternd dazu wurden ebenso die Nachweise für auf Herausziehen beanspruchte Verbindungsmittel optimiert, wodurch geringere Randabstände möglich werden. Ergänzend wurden ebenso Regelungen für typische zimmermannsmäßige Verbindungen aufgenommen, die auf Basis der Regelungen der Methode mit effektivem Querschnitt nachgewiesen werden können.

Mit der Erweiterung der konstruktiven Regelungen zur Detailausführung wird dem Aspekt einer ganzheitlichen brandschutztechnischen Planung und Ausführung Rechnung getragen. Hierzu wurde das **Kapitel 10** im Vergleich zu den bisherigen Inhalten massgeblich erweitert und in den zugehörigen bemessungsrelevanten Kapiteln hingewiesen, dass die konstruktiven Regelungen und Detailausführung immer zu beachten sind. Neben konstruktiven Massnahmen und Regelungen zur Befestigung von Bekleidungen oder Lagesicherungsmassnahmen für Dämmstoffe werden so erstmals Ausführungsregeln für Fugen und Anschlüsse, brandschutztechnische Trennungen von Elementen aber auch zur Integration haustechnischer Installationen gegeben. Pate für diese Lösungen standen vielfach die Erfahrungen aus der Schweiz, Österreich, Deutschland und Frankreich.

Für die Bemessung von Holzbauwerken auf Basis von zur Einheits-Temperaturzeitkurve abweichenden Bemessungsbränden wurden mit dem **Anhang A** Regelungen entwickelt, die der stetigen Interaktion zwischen Abbrand des Holzes und Wärmefreisetzung im Brandraum Rechnung tragen. Hierdurch kann neben dem Einfluss der mobilen Brandlast auch dem Beitrag von brandbeanspruchten Holzkonstruktionen an der Wärmefreisetzung Rechnung getragen werden. In zugehörigen iterativen Prozessen kann so die Abbrandtiefe und Tragfähigkeit entsprechender Holzkonstruktionen unter Naturbrand oder parametrischer Brandbeanspruchung bestimmt werden.

4. Ausblick

Auch wenn der Abschluss der Arbeit zur EN 1995-1-2 mit den Jahren 2025 noch weit entfernt scheint und zugehörige nationale Anwendungsdokumente wohl erst im Jahr 2027 zur Verfügung stehen werden, so sind die wesentlichen Änderungen bereits bekannt. Ersichtlich ist dabei, dass die zweite Generation der EN 1995-1-2 die Lücken der aktuellen EN 1995-1-2 schließt und vor allem neue Anwendungsbereiche ermöglicht und damit eine sichere und wirtschaftliche Bemessung von Holzbauwerken im Brandfall ermöglichen wird.

Klar wahrzunehmen ist ebenso, dass durch die notwendige Berücksichtigung neuer Produkte und die Erweiterung bekannter Bemessungsansätze der Umfang der Norm anwächst. Trotz dessen liegt ein zentraler Fokus darauf durch Neustrukturierung, Homogenisierungen und vereinfachte Regelungen die Anwenderfreundlichkeit beizubehalten und sogar zu erhöhen. Dennoch wird ähnlich wie bei der Umstellung auf die erste Generation der EN 1995-1-2 ein zusätzlicher Lern- und Ausbildungsprozess notwendig sein, deren Start bereits vor der finalen Erscheinung einsetzen wird.

5. Literatur

- [1] EN 1995-1-2: 2004 Eurocode 5 – Design of timber structures Part 1-2: Structural fire design.
- [2] EN 1995-1-2: 2025 Eurocode 5 – Design of timber structures Part 1-2: Structural fire design, Final draft for Informal Enquiry, September 5, 2021.
- [3] Östman B. et al.: Fire safety in timber buildings Technical Guideline for Europe. SP Technical research Institute of Sweden, Wood Technology. SP Report 2010:19. Stockholm, Sweden.
- [4] Just A., Schmid J. (eds): Improved fire design models for Timber Frame Assemblies – Guidance document, COST Action FP1404, Zürich, Switzerland, 2018.
- [5] Klippel, M, Just, A (eds): Guidance on Fire design of CLT including best practice, COST Action FP1404, Zürich, Switzerland, 2018.
- [6] Brandon, D., Kagiya K., Hakkarainen, T.: Performance based design for mass timber structures in fire – a design example, COST Action FP1404, Zürich, Switzerland, 2018.
- [7] Werther, N.: Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Technische Universität München, 11/2016.
- [8] Schmid J.: Structural Timber In Compartment Fires – The Timber Charring and Heat Storage Model, Open Eng. 2021; 11:435–452.
- [9] Klippel M., Schmid J., Fahrni R., Kleinhenz M., Frangi A.: Vorschlag einer Standardprüfmethode für Brettsperrholz im Brandfall, Bautechnik, 2019; 96(11): 824–831.
- [10] EN 13381-7:2019, Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 7: Applied protection to timber members, CEN, Brüssel.
- [11] Frangi A., Schleifer V., Fontana M.: Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies, Engineering Structures, 2010; 32: 1184–1195.
- [12] Winter S., Werther N., Hofmann V., Kammerer E., Rauch M.: Standardisierung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Holztafelkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen, Band F 3101. Fraunhofer IRB Verlag, 2019.
- [13] Mäger K.N., Just A., Schmid J., Werther N., Klippel M., Brandon D., Frangi A.: Procedure for implementing new materials to the component additive method. Fire Safety Journal, 2019, 107, pp. 149–160.
- [14] Rauch M., Werther N., Winter S.: Fire design method for timber floor elements – the contribution of screed floor toppings to the fire resistance, World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2021.
- [15] Audebert M., Dhima D., Bouchaïr A., Frangi A.: Review of experimental data for timber connections with dowel-type fasteners under standard fire exposure, Fire Safety Journal, 2019, 107, pp. 217–234.
- [16] Audebert M., Dhima, D., Bouchaïr A: Proposal for a new formula to predict the fire resistance of timber connections, Engineering Structures, 2020, 204, 110041.
- [17] Audebert M., Dhima D., Bouchaïr A., Pinoteau N.: Simplified Design Method for Fire Resistance of Timber Connections, Journal of Structural Engineering (United States), 2021, 147(12), 04021221.

BRAND

Best Practice: So wird es schon umgesetzt

Umsetzung von Brandschutzkonzepten bei Fertigung und Montage von Modulgebäuden

Urs Ickler
Timber Homes GmbH & Co. KG
Dorfen, Deutschland



Umsetzung von Brandschutzkonzepten bei Fertigung und Montage von Modulgebäuden

1. Einleitung / Ausgangslage

Bei der letzten Fachtagung Bauphysik & Gebäudetechnik 2019 in Bad Wörishofen wurde unter dem Titel «Brandschutz im Holzbau – Konzept für ein Boardinghaus der Gebäudeklasse 5 in Brettsperrholz-Modulbauweise» das Brandschutzkonzept eines viergeschossigen Gebäudes mit den Außenmaßen 49 m x 20 m von Anton Pavic und Marinus Döpfer, Ingenieurbüro PHIplan, Grabenstädt (DE) vorgestellt.



Abbildung 1: Hotel und Boardinghaus Ansicht Nord-Ost

Durch die geplante Gebäudehöhe von mehr als 7 m sowie der Größe der Nutzungseinheiten von mehr als 400 m² handelt es sich um die Gebäudeklasse 5.

Das Boardinghaus soll zur Hälfte auch als Hotel genutzt werden. Im gesamten Haus sind 196 Gastbetten geplant, womit das Sonderbaukriterium erfüllt ist.

Zum Zeitpunkt der Planung des Boardinghauses in Dingolfing / Moosthenning, war die Produktionshalle der Fa. Timber Homes kurz vor Fertigstellung, um mit der Modulfertigung im Mai 2019 beginnen zu können.

Aus verschiedenen Gründen wurde ein Studentenwohnheim in Straubing, bestehend aus 123 Holzraummodulen und 2 Gemeinschaftsräumen, vorgezogen und während anschließend die Module für das Boardinghaus produziert wurden, fiel aufgrund der schwächelnden Hotellerie die Entscheidung, das Hotel und Boardinghaus erstmal auf Eis zu legen. Es musste also möglichst schnell eine alternative Nutzung der Wohnmodule gefunden werden und die Modulbauweise konnte ihre große Flexibilität unter Beweis stellen.

Nachdem im Sommer 2020 kurzfristig ein Akademie-Gebäude für die Hochschule für den öffentlichen Dienst, Fachbereich Sozialverwaltung (HföD) aus unseren neu entwickelten Gewerbemodulen in Dorfen gebaut wurde, lag es nahe, daneben auch gleich noch ein Wohngebäude für die Studenten aus den bereits produzierten und in Dorfen lagernden Hotelmodulen zu errichten.

Modulbau ist flexibel und somit nachhaltig.

2. Brandschutzkonzept

2.1. Brandschutzkonzept alt

Aufgrund der geplanten Gebäudehöhe von mehr als 7 m sowie der Größe der Nutzungseinheiten von mehr als 400 m² handelt es sich gem. Art. 2 Abs. 3 Satz 1 Nr. 5 BayBO um die Gebäudeklasse 5 und durch die Hotelnutzung mit 196 Gastbetten wird das Sonderbaukriterium nach Art. 2 Abs. 4 Nr. 8 BayBO erfüllt.

Gemäß den Vorgaben der BayBO sowie den geltenden Sonderbauverordnungen sind für Gebäude der GK 5 die tragenden und aussteifenden Bauteile feuerbeständig und aus nicht-brennbaren Baustoffen zu errichten.



Abbildung 2: Hotel und Boardinghaus Schnitt

2.2. Brandschutztechnische Abweichungen

Die Ausführung aus Holzwänden und -decken mit einer Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten ohne brandschutztechnische Bekleidung, sodass das Brettsperrholz innen sichtbar bleibt, kann vertreten werden, weil:

- Der Brandausbreitung innerhalb des Gebäudes durch die kleinzellige Unterteilung ausreichend entgegengewirkt wird.
- Jeder Raum mit automatischen Branderkennungselementen überwacht ist womit von einer frühzeitigen Brandbekämpfung ausgegangen werden kann.

Das Gebäude wird mit einer automatischen Brandmeldeanlage der Kategorie 1 «Voll-schutz» gem. DIN 14675 ausgestattet.

2.3. Brandschutzkonzept neu

Bei dem alternativen Bauvorhaben handelt es sich um die «Errichtung eines Gebäudes zum studentischen Wohnen» in Holzbauweise mit insgesamt drei oberirdischen Geschossen.

Das Gebäude ist auf dem Gewerbegebiet in Orlfing / Dorfen geplant und in Nord-Süd-Richtung orientiert. Die Ausdehnung beträgt in Nord-Süd-Richtung ca. 45,2 m, in Ost-West-Richtung ca. 20 m.

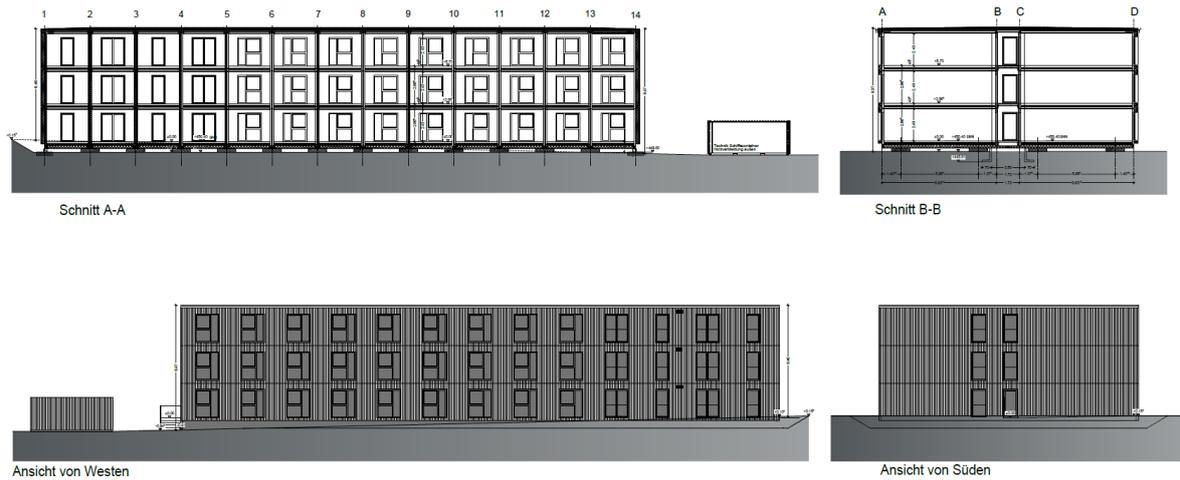


Abbildung 3: «Gebäude zum studentischen Wohnen» Schnitte und Ansichten

Die tragenden und aussteifenden Bauteile werden in Brettsperrholzbauweise ausgeführt. Im Erdgeschoss werden die Module auf Punktfundamenten abgelastet. Der notwendige Treppenraum wird ebenfalls aus Brettsperrholzmodulen errichtet.

Laut Bauantrag handelt es sich gem. Art. 2 Abs. 3 Satz 1 Nr. 3 BayBO um die Gebäudeklasse 3 (höchstgelegene Aufenthaltsräume in max. 7 m über der gemittelten Geländeoberfläche).

Tragende und aussteifende Bauteile:

- Tragende oder aussteifende Bauteile mind. feuerhemmend (F 30-B) in den oberirdischen Geschossen.

Trennwände zwischen Nutzungseinheiten/Teilbereichen:

- Feuerhemmende (F30-B) Trennwände zwischen den Wohneinheiten.

Geschoßtrennung:

- Mind. feuerhemmende (F30-B) Geschossdecken als Brettsperrholzdecken.
- Hohlraum zwischen Moduldecke und dem darüberliegenden Modul wird mit Holzweichfaser verfüllt.
- Leitungsdurchführungen werden geschoßweise abgeschottet. Kabelbündel oder mit geringem Abstand verlegte Leitungen werden mit Schottungen der Bauart «Wie F30» gesichert, wobei die Abweichung vom Verwendbarkeitsnachweis ausschließlich aus den brennbaren Umfassungsbauteilen (Holzkonstruktion) besteht.

2.4. Brandschutztechnische Abweichungen

Bzgl. des Verzichts auf eine feuerhemmende Revisionsöffnung zwischen Installationsbereich und notwendigem Flur entgegen Art. 34 Abs. 4 BayBO sowie Abschn. 3.5.2 LAR steht folgendes im Brandschutznachweis:

Die Ausführung als vollwandiges und dichtschießendes Türelement kann vertreten werden, weil:

- Die Revisionsöffnung zum Wohnraummodul vergleichbar mit der Wohnungseingangstür ist und somit bereits eine lediglich dichtschießende Türe dem Baurecht genügen würde.
- Mit dem vorgelagerten Bad und den dadurch geringen Brandlasten sowie mit einer Wandbekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen ein frühzeitiger Durchbrand in den notwendigen Flur nicht zu erwarten ist.



Abbildung 4: Revisionsöffnung zum Installationsschacht

Modulbau. Von der Theorie in die Praxis.

3. Fertigung

3.1. Bauteile in Holzbauweise

Alle Bauteile wie z.B. Außenwandelemente inkl. Fenster, fertige Badmodule oder Register werden mit einem möglichst hohen Vorfertigungsgrad zu Timber Homes geliefert und dort auf den verschiedenen Gewerke-Stationen montiert.

Als Modulwände werden bei Timber Homes entweder Brettspertholz oder die Holzmassivwand von Huber & Sohn verwendet.

Die patentierte und zertifizierte Huber Holzmassivwand besteht im Kern aus massiven Holzelementen mit beidseitigen Bepunktungen aus Fermacell Gipsfaserplatten. Die geprüften Hochfeuerhemmenden Bauteile können bis hin zur Brandwandersatzwand als Treppenhausumfassungswände oder Gebäudetrennwände verwendet werden.

Für das hier beschriebene Projekt wurden die tragenden BSP-Wände und Decken der Wohnraummodule mit einer Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten errichtet und von innen nicht brandschutztechnisch bekleidet, sodass das Brettspertholz innen sichtbar bleibt.

Die Oberfläche der Fassade besteht aus einer hölzernen Wechselfalzschalung, welche belüftet, jedoch nicht hinterlüftet ausgeführt wird.

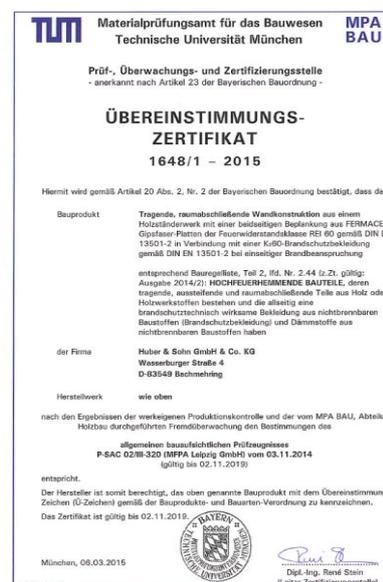


Abbildung 5: Ü-Zeichen HFH

3.2. Brandschutz-Schotts

Beim Studentenwohnheim ist keine Schachtlösung, sondern eine Schott-Lösung vorgesehen. D.h. die Abschottung findet geschossweise im Bereich der BSP-Bodenelemente statt. Die Durchdringungen vom Schacht in die Wohnungen müssen nicht abgeschottet werden. Die Lüftungskanäle verlaufen innerhalb einer Wohneinheit zur Außenwand.



Abbildung 7 a: BS-Hülse für ELT

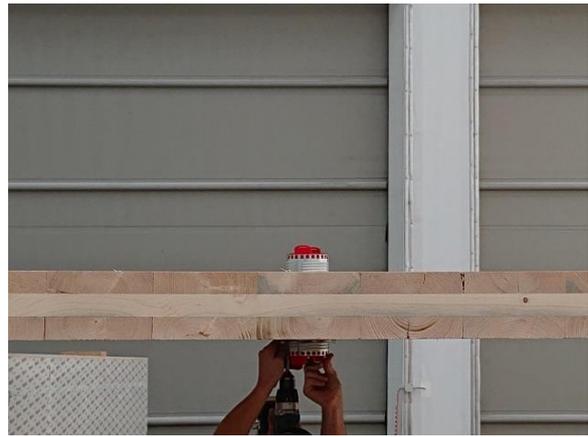


Abbildung 7 b: Einbau BS-Hülse



Abbildung 7 c: Einbau BS-Hülse

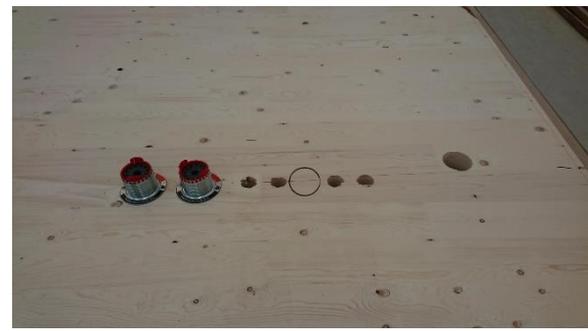


Abbildung 7 d: BS-Hülse + weitere Bohrungen

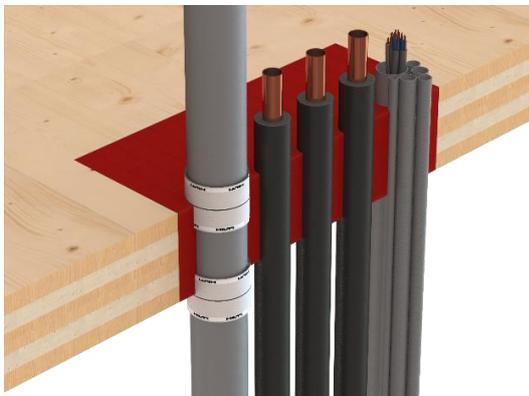


Abbildung 8 a: Kombischott mit BS-Steinen



Abbildung 8 b: Kombischott mit BS-Steinen im Gewerbemodul

Brandschutz-Klappen für Lüftungstechnische Anlagen waren bei den bisherigen Projekten nicht erforderlich, da dezentrale Lüftungsanlagen wohnungsweise eingebaut und installiert wurden.

Bei einem aktuellen Projekt (BMW Personalwohnhaus Ammerwald) mit einer zentralen Lüftungsanlage und über drei Geschosse laufende Lüftungsleitungen sollen mechanische Verschlusselemente und Kaltrauchklappen eingebaut werden.

Brandschutzkonzept *Personalwohnhaus Ammerwald Neubau* vom IBS – Technisches Büro GmbH, Linz AT:



Abbildung 9: BMW Personalwohnhaus Ammerwald Ansicht

Wesentliche Gebäudeparameter:

Oberirdische Geschossebenen	3
max. Fluchtniveau	< 7 m (angrenzendes Gelände)
max. äußere Abmessungen	24,69 m x 25,84 m
max. Höhe First	+ 12,08 m

Die Gebäude werden unter Berücksichtigung der baulichen Rahmenparameter der Gebäudeklasse GK 3 zugeordnet.

Das Gesamtobjekt wird in Holzbauweise und hochfeuerhemmender Bauweise (R 60, REI 60) ausgeführt.

Die Abschlüsse in brandabschnittsbildenden Bauteilen werden entweder selbstschließend ausgeführt oder mit Feststellanlagen gemäß der Technischen Richtlinie Vorbeugender Brandschutz (TRVB) 148 ausgerüstet, wodurch im Brandfall ein selbsttätiges Schließen gewährleistet wird.

Innerhalb der oberirdischen Geschosse erfolgt die Ausführung von Trennbauteilen (REI 60, EI 60) entsprechend den Vorgaben der OIB RL 2/2019 (Tab. 1b).

Lüftungstechnische Anlagen werden grundsätzlich gemäß ÖNORM M 7624 aus nicht brennbarem Material ausgeführt. Bei Durchführungen durch brandabschnittsbildende Bauteile kann unter Berücksichtigung der Gebäudenutzung der Einbau von Feuerschutzabschlüssen in Lüftungsleitungen auf Basis intumeszierender Materialien mit mechanischem Verschlusselement und Kaltrauchklappe (FLI VE; Johann Wernig KG, FIRE-VENT® Kaltrauchklappe KRKW) gemäß ÖNORM H 6027 (Leitungsquerschnitte max. 160 mm) erfolgen.



Abbildung 10: Kaltrauchklappe KRKW

3.3. Treppenhäuser

Für Treppenhäuser in Holzmodulbauweise gibt es für die Gebäudeklasse 3 und 4 entsprechende Lösungen.

Die notwendigen Treppen werden mit mind. feuerhemmenden tragenden Teilen als Massivholztreppe ausgeführt, in GK 4 mit einer nichtbrennbaren Bekleidung.

Nur für die GK 5 fehlen noch die baurechtlichen Möglichkeiten, die Treppenhäuser in Holzbauweise zu realisieren.

Für das Hotel- und Boardinghaus war ein Stahlbetonkern geplant, in welchem sich der notwendige Treppenraum sowie die Aufzugsanlagen befinden.

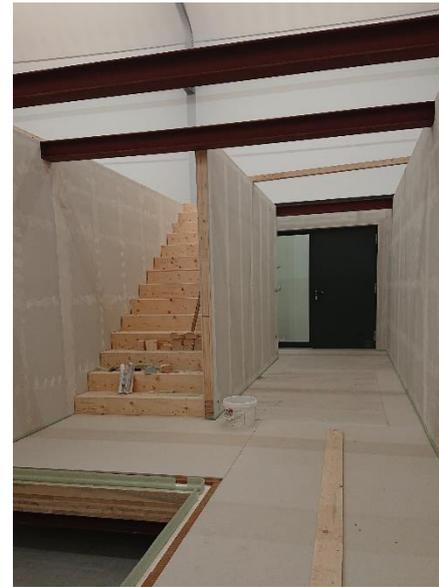


Abbildung 11: Treppenhausmodul

3.4. Aufzugschächte

Die Aufzugschächte werden aus Furnierschichtholz für bis zu drei Geschosse vorgefertigt und innen brandschutztechnisch bekleidet, z.B. mit Gipsfaserplatten.



Abbildung 12 a und b: Aufzugschächte über 2 und 3 Geschosse

Modulbau erfüllt die Brandschutz-Anforderungen.

4. Montage

Durch den hohe Vorfertigungsgrad der Module müssen nur noch an den Modulstößen die brandschutztechnisch wirksame Bekleidung ergänzt, ggfs. Hohlräume mit Steinwolle und Fugen mit BS-Acryl ausgefüllt werden.

So wird bei der Vertikalfuge der Module umlaufend ein ca. 20 cm breiter Streifen aus Steinwolle einseitig befestigt und gegen das nächste Modul gepresst.

Nach der Montage werden die Auflagerkonsolen für die Flurdecken-Elemente (Abbildung 13) und die Modulstöße brandschutztechnisch bekleidet (Abbildung 14). Bei den Wandelementen in den Treppenhäusern werden auch großformatige Keramikplatten als nichtbrennbare Oberflächen angesetzt.

Im Installationsschacht werden nach der Modulmontage die vertikalen Steigleitungen verbunden und die Brandschutzschotts geschlossen.



Abbildung 13: Auflagerkonsolen für Flurdecken-Elemente



Abbildung 15: Treppenhaus 5 Geschosse in Holzbauweise



Abbildung 14: Montage eines Treppenmoduls



Abbildung 16: Montage eines Gewerbemoduls

Modulbau ist schnell.

5. Modulbauweisen

Bei der Timber Homes GmbH werden dreidimensionale Holzmodule mit maximal möglicher Vorfertigung und Ausbaugrad angefertigt.

Die Raummodule werden in Planungsteams mit internen und externen Fachplanern, Architektinnen und Architekten entwickelt, Prototypen gebaut oder mit BIM konstruiert und anschließend in Serie produziert.

Grundsätzlich wird zwischen Wohn- und Gewerbemodulen unterschieden.

5.1. Wohnmodule

Aus den Wohnmodulen werden Wohngebäude mit Einzimmer-Wohnungen (aus einem Einraummodul ERM) und 2- bis 4-Zimmer-Wohnungen (aus zwei bis drei Mehrraummodulen MRM) realisiert.



Abbildung 17 a: ERM Wohnen mit Klappbett-Sofa



Abbildung 17 b: ERM Küche



Abbildung 18 a: MRM Küche



Abbildung 18 b: MRM Badmodul im Modul

5.2. Gewerbemodule

Die Gewerbemodule wurden 2020 in nur sechs Monaten entwickelt, produziert, montiert und rechtzeitig zum Studienbeginn im September an die Hochschule für den öffentlichen Dienst übergeben.

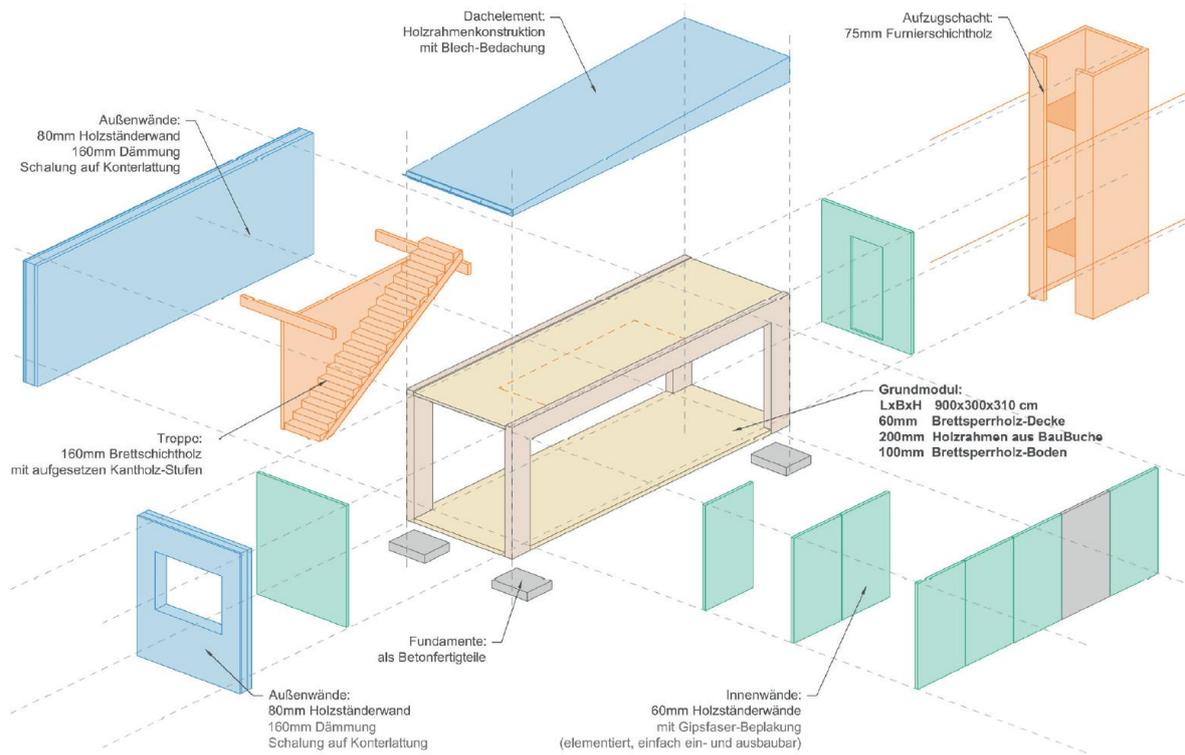


Abbildung 19: Konzept der flexibel ein- und ausbaubaren Ausstattungsmöglichkeiten der Gewerbemodule © Zeichnungen: SHORTLIST



Rahmen aus BauBuche



Unterrichtsraum



Zusammenfügen der Module



Südfassade

Abbildung 20: Gewerbemodule, Hochschule © Fotos: Andrea Mittermeier

Modulbau ist vielseitig.

6. Fazit und Ausblick

Anhand dieses Beispielprojektes aus der Praxis kann eindrücklich gezeigt werden, wie vielseitig, schnell, flexibel und damit auch nachhaltig die Holzmodulbauweise sein kann. Die bald vier Gebäude aus ca. 280 Modulen sind für eine temporäre Nutzung gedacht und werden nach ca. zehn Jahren demontiert und an anderer Stelle wieder aufgebaut.

Die mobile Immobilie.



Abbildung 21 und 22: Campus Hochschule und Studentenwohnheim



Abbildung 23 und 24: Feierabend auf dem Campus

Neben den durch die Holzbaurichtlinie schon längere Zeit geregelten Bauteilen in Holzbauweise gibt es inzwischen auch praxistaugliche geprüfte Brandschutzlösungen für die Gebäudetechnik im mehrgeschossigen Holzbau.

Die Modulbauweise ist prädestiniert für eine BIM-Planung, die es ermöglicht, Planung, Fertigung, Warenwirtschaft und mittelfristig das Facility-Management komplett digital umzusetzen.

Durch den massiven Bedarf an neuem Wohnraum, der kostengünstig und möglichst schnell realisiert werden soll und den Anstrengungen zur Einsparung von CO₂ im Gebäudesektor, sehen wir sehr großes Potential im Holzmodulbau.

Holzmodulbau ist die Zukunft.

7. Projektbeteiligte

Bauherr:	Robert Decker Immobilien GmbH, Dorfen
Architektur:	CUBUS Planungsgesellschaft mbH, Nicole Pumar, Dorfen
Brandschutz:	PHIplan, Anton Pavic, Grabenstätt
Statik:	IB Shortlist, Johanna Arnold, Wasserburg
HLS-Planung:	IB Dudek, Matthias Meixner, Gmund am Tegernsee
Holzbau, Montage:	Huber&Sohn GmbH, Michael Stengele, Bachmehring
Badmodule:	Bad Modul GmbH, Ried im Traunkreis, AT

Modulbau ist Teamwork.

8. Über die Timber Homes GmbH

Gegründet wurde die Firma Timber Homes GmbH & Co. KG Anfang 2019 von dem Dorfener Immobilienunternehmer und Bauträger Robert Decker und Josef Huber vom Holzbauunternehmen Huber & Sohn in Bachmehring.

Seit Mai 2019 werden auf dem 21 ha großen Areal der ehemaligen Ziegelei Meindl, Holzmodule gefertigt und Modulgebäude realisiert. Das Unternehmen hat sich zum Ziel gesetzt, Wohnraum, kommunale und Gewerbegebäude in ökologisch höchstem Standard maximal effizient und skalierbar zu produzieren. Dabei war unser Vorbild die Serienproduktion wie in der Automobilindustrie. Unsere Kunden sind kommunale Bauträger und private Investoren und Architekten, die Bauprojekte für viele Menschen in kürzester Bauzeit mit hohem Energiestandard umsetzen wollen.



Abbildung 25: Timber Campus Dorfen

Produktivitätssteigerung durch geprüfte Brandschutzlösungen für die Gebäudetechnik im Geschossbau

Henning Artmann
Hilti Deutschland AG
Kaufering, Deutschland



Produktivitätssteigerung durch geprüfte Brandschutzlösungen für die Gebäudetechnik im Geschossbau

1. Einleitung

Nach Jahrhunderten langer Nutzung erlebt Holz als Bauwerkstoff eine Renaissance. Eine Vielzahl an Vorteilen gegenüber mineralischen Baustoffen und Bauweisen, wie z.B. Nachhaltigkeit als nachwachsender Rohstoff, Energieeffizienz aufgrund guter Dämmwerte, hohe Formstabilität bei geringem Eigengewicht, kurze Montagezeiten oder trockene Bauweise, überzeugen Architekten, Bauherren und Planer.

Ob Holzrahmen-, Massivholz- oder Hybridkonstruktionen mit Stahlbeton: Um den Vorteilen des Holzbaus gerecht zu werden, muss eine vertiefte Planung erfolgen. Die Produktivitätsgewinne im Holzbau durch z.B. industrielle Vorfertigung von Bauelementen kommen nur dann zum Tragen, wenn Aspekte aus der Bauphysik ab Beginn der Planungsphase berücksichtigt werden.

Speziell das Thema Brandschutz im Holzbau erfordert eine rechtzeitige Planung unter Einbindung aller Projektbeteiligten.

2. Baurechtliche Grundlagen

2.1. Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise - M-HFHHolzR

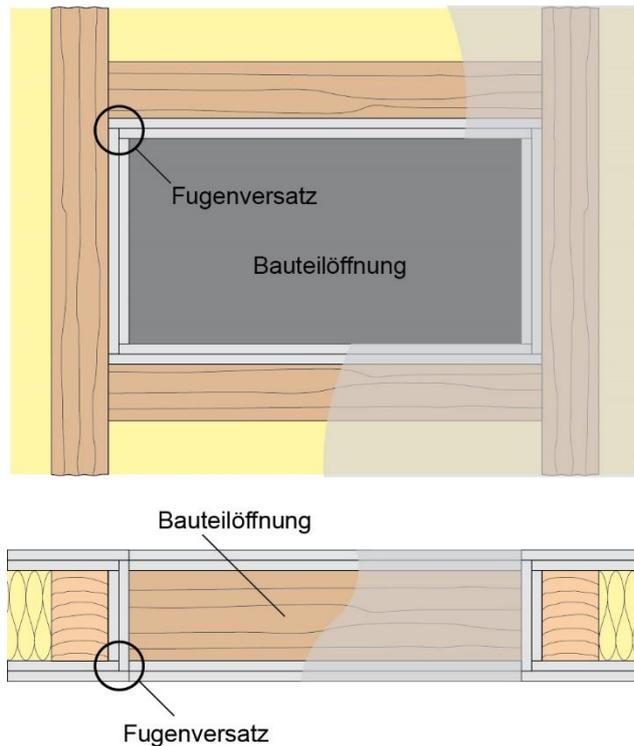
Die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise¹, kurz M-HFHHolzR von 2004 ist bundesweit in den deutschen Landesbauordnungen über die Musterverwaltungsvorschrift Technischer Baubestimmungen, kurz MVVTB-2017 /-2019 und -2020 implementiert. Die MVVTB verweist in A 2.2.1.4 auf M-HFHHolzR:2004-07.

Der Geltungsbereich der M-HFHHolzR beschränkt sich auf hochfeuerhemmende Bauteile, sprich die Gebäudeklasse 4 sowie Holzbauweisen, «die einen gewissen Grad der Vorfertigung haben wie Holztafel-, Holzrahmen- und Fachwerkbauweise». Die Holz-Massivbauweisen werden explizit ausgenommen.

Die M-HFHHolzR definiert brandschutztechnische Anforderungen, um Einleitung und Übertragung von Feuer und Rauch über Brandabschnitte hinweg zu unterbinden. Hierbei wird besondere Beachtung der Brandschutzbekleidung geschenkt. «Die Brandschutzbekleidung muss eine Entzündung der tragenden einschließlich der aussteifenden Bauteile aus Holz oder Holzwerkstoffen während eines Zeitraumes von mindestens 60 Minuten verhindern und als K₂60 nach DIN EN 13501-2² klassifiziert sein». «Die Brandschutzbekleidung muss allseitig und durchgängig aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Sie ist mit Fugenversatz, Stufenfalz oder Nut- und Federverbindungen auszubilden.» Dies ist beispielhaft für eine Holzbalkendecke in Abbildung 1 dargestellt.

¹ Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise – M-HFHHolzR, Fassung Juli 2004

² DIN EN 13501-2:2016-12 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen

Abbildung 1: Brandschutzbekleidung in K₂₆₀ Ausführung nach M-HFHolzR

2.2. Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise – M-HolzBauRL

Die M-HFHolzR³ von 2004 soll mittelfristig durch die Veröffentlichung der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise – M-HolzBauRL von 2021 erweitert und abgelöst werden. Am 17. Januar 2022 wurde die M-HolzBauRL in die Ausgabe 2021/1 der MVVTB aufgenommen und in Anhang A 2.2 aufgenommen. Dort spezifiziert sie die Ausführungsdetails zur Planung, Bemessung und Ausführung von hochfeuerhemmenden Bauteilen in Holzbauweise und feuerwiderstandsfähigen Bauteilen in Massivholzbauweise sowie Außenwandbekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen.

Mit Stand März 2022 ist damit ein bundesweiter Stand der Technik geschaffen. Baurechtlich implementiert ist die M-HolzBauRL in der Bayerischen Landesbauordnung.

Der Anwendungsbereich der Richtlinie erstreckt sich hierbei auf «Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5, deren tragende, aussteifende oder raumabschließende Bauteile hochfeuerhemmend oder feuerbeständig [...] sein müssen» und aus brennbaren Baustoffen bestehen. Der Anwendungsbereich erweitert sich auf «Holzbauweisen mit Hohlräumen [...] und in Holzbauweisen ohne Hohlräume bzw. ohne verfüllte Hohlräume [...], die eine durchgehend massive monolithische Konstruktion aufweisen (sog. Massivholzbauweise).» Damit ist nun eine Planung von Holzbauprojekten bis in die Gebäudeklasse 5 baurechtlich möglich.

Auch die M-HolzBauRL arbeitet die Details zur Brandschutzbekleidung aus und fordert eine zweilagige «Bekleidung der Dicke von 2 x 18 mm mit Gipsplatten des Typs GKF nach DIN 18180 in Verbindung mit DIN EN 520 bzw. Gipsfaserplatten mit einer Mindestrohddichte von 1000 kg/m³ nach europäisch technischer Bewertung». Auch die Verbindungsmittel und -abstände werden festgelegt. So zum Beispiel Schnellbauschrauben mit Leistungserklärung nach DIN EN 14566⁴, wie sie durch die Hilti Schnellbauschrauben S-DS 03 B M1 eingehalten werden.

³ Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise - M-HolzBauRL, Fassung Oktober 2020

⁴ DIN EN 14566:2009-10: Mechanische Befestigungsmittel für Gipsplattensysteme - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren

Ergänzend zu den Brandschutzbekleidungsdetails «sind je Raum der Nutzungseinheit entweder die Decke oder maximal 25% aller Wände, ausgenommen Trennwände, Wände anstelle von Brandwänden sowie Treppenraumwände, mit brennbaren Bauteiloberflächen zulässig». Damit ist eine Ausführung in Sichtholz im Deckenbereich möglich.

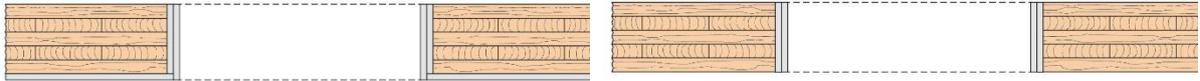


Abbildung 2: Ausführung einer Massivholzdecke mit Kapselung

Abbildung 3: Ausführung einer Massivholzdecke in Sichtholzqualität mit Bekleidung der Durchführungsöffnung

Für die Gebäudetechnik muss berücksichtigt werden, dass für «Rohr oder Kabelabschottungen [...] ein entsprechender bauaufsichtlicher Verwendbarkeits- bzw. Anwendbarkeitsnachweis vorliegen» muss. Somit ist beispielsweise eine Ausführung mit dem Hilti Brandschutzstein mit der Allgemeinen Bauartgenehmigung Z-19.53-2423 möglich.

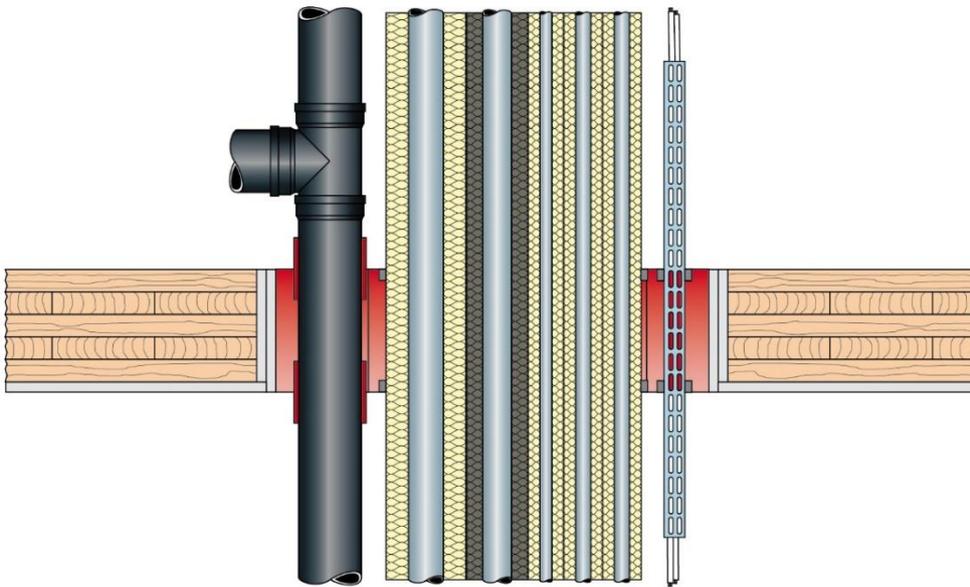
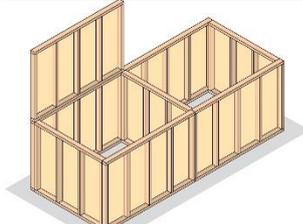
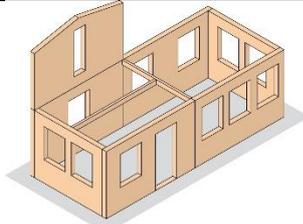


Abbildung 4: Darstellung einer Kombi-Abschottung gemäß Hilti Brandschutzstein CFS-BL P Z-19.53-2423 mit Auskleidung nach M-HolzBauRL

Baurechtlich kann der aktuelle baurechtliche Stand wie in Tabelle 1 dargestellt zusammengefasst werden.

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Feuerwiderstand und möglichen Holzbauweisen

	Feuerhemmend (30min)	Hochfeuerhemmend (60min)	Feuerbeständig (90min)
 Holzrahmenbauweise	M-HFHolzR zukünftig M-HolzBauRL		Baurechtlich nicht geregelt
 Holzmassivbauweise		Ausschließlich M-HolzBauRL	

3. Stand der Technik

Der Stand der Technik zeichnet sich durch eine Kapselung nach M-HolzBauRL aus sowie in den meisten Fällen einen Verschluss der Öffnung mit nicht-brennbarem, mineralischen Baustoffen wie Mörtel oder Beton. Der Stand der Technik bringt damit drei wesentliche Nachteile mit sich: arbeitsintensive Vorbereitung der Öffnung, signifikanter Platzverlust durch Kapselung sowie verarbeitungstechnische Nachteile von mineralischen Baustoffen. Damit steht der Stand der Technik im Widerspruch zur produktiven Holzbauweise.

3.1. Auskleidung mit nichtbrennbaren Gipskartonplatten

Die Auskleidung mit 2 x 18 mm nichtbrennbaren Gipsplatten bedarf einer sauberen Koordination und einer frühzeitigen Einplanung.

Für Kosten- und Termintreue im Bauvorhaben muss die Arbeit an das jeweilige Gewerk korrekt ausgeschrieben werden. Während Öffnungen in Wandelementen teilweise noch durch den Zimmerer ab Werk ausgekleidet werden, wird die Bekleidung von Öffnungen in Deckenelementen üblicherweise durch die Gewerke der Haustechnik ausgeführt.

Sobald eine eindeutige Ausschreibung und Gewerke Zuordnung vorliegen, müssen noch die erforderlichen Arbeitsschritte berücksichtigt werden. Im Abbund muss sichergestellt werden, dass die Öffnung ohne Radien ausgeführt wird, damit eine Bepunktung mit Plattenwerkstoffen rauchdicht ausgeführt werden kann. Ab Werk oder auf der Baustelle sind dann der Transport, der Plattenzuschnitt sowie die Befestigung zu beachten. Eine Abnahme der Ausführung sollte sichergestellt werden.

3.2. Platzbedarf für Kapselung

Der häufigste Fehler in Holzbauprojekten ist die fehlende Berechnung des erforderlichen Platzbedarfes für die Kapselung. Bei typischen Öffnungsgrößen für die Haustechnik kann die Kapselung einen erheblichen Anteil der Öffnung einnehmen und den konformen Einbau von Leitungen und Brandschutzprodukten maßgeblich erschweren. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei den meisten Brandschutzprodukten nur 60% des Öffnungsquerschnittes mit Leitungen belegt sein darf. Wird mit einem mineralischen Öffnungsverschluss gearbeitet ist der Platzbedarf für eine Halteleiste, z.B. 3cm Kantholz, zusätzlich einzuplanen.

Aus der klassischen Massivbauplanung kommend wird dieser Sachverhalt oft übersehen. In Tabelle 2 ist dargestellt wie gering die verbleibende Querschnittsfläche für Installationen und Haustechnik ist, sobald mit Kapselung und Halteleiste gearbeitet wird. Abbildung 5 illustriert die dazugehörige Anwendung.

Tabelle 2: Verbleibende Querschnittsfläche bei Kapselung und 3cm Halteleiste im Bezug auf die geplante Öffnungsgröße

Abmaße	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm
20cm	12%	19%	23%	25%	27%	28%	28%	29%	30%
30cm	19%	31%	38%	41%	44%	45%	47%	48%	49%
40cm	23%	38%	45%	49%	52%	54%	56%	57%	58%
50cm	25%	41%	49%	54%	57%	60%	61%	63%	64%
60cm	27%	44%	52%	57%	61%	63%	65%	67%	68%
70cm	28%	45%	54%	60%	63%	66%	68%	69%	70%
80cm	28%	47%	56%	61%	65%	68%	70%	71%	72%
90cm	29%	48%	57%	63%	67%	69%	71%	73%	74%
100cm	30%	49%	58%	64%	68%	70%	72%	74%	75%

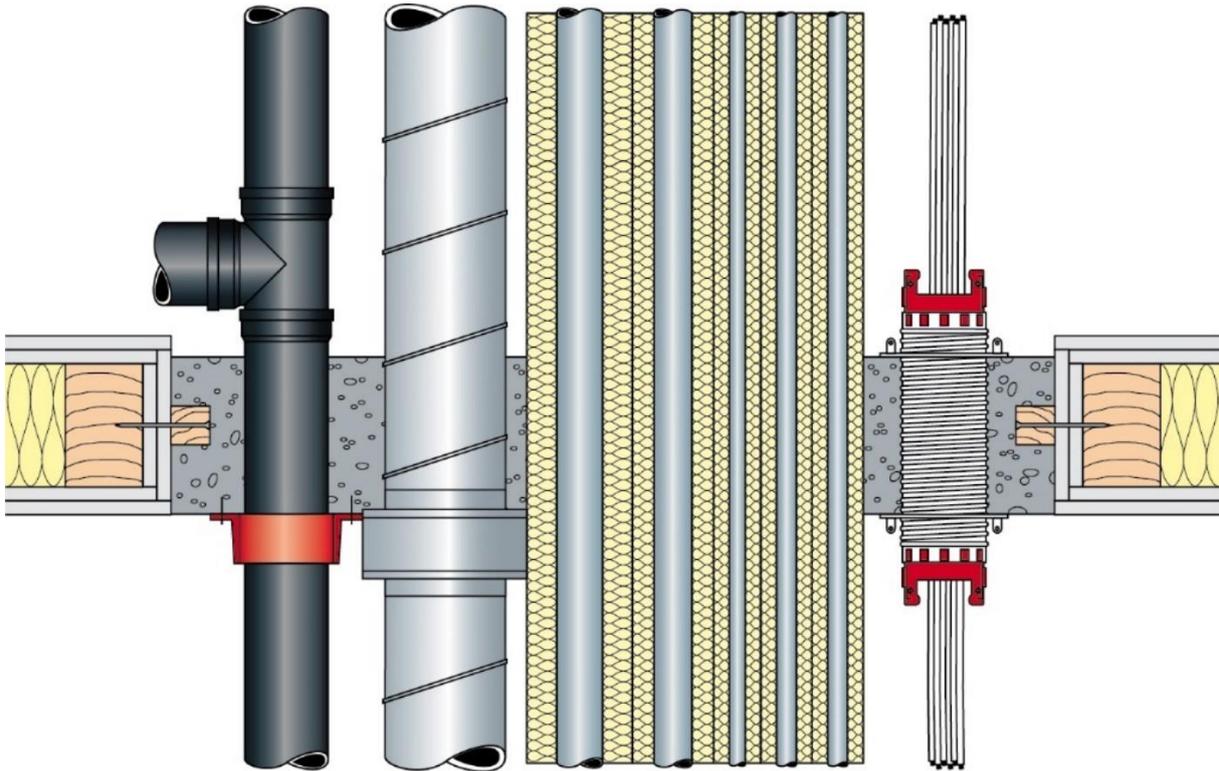


Abbildung 5: Darstellung einer Abschottung nach Stand der Technik mit Auskleidung, Halteleiste sowie mineralischem Verschluss

Kann aufgrund der Produktauswahl zumindest die Halteleiste entfallen wird deutlich mehr Platz gewonnen, lediglich die Auskleidung muss berücksichtigt werden. Mögliche Produkte sind hier trockene Brandschutzlösungen wie der Hilti Brandschutzstein CFS-BL P. Abbildung 6 stellt die Einbausituation mit dem Hilti Brandschutzstein CFS-BL P dar.

Tabelle 3: Verbleibende Querschnittsfläche bei Kapselung in Bezug auf die geplante Öffnungsgröße

Abmaße	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm
20cm	41%	49%	52%	55%	56%	57%	58%	59%	59%
30cm	49%	58%	62%	65%	67%	68%	69%	70%	71%
40cm	52%	62%	67%	70%	72%	74%	75%	75%	76%
50cm	55%	65%	70%	73%	75%	77%	78%	79%	79%
60cm	56%	67%	72%	75%	77%	79%	80%	81%	82%
70cm	57%	68%	74%	77%	79%	80%	82%	83%	83%
80cm	58%	69%	75%	78%	80%	82%	83%	84%	84%
90cm	59%	70%	75%	79%	81%	83%	84%	85%	85%
100cm	59%	71%	76%	79%	82%	83%	84%	85%	86%

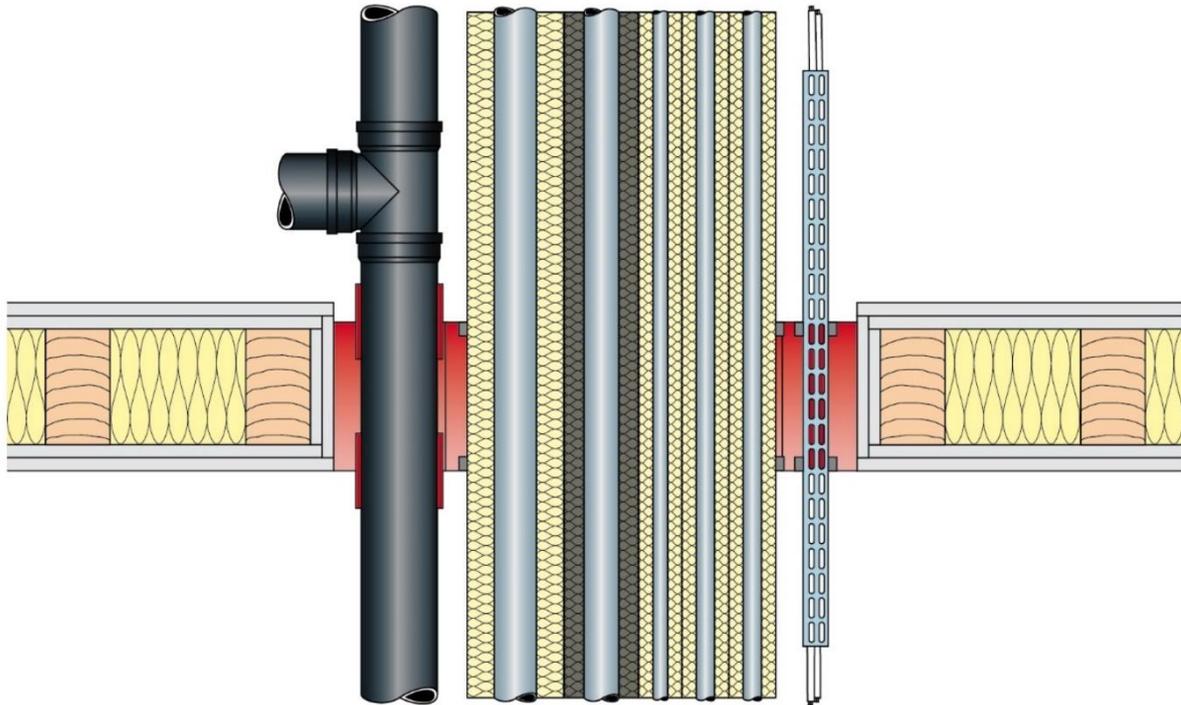


Abbildung 6: Darstellung einer Abschottung nach Stand der Technik mit Auskleidung und dem Hilti Brandschutzstein CFS-BL P

3.3. Verschluss mit mineralischen Baustoffen

Neben den oben aufgeführten Nachteilen bzgl. Platzbedarf sind bei einem mineralischen Verschluss der Haustechniköffnungen weitere Aspekte zu berücksichtigen.

Das Eigengewicht des mineralischen Verschlusses muss gegebenenfalls statisch berücksichtigt werden. Bei einer Mörteldichte von $\rho_{\text{Mörtel}}=1500\text{kg/m}^3$ kommen auf einer $0,5\text{m}^2$ großen Öffnung und einer üblichen Einbringtiefe von 150mm ein Gewicht von ca. 113kg zusammen.

Durch die nasse Verarbeitung erhöht sich das Schimmelrisiko im Holz. Außerdem können beim Trocknen Schrumpfrisse auftreten.

Auch bei einem möglichen Transport von vorgefertigten Holzbauteilen, z.B. Badmodulen oder kompletten Raumzellen ist aufgrund der spröden Materialeigenschaften mit einer Rissbildung zu rechnen. Dies sollte im Rahmen eines Qualitätssicherungskonzeptes berücksichtigt werden.

Durch die erforderliche Trocknungszeit erhöhen sich bei einer Vorfertigung die Durchlaufzeiten der Holzbauteile signifikant gegenüber trockenen Brandschutzlösungen.

Wichtigster Aspekt sind jedoch der hohe Arbeitsaufwand und die damit verbundenen Kosten. Folgende Arbeitsschritte sind beim mineralischen Verschluss nach Installation der Leitungen und erfolgter Auskleidung zu berücksichtigen. Installation der Halteleiste, Einbringen einer Schalung, Abdichten der Schalung, Installation der Brandschutzprodukte, z.B. Brandschutzmanschette Hilti CFS-C EL, Anrühren und Ausbringen des Mineralischen Verschlusses. Nach der Trocknungszeit sind erneut Arbeiten erforderlich: Rückbau der Hilfsmaßnahmen wie Querstreben, Dichtschaum und Schalung.



Abbildung 7: Abschottung mit mineralischem Verschluss. Deutlich erkennbar sind Halteleisten, Schalung und Abdichtung mit Bauschaum. Finaler Zustand wird erst nach Trocknung sowie Rückbau der Hilfsmaßnahmen erreicht.

Arbeiten mit trockenen Brandschutzprodukten reduziert die Anzahl der Arbeitsschritte von 8 auf 2 und trägt damit zu einem deutlichen Produktivitätsgewinn bei, siehe auch Abbildung 8.



Abbildung 8: Gegenüberstellung der Arbeitsschritte bei mineralischem Verschluss und trockenen Brandschutzlösungen

4. Geprüfte Brandschutzlösungen mit Hilti

Vielfältige Kunden- und Projektanfragen haben dazu geführt, dass Hilti die produktive Holzbauweise mit geprüften Brandschutzsystemen unterstützt. Für eine frühzeitige Integration in der Planung, eine Vorbereitung im Abbund als auch eine einfache Umsetzung auf der Baustelle, erwirkt Hilti die Zulassung eines breiten Brandschutzproduktportfolios für verschiedenen Holzuntergründe.

4.1. Feuerwiderstandsprüfungen

Hilti arbeitet eng mit internationalen Holzelementherstellern wie Lignotrend, Binderholz, Lignatur und Best Wood Schneider zusammen, um gemeinsame Feuerwiderstandsprüfungen nach DIN EN 1366-3⁵ durchzuführen. In einer Vielzahl von Feuerwiderstandsprüfungen wurden die Funktionsfähigkeit der Abschottungsprodukte bewiesen und in unabhängigen Berichten klassifiziert.



Abbildung 9: Geöffneter Ofen nach Abschluss einer Feuerwiderstandsprüfung am Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung in Linz, Österreich

Die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen im Bereich der Massivholzprodukte (Brettsperr- oder Brettschichtholz) wurde gutachtlich bestätigt.

4.2. Massivholz

Feuerwiderstandsprüfungen in Massivholz Wand- und Deckensystemen zeigen die Leistungsfähigkeit des Baustoffes Holz als auch der Hilti Abschottungsprodukte auf. Ziel der Feuerwiderstandsprüfungen war eine Anwendbarkeit im Sichertzbereich zu ermöglichen sowie auf Beplankungen innerhalb der Bauteilöffnungen zu verzichten. Im Gegensatz zur mineralischen Massivbauweise ist im Holzbau hierbei der Abbrand zu berücksichtigen. Mit Hilti können nun in Abhängigkeit von der Elementstärke unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern erreicht werden. Im Deckenbereich sind für die Abschottungsprodukte ab 80mm Bauteilstärke ein 30min Feuerwiderstand erzielt worden. Für 90min Feuerwiderstand sind mindestens 140mm Deckenstärke einzuhalten. Die Feuerwiderstandsprüfungen ermöglichen eine Aussage zur Funktionsweise der Hilti Abschottungsprodukte in Bezug auf Raumabschluss (E) und Wärmedämmung (I) im Massivholz (Brettsperr-, Brettschichtholz und Brettstapeldecken). Die Auslegung von Decken- oder Wandelementen mit der zusätzlichen Tragfähigkeitsanforderung (R) muss davon gesondert betrachtet werden. Stand März 2022 sind folgende Brettsperrholz Hersteller mit ihren Produkten durch die Hilti Feuerwiderstandsprüfungen abgedeckt und in Tabelle 4 zusammengefasst.

⁵ DIN EN 1366-3:2009-07 Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 3: Abschottungen

Tabelle 4: Brettsperrholz Hersteller Übersicht

Hersteller	Produktbezeichnung	ETA
Best Wood Schneider	best wood CLT	ETA-21/0568
Binderholz	Brettsperrholz BBS	ETA-06/0009
Derix	X-LAM	ETA-11/0189
Eugen Decker	ED-BSP Elemente	ETA-12/0327
HASSLACHER	HASSLACHER Cross Laminated Timber	ETA-12/0281
KLH Massivholz	KLH® - CLT	ETA-06/0138
Mayr-Melnhof Holz	MM-crosslam	ETA-09/0036
Pfeifer Timber GmbH	Pfeifer CLT	ETA-20/0023
Schilliger Holz	Schilliger Grossformatplatte®/CLT	ETA-19/0675
Stora Enso	CLT - Cross Laminated Timber	ETA-14/0349
Theurl Timber Structures GmbH	CLTPLUS	ETA-20/0843
ZÜBLIN Timber	LENO®-Brettsperrholz	ETA-10/0241

Die nun möglichen Anwendungsfelder erstrecken sich über die typischen Anwendungen der Haustechnik, wie zum Beispiel Abwasser-, Heizung-, Trinkwasser oder Elektroanwendungen. Alle Anwendungen sind unmittelbar, sprich ohne Beplankung im Massivholz einsetzbar. Für alle Einbausituationen liegen Standarddetails vor, die die Planungsschritte für alle Beteiligten deutlich produktiver gestalten.

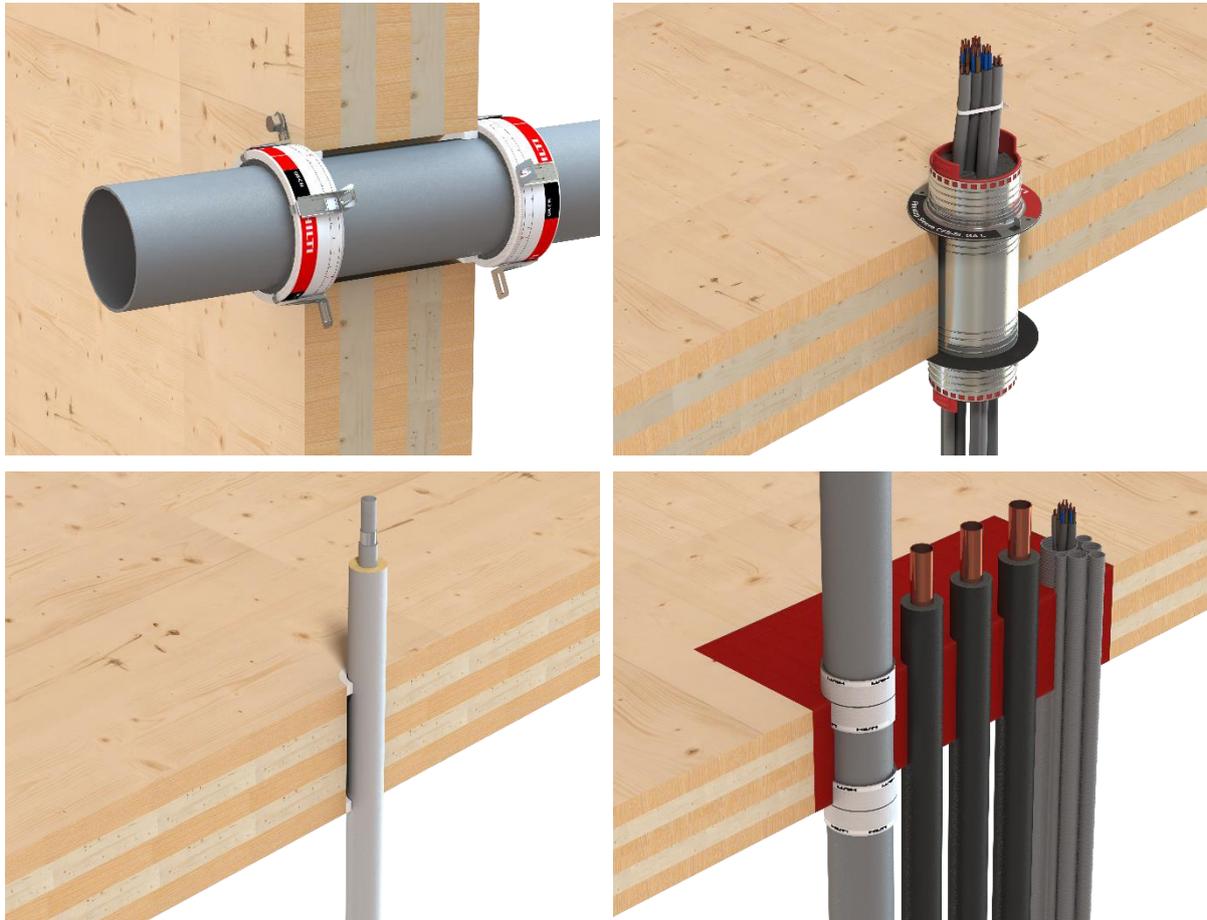


Abbildung 10: Haustechnik Anwendungen direkt im Massivholz ohne Beplankung

4.3. Lignotrend

Gemeinsam mit der Firma Lignotrend wurden für Feuerwiderstandsdauern von 30min bis 90min Abschottungsmöglichkeiten in LIGNO Brettsperrholz Rippelementen erfolgreich geprüft. Die Ergebnisse sind in der «Gutachterlichen Stellungnahme GS 3.2/19-166-2 der MFPA Leipzig» festgehalten.

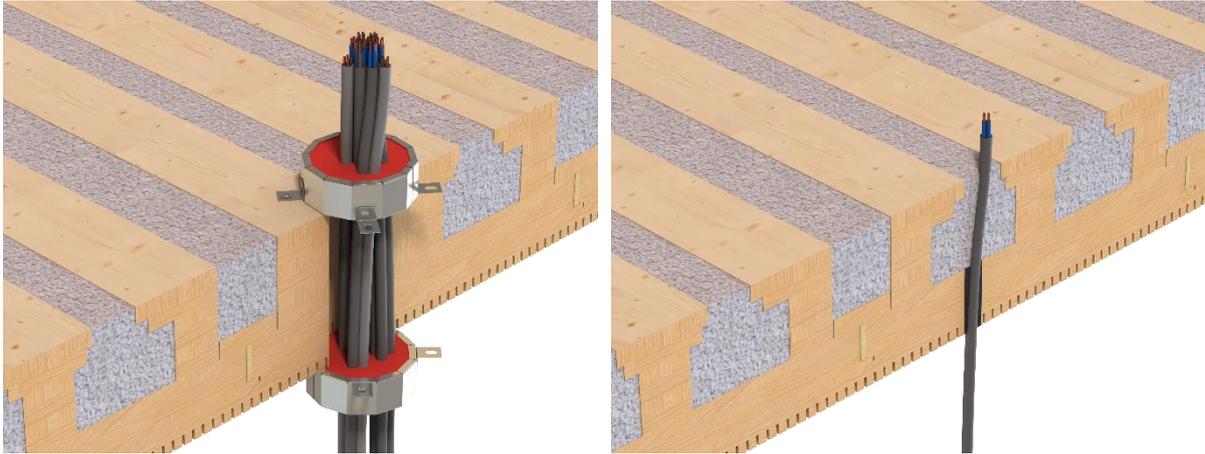


Abbildung 11: Elektroanwendungen im LIGNO Brettsperrholz Rippenenelement von Lignotrend

4.4. Lignatur

Im Lignatur Deckensystem wurden ebenfalls Feuerwiderstandsprüfungen durchgeführt. Hierfür wurden die Ergebnisse in der «Gutachtlichen Stellungnahme zu Prüfberichten der IBS Linz GmbH zum Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit von Abschottungen in LIGNATUR-Hohldielenendecken, 320072105-1» zusammengefasst. Ergänzend greifen die ETA-11/0137 und die VKF Brandschutzanwendung Nr. 15421 den Feuerwiderstand sowie die Vorbereitung des Deckenelementes auf.



Abbildung 12: Haustechnik Anwendungen im LIGNATUR-Element

4.5. Best Wood Schneider

Von Best Wood Schneider wurden erste Feuerwiderstandsprüfungen in der best wood Schneider CLT Box durchgeführt, so dass hier für Planer ebenfalls Ergebnisse vorliegen. Im Klassifizierungsbericht KB 3.2/20-057-2-r1 sind die Ergebnisse aufgeführt.

5. Projektreferenzen

5.1. Riedpark, Lauchringen

Um das Projekt in Sichtholz auszuführen und auf zusätzliche Bekleidung mit nicht brennbaren Gipsplatten zu verzichten, wurden mit der Firma Lignotrend gemeinsame Feuerwiderstandsprüfungen durchgeführt. Damit war die Grundlage für Anwendungen in hochfeuerhemmender Ausführung gegeben.



Abbildung 13: Viergeschossiges Mehrfamilienhaus in Lauchringen, Deutschland

Herausforderung

Änderungen der Bauordnung Baden-Württembergs erlauben seit 2015 den Einsatz von Holz bis in Gebäude der Gebäudeklasse 5 ohne zusätzliche Bekleidung mit nichtbrennbaren Baustoffen.

Architekt Jörg Kaiser hatte ursprünglich eine Holz-Hybridbauweise mit Stahlbeton geplant, um Brandschutzbedenken für sein Bauvorhaben in Gebäudeklasse 4 auszuräumen.

Die für den Riedpark geforderte bauliche Feuerwiderstandsklasse betrug 60 Minuten. Beide Gebäude wurden ohne unterseitige Verkleidung der Brettsperrholzbeplankung mit Gipskartonplatten geplant, was den Feuerwiderstand im Brandfall theoretisch senkt. Trotz der geänderten baurechtlichen Anforderungen sorgt der Mangel an international zugelassenen Brandschutzlösungen für Holz für eine gewisse Unsicherheit bei der Erfüllung der strengen Brandschutznormen. Darüber hinaus stellte die Komplexität und die von der standardmäßigen Ausführung abweichende Ausbildung der Rohrleitungsdurchführungen (Abwasserrohre in der Ecke, Knierohre) eine zusätzliche Herausforderung für die zuständigen Fachplaner dar. Dabei war für den Architekten auch der Schallschutz ein zentrales Thema.

Hilti Lösung

Um die Erfüllung der strengen Brandschutzanforderungen zu gewährleisten, führte Hilti gemeinsam mit Lignotrend einen Feuerwiderstandstest durch. Mit den aussagekräftigen Ergebnissen des Brandversuchs überzeugten die Hilti Brandschutzexperten sowohl den Architekten als auch die lokalen Behörden von der Brandschutzleistung des Systems.

Bei diesem Projekt wichen viele Abwasserleitungsführungen von der standardmäßigen Ausführung ab, zum Beispiel durch Eckenordnungen. Hier kam unsere Endlos-Brandschutzmanschette CFS-C EL zum Einsatz. Elektrische Leitungen wurden in Trassen durch großflächige Durchbrüche verlegt.

Als Lösung für die Abdichtung dieser großflächigen Kabeldurchführungen fiel die Wahl auf CFS-BL P Brandschutzsteine. Als vorgeformtes und gebrauchsfertiges Produkt trägt der Brandschutzstein auch zur Senkung der Gesamtbauzeit bei. Darüber hinaus bietet das Produkt eine hohe Schalldämmleistung und trägt das Hilti Clean-Tec-Logo, das für noch umweltfreundlichere Hilti Produkte steht.

5.2. Walden 48, Berlin

Das nach hohen Umweltstandards realisierte Projekt «Walden 48» liegt im Herzen von Berlin und umfasst 40 Wohnungen. Als Baustoff für tragende Wände und Decken wurde Brettsperrholz verwendet. Holz verbessert die Energieeffizienz und reduziert die Bauzeit erheblich, weil der gesamte Rohbau in weniger als zwei Monaten errichtet werden kann.



Abbildung 14: Mehrgeschossiges Wohnhaus Walden 48 in Berlin, Deutschland

Herausforderung

«Walden 48» wurde nach den höchsten Nachhaltigkeitsvorgaben konzipiert. Daher war der Wärmeschutz eine zentrale Herausforderung für die Architekten. Zudem war der Schallschutz aufgrund der belebten Lage des Gebäudes sowie des Seitenstraßenlärms ein wichtiger Punkt für die Architekten. Darüber hinaus war es schwierig, die strengen Brandschutznormen zu erfüllen, weil es keine international anerkannten Brandschutzlösungen für Holz gibt.

Verschiedene Rohr- und Kabeldurchführung in den Massivholzwänden mussten einen Feuerwiderstand von 90 Minuten aufweisen. Brettsperrholz war zum Projektzeitpunkt noch kein geregelter Untergrund für Brandschutzprodukte. Daher war die zentrale Herausforderung für die haustechnischen Fachplaner sowie Brandschutzexperten, eine Brandschutzlösung zu finden, welche diesen Anforderungen gerecht wird.

Hilti Lösung

Die haustechnischen Fachplaner wandten sich nach einer Präsentation von Hilti zum Thema Brandschutz bei Holz an der «Brandschutz Akademie Berlin» an einen Hilti Brandschutzexperten. Der Brandschutzexperte war bereits frühzeitig in Kontakt mit den Fachplanern, um eine Brandschutzlösung für Abwasser-, Frischwasser- und Heizungsrohre sowie elektrische Leitungen zu planen, die durch einen gemeinsamen Durchbruch mit einer Feuerwiderstandsanforderung von 90 Minuten geführt werden mussten.

Auf Grundlage der von Hilti durchgeführten Brandversuche erstellte der Brandschutzexperte ein projektbasiertes Brandschutzkonzept und eine technische Stellungnahme. Als Lösung für die Abschottung größerer Durchbrüche als Kombischott wurden Hilti CFS-BL P Brandschutzsteine spezifiziert.

CFS-BL P Brandschutzsteine besitzen umfassende Zulassungen für Kombiabschottungen, die sich schnell und einfach installieren lassen. Als vorgeformtes und gebrauchsfertiges Produkt reduziert der Brandschutzstein maßgeblich die Installationszeit. Darüber hinaus bietet das Produkt eine hohe Schalldämmleistung und trägt das Hilti Clean-Tec Logo, das für noch umweltfreundlichere Hilti Produkte steht.

5.3. Schule Barnet Licht Platz, Leipzig

Die Schule befindet sich am Barnet-Licht-Platz in Leipzig-Thonberg, südöstlich des Stadtzentrums. Hier entstand ein Schulgebäude für insgesamt 672 Schüler, das durch die Stadt Leipzig verwaltet wird. Die Konstruktion besteht aus Raummodulen in Holzmassivbauweise (Brettsperrholz). Der gläserne Eingang besteht aus einer Holz Pfosten-Riegel Fassade.



Abbildung 15: Erstes modulares Schulgebäude in Holzbauweise in Leipzig, Deutschland

Herausforderung

Als Schulgebäude fällt das Gebäude nach Musterbauordnung unter die Sonderbauten. Der geforderte Feuerwiderstand von 60 Min. konnte in einer reinen Holzbauweise erreicht werden. Typisch für die modulare Bauweise waren komplett vorgefertigte Raummodule aus dem Werk von Kaufmann Bausysteme GmbH. Diese Raummodule konnten aufgrund des geringen Eigengewichtes mit dünnen Brettsperrholzstärken ausgeführt werden.

Für den Planer war es herausfordernd, eine geeignete Abschottungslösung für brennbare Abwasserrohre in diesen Brettsperrholzdecken zu finden. Nach der Montage der Raummodule erschwerte die Zugänglichkeit zum Steigschacht die konforme Abschottung auf der Baustelle.

Hilti Lösung

Um konforme Lösungen anzubieten, führte Hilti Tests mit branchenführenden Herstellern von Holzelementen durch. In Brettsperrholzelementen unterschiedlicher Wand- und Deckenstärke wurde eine Vielzahl von Hilti Abschottungsprodukten an akkreditierten Prüfinstituten auf ihren Feuerwiderstand geprüft. Mit den vorliegenden Testergebnissen konnte das Planungsbüro als auch der Brandschutzsachverständige von der Lösung überzeugt werden. Der Errichter konnte eine nicht-wesentliche Abweichung zum Anwendbarkeitsnachweis bestätigen.

Die enge Einbausituation im Steigschacht konnte mit der Hilti Brandschutzmanschette-Endlos CFS-C EL gelöst werden. Aufgrund der Flexibilität der Manschette war eine nachträgliche Installation trotz erschwelter Zugänglichkeit möglich. Die geringe Aufbauhöhe der Manschette erleichterte die Installation.

6. Zusammenfassung

Mit geprüften und trockenen Brandschutzlösungen steigert die Produktivität im mehrgeschossigen Holzbau auf vielfältige Weise. In der Planungsphase beschleunigen geprüfte Einbausituationen die Absprache zwischen Fachplanern, Architekten und ausführenden Gewerken. In der Ausführung steigt die Produktivität aufgrund möglichen Verzichtes auf Auskleidung der Öffnung sowie eine signifikante Reduzierung der erforderlichen Arbeitsschritte. Damit liefern geprüfte Brandschutzlösungen einen deutlichen Beitrag um die hohe Geschwindigkeit des Holzbaus auch auf die folgenden Gewerke zu übertragen.

Nachweis der Rauchdichtigkeit von Bauteilanschlüssen im Holzbau

Björn Kampmeier
Hochschule Magdeburg-Stendal
Magdeburg, Deutschland



Patrick Sudhoff
Hochschule Magdeburg-Stendal
Magdeburg, Deutschland



Nachweis der Rauchdichtigkeit von Bauteilanschlüssen im Holzbau

1. Einleitung

Die Nachfrage an ökologisch nachhaltigen Bauweisen mit hohen Anteilen an Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen und insbesondere der Einsatz von Holz als Konstruktionswerkstoff hat in den vergangenen Jahren kontinuierlich zugenommen. Den Einsatzmöglichkeiten standen bzw. stehen in Deutschland oft bauordnungsrechtliche Hemmnisse entgegen. So war die Anwendbarkeit im Sinne präskriptiver Anforderungen lange Zeit auf Gebäude geringer Höhe (GK 1-3) bzw. auf die Kombination mit einer nichtbrennbaren brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung beschränkt.

Im Rahmen der Öffnung der Landesbauordnung des Bundeslandes Baden-Württemberg (LBO BW) 2015 zugunsten des mehrgeschossigen Holzbaus wurden Regelungen geschaffen, die den Einsatz von Baustoffen aus Holz als tragende und aussteifende Bauteile in Gebäuden bis zur Hochhausgrenze auch ohne eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung ermöglicht. So ist in der aktuell gültigen Fassung der LBO BW [1] die Verwendung von Holzbauteilen anstelle hochfeuerhemmender bzw. feuerbeständiger Bauteile möglich, sofern diese die Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit hinsichtlich der Standsicherheit und des Raumabschlusses erfüllen und ihre Anschlüsse ausreichend lang widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung sind. Unter der Brandausbreitung ist im Allgemeinen die Ausbreitung von Feuer und Rauch zu verstehen, die sich unter anderem über Bauteil- und Elementfugen erstrecken kann.

Mit dem über das Land Baden-Württemberg sowie den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Forschungsvorhaben « *Entwicklung einer Richtlinie für Konstruktionen in Holzbauweise in den GK 4 und 5 gemäß der LBO BW (HolzbauRLBW)* » wurde unter anderem der Fragestellung zum Einfluss von Bauteil- und Elementfugen auf die Brand- und Rauchausbreitung von Holzkonstruktionen nachgegangen. Gemeinsam wurden durch die Hochschule Rottenburg, die Hochschule Magdeburg-Stendal und die TU München praxisübliche Bauteilanschlüsse hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit im Sinne der Landesbauordnung Baden-Württemberg (LBO-BW) 2019 entwickelt, untersucht und bewertet.

2. Bauordnungsrechtliche Grundlagen in Deutschland

Das deutsche Bauordnungsrecht fordert entsprechend § 14 Musterbauordnung (MBO), bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass «*der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind*» [2].

Aus diesen Vorgaben ergeben sich unter anderem Anforderungen an

- die Brennbarkeit der Baustoffe,
- die Feuerwiderstandsdauer der Konstruktion, einschließlich der Begrenzung der Brand- und Rauchausbreitung auf definierte Bereiche,
- die (Rauch-)Dichtheit und den Feuerwiderstand der Verschlüsse von Öffnungen
- sowie die Anordnung, Lage und Gestaltung von Rettungswegen.

Die sicherheitstechnischen Aspekte des Brandschutzes zählen zu den wesentlichen Grundanforderungen an Bauprodukte bzw. Bauwerke und sind entsprechend als deskriptive Vorgaben Gegenstand der Musterbauordnung sowie der Landesbauordnungen. Die Anforderungen an Baustoffe, Bauteile und Bauwerke werden in Deutschland auf Grundlage des Systems der Gebäudeklassen (GK) geregelt.

Die Klassifizierung der Gebäude erfolgt auf Basis der Höhe des obersten Geschossfußbodens eines möglichen Aufenthaltsraumes über der Geländeoberfläche im Mittel sowie der Anzahl und flächenbezogenen Ausdehnung der Nutzungseinheiten. Abbildung 1 bietet die Übersicht der in der MBO definierten Gebäudeklassen.

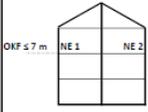
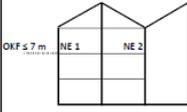
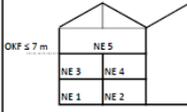
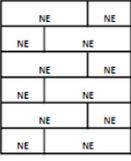
GK 1a	GK 1b	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
					
freistehende Gebäude OKF ≤ 7 m ≤ 2 NE	freistehende Gebäude land- und forstwirtschaftliche Nutzung	nicht freistehend OKF ≤ 7 m ≤ 2 NE Σ NE ≤ 400 m² ohne UG	sonstige Gebäude OKF ≤ 7 m	OKF ≤ 13 m Σ NE ≤ 400 m² ohne UG	sonstige Gebäude -
<small>NE = Nutzungseinheit OKF = Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist</small>					

Abbildung 1: Darstellung der Gebäudeklasse gemäß Musterbauordnung

Gemäß der MBO 2016 [3] durften in GK 4 nur hochfeuerhemmende Bauteile aus im Wesentlichen nichtbrennbaren Baustoffen (F 60-AB bzw. (R)EI 60 mit A2-s1,d0) oder brennbaren Baustoffen mit einer brandschutztechnischen Bekleidung gemäß der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHolzR) [4] und nichtbrennbaren Dämmstoffen verwendet werden.

Die GK 5 erfordert gemäß MBO feuerbeständige Bauteile, die im Wesentlichen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen (F 90-AB bzw. (R)EI 90 mit A2-s1,d0 im Übrigen E-d2), womit Holz per Definition als Tragwerk sowie für raumabschließende Bauteile ausgeschlossen wurde.

Durch die Novellierung der Landesbauordnung in Baden-Württemberg 2015 wurde die Verwendung von Holz für hochfeuerhemmende und feuerbeständige Bauteile auch abweichend von den ursprünglichen Anforderungen – insbesondere der Verwendung von im Wesentlichen nichtbrennbaren Baustoffen bzw. der Notwendigkeit einer brandschutztechnischen Bekleidung – ermöglicht. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Bauteile und ihre Anschlüsse ausreichend lang widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung sind.

Vergleicht man die Situation für die Holzbauweise nach MBO 2016 [3] mit den Möglichkeiten nach LBO B-W [1] in Tabelle 1, so stellt man eine deutliche Diskrepanz der brandschutztechnischen Anforderungen für die verwendbaren Baustoffe fest.

Tabelle 1: Übersicht der derzeitigen Möglichkeiten für die Holzbauweise nach MBO (2016) und LBO BW (2019)

GK	Anforderung an Geschosdecken, tragende Wände, Stützen	Umsetzung nach MBO 2016	Umsetzung nach LBO B-W
1-3	keine bis feuerhemmend (30 Minuten Feuerwiderstand)	Bauteile aus brennbaren Baustoffen z.B. Fachwerkkonstruktion, Holztafelbau, Holzmassivbau	
4	Hochfeuerhemmend (60 Minuten Feuerwiderstand zzgl. durchgehende Brandschutzbekleidung)	nichtbrennbar tragende und aussteifende Teile brennbar in Kombination mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung sowie Dämmstoffen mit einem Schmelzpunkt ≥ 1.000 °C nach M-HFHolzRL	abweichend zu hochfeuerhemmenden Bauteilen sind Bauteile aus brennbaren Baustoffen ohne brandschutztechnisch wirksame Bekleidung sowie in Holzmassivbauweise zulässig z.B. Holztafelbau, Holzmassivbau
5	Feuerbeständig (90 Minuten Feuerwiderstand)	im Wesentlichen nichtbrennbar z.B. mineralische Bauweise	abweichend zu feuerbeständigen Bauteilen sind Bauteile aus brennbaren Baustoffen zulässig z.B. Holztafelbau, Holzmassivbau

In den Gebäudeklassen 4 und 5 ist es nach § 26 LBO-BW [1] in Baden-Württemberg möglich, auch unbedeckte Holzbauteile zu verwenden, die jedoch aus Sicht des Brandschutzes weiterhin dem allgemein anerkannten Sicherheitsniveau der Bauordnung entsprechen müssen. Für den Holzbau und die verbundene Ausführung der Anschlussdetails kann daher die Gleichwertigkeit zu bisher allgemein akzeptierten Ausführungen als Bewertungsmaßstab herangezogen werden.

Zum Vergleich kann somit die Qualität der Anschlüsse unterschiedlicher mineralischer Bauweisen herangezogen werden, die bereits seit Jahrzehnten in den GK 4 und 5 eingesetzt werden. Dieser Standard, der beispielsweise in anerkannten Regeln der Technik bzw. Regelwerken wie der DIN 4102-4 [5] beschrieben wird, ist im Rahmen des Projektes HolzbauRLBW als wesentliche Grundlage zur Bewertung entsprechender Anschlussdetails im Holzbau herangezogen worden. Dabei sollen nach derzeitigem Sicherheitsniveau zugelassene Bauteile verschiedener Bauweisen (z.B. Massivbau, Trockenbau- mit Holztafelbauwand) verglichen werden, aus denen sich Anschlussdetails für den mehrgeschossigen Holzbau ergeben.

Der Raumabschluss ist nach DIN EN 13501 definiert als «Fähigkeit eines Bauteils mit raumtrennender Funktion, der Beanspruchung eines nur an einer Seite angreifenden Feuers so zu widerstehen, dass ein Feuerdurchtritt [...] verhindert wird.» [6]

Als Prüfkriterien gemäß DIN EN 1363 [7] werden dabei die Versagensmerkmale «Spalt-/Rissbildung», «Entzündung eines Wattebausches» bzw. dauernde Entflammung auf der feuerabgewandten Seite» verwendet. Hierbei soll festgestellt werden, ob Heißgase durch mögliche Einrisse im Prüfkörper auf der feuerabgewandten Seite in signifikanter Menge auftreten. Der Raumabschluss gilt als nicht mehr gewahrt, wenn entweder

- der Wattebausch entzündet wird, d.h. er entflammt oder glimmt oder
- die 6-mm bzw. 25 mm-Spaltlehren in Spalten entlanggeführt werden bzw. durch Spalten bis in den Prüfofen hineingeführt werden können oder
- eine andauernde Flammenbildung auf der feuerabgewandten Seite auftritt.

Mit den dargestellten Methoden werden indirekt die Beschädigungen des Bauteils infolge der Temperaturbeaufschlagung erfasst. Zudem lässt sich in Feuerwiderstandsprüfungen an raumabschließenden Bauteilen ein Rauchaustritt an der brandabgewandten Seite optisch registrieren. Jedoch fordert nur die Prüfung nach DIN 4102-2 [8] eine Beobachtung und Bewertung des Maßes der Rauchentwicklungen während des Versuchs. Eine quantitative Beurteilung des Rauchdurchtritts in Form eines Leckagestroms oder einer Beurteilung der Toxizität sind kein Bestandteil der durchgeführten Prüfverfahren. Ausnahme bildet hier nur die Beurteilung des Leckagestroms an Feuerschutzabschlüssen bis zu einem Temperaturniveau von 200°C.

3. Untersuchung des Brandverhaltens von Bauteil- und Elementfugen

Ergänzend zu den normativen Kriterien wurde innerhalb des Projektes die Qualität der Bauteil- und Elementfugen auch im Hinblick auf den Durchtritt von Rauchgasen messtechnisch erfasst. Die quantitative Beurteilung des Rauchgasdurchtrittes ist innerhalb der Klassifizierung raumabschließender Bauteile nach DIN EN 13501 nicht vorgesehen und erfolgt im Prüfverfahren nach DIN 4102-2 für die raumabschließende Funktion der Fläche lediglich rein optisch. Für die quantitative Beurteilung des Rauchdurchtritts in Form eines Leckagestroms sowie einer Beurteilung der Toxizität, insbesondere durch die Anschlussfuge wurde ein Messverfahren auf Grundlage bestehender Ansätze mittels eines Rauchauffangkastens (RAK) weiterentwickelt. Dabei wurde ein neuer Ansatz zur direkten Messung eines Volumenstroms mittels einer Strömungssonde sowie einer simultanen Rauchgasanalytik gewählt. Eine ausführliche Beschreibung der messtechnischen Grundlagen kann [9] entnommen werden.

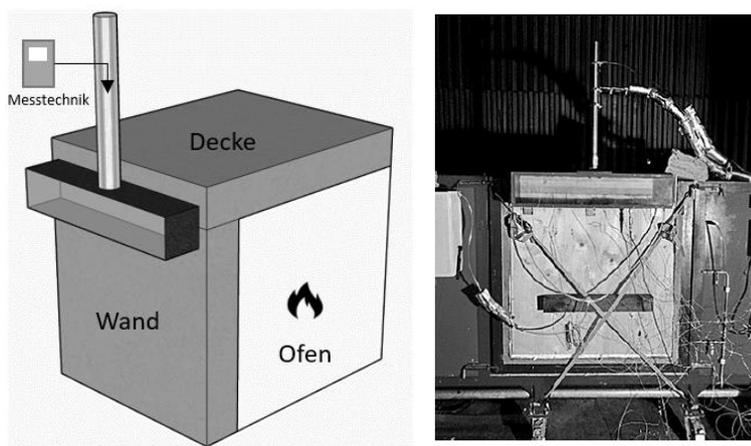


Abbildung 2: 1 m x 1 m Bauteilofen mit angeschlossenen Rauchfangkasten

Für die Untersuchung der Feuerwiderstandsfähigkeit gemäß §26 (3) LBO BW [1] bzw. die Erbringung des Nachweises der Widerstandsfähigkeit gegen die Brandausbreitung im Hinblick auf Bauteil-, Element- und Installationsfugen wurden im Rahmen des Vorhabens HolzbauRLBW über 15 Brandversuche mit ca. 1 m x 1 m großen Wand- und Deckenausschnitten durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

Der Versuchskatalog enthält eine Reihe von Anschlussdetails praxisrelevanter Bauteilfügen von Elementen in Holztafel- und Holzmassivbauweise auf Basis von Verwendbarkeitsnachweisen bzw. technischen Regeln. Dabei wurden sowohl bekleidete als auch unbekleidete Bauteilaufbauten betrachtet. Ergänzt wurden die Versuchsreihen um die Untersuchungen von Elementfugen und Durchdringungen haustechnischer Installationen. Die Grundlage zur Versuchsdurchführung bildete dabei die Reduzierung der Bauteilaufbauten auf die brandschutztechnisch notwendige Schicht, womit eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf eine Vielzahl von Bauteil- und Anschlussvarianten mit mehr Bauteilschichten auf der sicheren Seite gewährleistet bleibt.

Für die vollständige Dokumentation der Versuche, welche dem Projekt zugrunde liegen, insbesondere der Auswertung von Versuchen aus anderen nationalen und internationalen Forschungsvorhaben, wird auf den veröffentlichten Abschlussbericht [10] verwiesen.

Für die Ausbildung der Fügestellen wurden unterschiedliche Dichtprinzipien wie Klebebänder / -schnüre, Schallschuttlager, Kompribänder oder Brandschutzmassen betrachtet. Aufgrund des Versuchsaufbaus ist davon auszugehen, dass die Brandversuche ein kritisches Szenario darstellen, da die relevante luft- bzw. rauchdichte Ebene im Vergleich zur späteren Ausführung näher bis unmittelbar an der brandzugewandten Seite liegt. Dabei wurden neben Ausführungen in Holzbauweise mineralische Bauweisen wie Stahlbeton- oder Trockenbauweisen vergleichend betrachtet.

Die Wand- bzw. Deckenelemente wurden zunächst zu L-förmigen Bauteilen zusammengesetzt und in die Öffnung des Kombiofens der Hochschule Magdeburg-Stendal eingebracht. Der an der brandabgewandten Seite der Fügung angebrachte Rauchfangkasten lieferte zusammen mit der Messtechnik eine quantitative Bestimmung des Leckagestroms, die in Kombination mit einer Gasanalytik eine direkte Bestimmung der Volumen- bzw. Massenströme relevanter Rauchgaskomponenten ermöglichte. Die Versuchsdurchführung erfolgt in Anlehnung an die DIN EN 1363-1 [7] sowie DIN EN 1365-1/1365-2 [11, 12] mit einseitiger Beflammung eines gasbefeuerten Ofens - ohne Prüflast - über einen Zeitraum von 60 bzw. 90 Minuten mittels Einheits-Temperaturzeitkurve. Es wurde ein Ofenüberdruck von 20 Pa angestrebt. Für die Temperaturerfassung am Bauteil wurden NiCr-Ni-Thermoelemente vom Typ K in den Viertelpunkten der flächigen Bauteile sowie in der Fuge angeordnet. Nach Versuchsende wurde der RAK demontiert und der Probekörper aus der Ofenöffnung herausgehoben, abgesetzt und abgelöscht. Im Anschluss erfolgte eine Auftrennung der Bauteile zur Feststellung der Abbrandtiefe.

Die Auswertung der im Rahmen des HolzbauRLBW-Projektes durchgeführten Versuche ergibt, dass das Brandverhalten von Bauteil- und Elementfugen von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist.

Hierzu zählen unter anderem:

- das Spaltmaß,
- die Zusammensetzung der Materialien, die zwischen den Kontaktflächen angeordnet sind,
- die Zusammensetzung der Materialien, welche die Fuge brandraumseitig abdecken oder verschließen,
- die Zusammensetzung der Materialien, welche die Fuge auf der brandraumabgewandten Seite abdecken oder verschließen,
- die Beschaffenheit der Kontaktflächen
- und der Anschluss flankierender Bauteile.

Zur Untersuchung des Einflusses durch das Spaltmaß wurde in Versuch D1 ein 140 mm dickes Brettsperrholzelement mit den drei Fugenabstände 3, 5 und 10 mm hergestellt. Die Fugen wurden auf der brandabgewandten Seite mit Klebebändern, die üblicherweise für die Herstellung luftdichter Bauteilanschlüsse verwendet werden, abgedichtet. In der Mitte der Fuge (70 mm tief) wurden je Spalt insgesamt drei Thermoelemente eingebracht, die mittleren Temperaturen je Fuge sind in Abbildung 3 dargestellt.

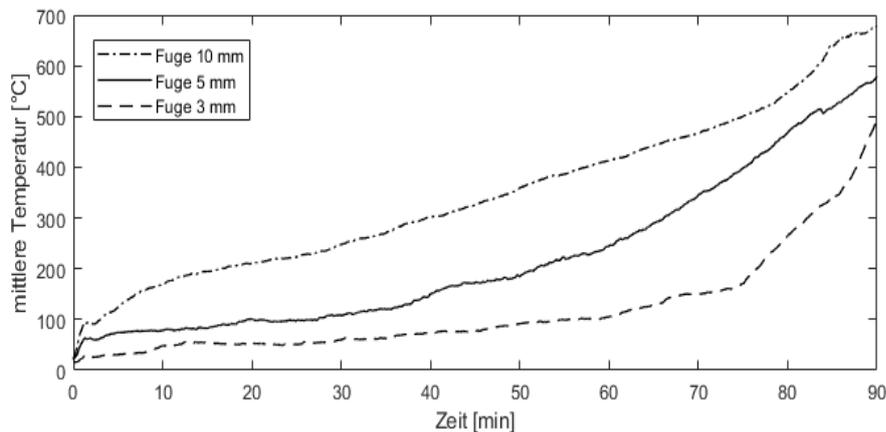


Abbildung 3: Gemessene Temperaturen in Fugenmitte (Versuch D1)

Während es bei der 10 mm-Fuge bereits bei Versuchsbeginn zu einem deutlichen Anstieg oberhalb von 100 °C kommt, zeigt sich diese Entwicklung bei der 5 mm-Fuge nach ca. 30 Minuten und bei der 3 mm-Fuge erst nach 60 Minuten. Die im Bauteil enthaltene Feuchtigkeit bildet dabei zunächst eine physikalische Begrenzung der Maximaltemperaturen an der Kontaktfläche. Bis zu einer Fugenbreite von 3 mm wird diese Begrenzung über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten, bevor das Wasser durch den konvektiven Wärmestrom vollständig verdampft ist.

Je größer der Querschnitt der Fuge, desto höhere Temperaturen sind im Verlauf der Fuge zu erwarten. Durch die Querschnittsvergrößerung kommt es zu einem verstärkten konvektiven Wärmestrom in der Fuge, der je nach Fugenabstand zu einer unterschiedlichen Durchwärmung führt. Eine Möglichkeit zur Verminderung des Wärmeeintrags stellt daher die Begrenzung des Spaltmaßes in Kombination mit weiteren Maßnahmen dar, welche die Fuge auf der brandabgewandten Seite abdecken oder verschließen (siehe Abbildung 4).

Neben der Begrenzung des Fugenabstandes können Maßnahmen in der Kontaktfuge ebenfalls zu einer Verbesserung des Brandverhaltens der Fügung führen. Die damit verbundene Erhöhung des Strömungswiderstandes führt sowohl zu einer Begrenzung des konvektiven Wärmestroms als auch des Rauchdurchtritts. In Versuchen mit komprimierten mineralischen Dämmstoffstreifen konnte der Rauchdurchtritt durch den eingelegten Mineralwollstreifen deutlich und hinreichend reduziert, jedoch nicht vollständig verhindert werden. Die Maximaltemperatur in Fugenmitte betrug maximal 100 °C.

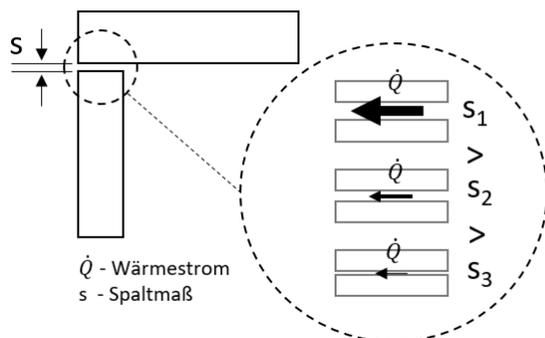


Abbildung 4: Einfluss des Spaltmaßes auf den Durchtritt von Feuer und Rauch

Vergleichbare Ergebnisse wurden in Versuchen mit komprimierten Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen erzielt. Hier kam es zwar aufgrund der Brennbarkeit des Materials zu einer thermischen Zersetzung des ersten Zentimeters des Dämmstoffstreifens, jedoch nicht zu einem erhöhten Rauchdurchtritt. Zudem wurde nach Ende des Versuchs kein kontinuierliches Schwelen beobachtet. Eine Möglichkeit zur Verhinderung bzw. Begrenzung der thermischen Zersetzung stellen Maßnahmen wie Brandschutzdichtmassen oder vollflächige Abdeckungen durch Bekleidungen dar, welche die Fuge brandseitig abdecken oder verschließen.

Zu weiteren Maßnahmen innerhalb der Kontaktfläche können Dichtbänder gezählt werden, welche entweder entsprechend thermisch beständig / intumeszierend sind oder aber mit entsprechendem Abstand innerhalb einer thermisch unkritischen Zone angeordnet werden. Eine entsprechende Begrenzung des Rauchdurchtritts konnte in einem zugehörigen Brandversuch (A2) mit Anordnung eines Kompribands außerhalb der thermisch kritischen Zone über die gesamte Versuchszeit nachgewiesen werden.

Im Holzbau werden innerhalb der Kontaktfläche aus Schallschutzgründen oftmals Schalldämmlager angeordnet. Um diese Dämmlager auch für die Begrenzung des Durchtrittes von Feuer und Rauch ansetzen zu können, ist es notwendig, dass die in der Kontaktfuge angeordneten meist brennbaren Baustoffe während des Brandverlaufs nicht über die gesamte Fugenlänge abschmelzen und ein hinreichender Restquerschnitt erhalten bleibt. Zum Schutz der Fuge können beispielsweise nichtbrennbare Bekleidungen infrage kommen, die im Bereich der Fuge mit entsprechenden Abdichtungsmaßnahmen wie Gipsputz oder intumeszierender Brandschutzmasse verschlossen werden, siehe Abbildung 5.

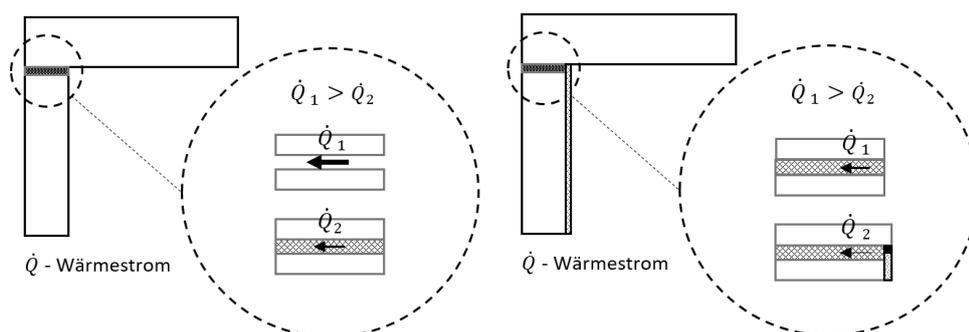


Abbildung 5: Einfluss von Materialien in der Kontaktfläche sowie an der Außenseite der Fuge auf den Durchtritt von Feuer und Rauch

Entsprechende Versuche mit Elastomerlagern (B1, B2) als auch Sand-Waben-Lagern (C1) zeigten bei einem Schutz durch nichtbrennbare Bekleidungen in Kombination mit Dichtstoffen bei einer Fugenbreite von 100 mm und einer Beflammung über 90 Minuten eine Abbrandtiefe von maximal 50 % der Fugenfläche. Aufgrund einer entsprechenden Einbringung von (auch brennbaren) Materialien wie Dämmstoffen oder Schalldämmbändern in die Kontaktfläche bei Begrenzung des Fugenabstandes in Kombination mit weiteren Dichtungsmaßnahmen wie Brandschutzdichtmassen oder Klebebändern, welche im thermisch unkritischen Bereich angeordnet werden (Versuch A1), kann der Rauchgasdurchtritt somit deutlich begrenzt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Übertragung von Rauch raumabschließender Bauteile besteht auch über die angrenzenden flankierenden Bauteile. So können beispielsweise Lamellenfugen oder konstruktiv bedingte Risse, die über raumabschließende Bauteile hinweg verlaufen, zu einer Ausbildung eines Strömungspfad es rechtwinklig zur Fuge führen (siehe Abbildung 6). Aber auch Decken mit Hohlräumen, die über eine raumabschließende Wand hinweggeführt werden (z.B. eine Holztafeldecke) können prinzipiell zu einer Rauchweiterleitung in die Decke oberhalb externer Nutzungseinheiten führen. Aus diesem Grund sind entsprechende Maßnahmen wie die Versiegelung/Abdeckung von Lamellenfugen bzw. die Anordnung einer Verblockung bei Holztafelelementen vorzusehen.

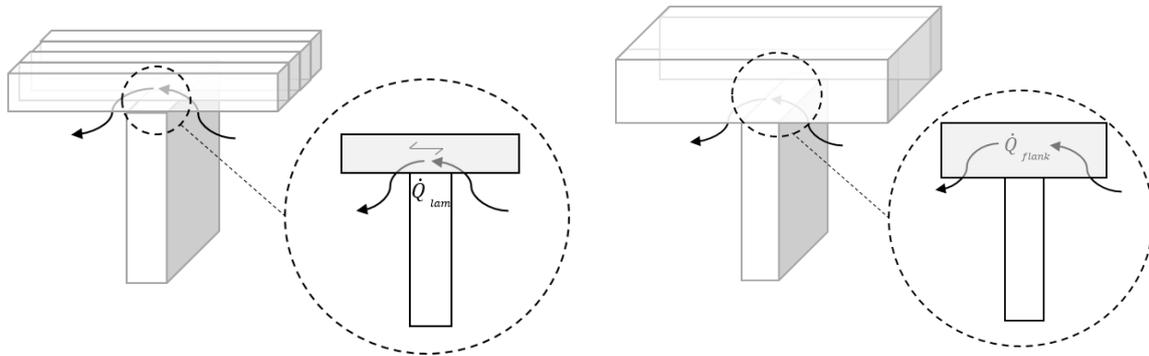


Abbildung 6: Durchtritt von Feuer und Rauch über flankierende Bauteile

Um eine Einordnung der Messwerte zum Stand der Technik entsprechender mineralischer Anschlüsse herzustellen, wurden Anschlussdetails aus der DIN 4102-4 als eingeführte technische Baubestimmung herangezogen. In Versuch F1 wurde ein Mauerwerksanschluss ($b = 100 \text{ mm}$) an eine Stahlbetondecke gemäß DIN 4102-4 [5], Kap. 9 untersucht. Der mineralische Dämmstoffstreifen mit $d = 90 \text{ mm}$ wurde auf eine Dicke von 30 mm komprimiert, sodass eine Rohdichte im Einbauzustand von $\geq 90 \text{ kg/m}^3$ erzielt wurde. In Versuch F3 wurde ein gleitender Trockenbauanschluss DIN 4102-4 [5], Kap. 10 betrachtet. Hierzu wurde das UW-Profil deckenseitig mittels drei Gipsplattenstreifen mit je $d = 12,5 \text{ mm}$ gleitend an der Decke befestigt. Die Referenzversuche werden nachfolgend mit praxisüblichen Holz-Holz-Anschlüssen verglichen (siehe Tabelle 1). Der Vergleich der normierten Volumenströme ist in Abbildung 7 dargestellt.

Das Erreichen der Maximaltemperaturen von 100 °C in der Fugenmitte konnte auch in den mineralischen Referenzversuchen mit gleitendem Trockenbauanschluss und einem Mauerwerksanschluss beobachtet werden. Weiterführend wurde mithilfe der Rauchgasanalytik verglichen, ob die untersuchten Bauteilanschlüsse aus brennbaren Baustoffen mindestens die Dichtigkeit der mineralischen, nichtbrennbaren Referenzbauteile aufwiesen. Mit Ausnahme von Versuch A1 (zeitweiser Rauchdurchtritt durch eine Lamellenfuge) weisen alle Versuche mit Holz-Holz-Anschlüssen einen geringeren Rauchgasvolumenstrom als die beschriebenen mineralischen Vergleichsanschlüsse auf. Die Abgastemperatur stieg innerhalb des Versuchszeitraums bei den Holz-Holz-Anschlüssen (Versuche A1, A2, B1, B2, C1) um maximal 10 K an. Bei den Versuchen F1 ($+ 40 \text{ K}$) und F3 ($+ 45 \text{ K}$) konnten wesentlich höhere Abgastemperaturen beobachtet werden. Weiterhin konnte insbesondere bei Versuch F3 im Gegensatz zu den Holz-Holz-Anschlüssen ein signifikant höherer CO / CO_2 -Massenstrom festgestellt werden, womit die höheren Messwerte des Abgasvolumenstroms durch eine zusätzliche Größe bestätigt werden konnten.

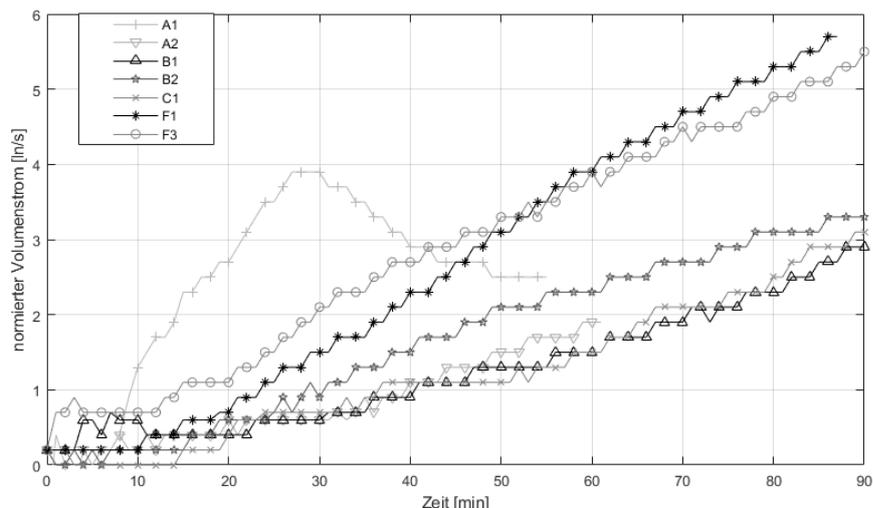


Abbildung 7: Vergleich der normativen Netto-Volumenströme zwischen Bauteilanschlüssen von brennbaren und nichtbrennbaren Bauteilen

Tabelle 2: Übersicht der Hauptversuchsreihe für Bauteilanschlüsse (Legende Bild 7)

Versuch	Beanspruchung	Decke	Wand	Anschluss		
				Brandabgewandt	Kontaktfläche	Brandzugewandt
A1	60 min ETK	BSP	BSP	KLB	-	-
A2			HTB	KLB	KB	-
B1	90 min ETK	BSP	BSP	KLB	EL	V
B2			HTB	KLB	EL	BS
C1		HTB	BSP	-	SW	V
F1		STB	MW	DIN 4102-4:2016-05, Kap. 9		
F3		STB	TB	DIN 4102-4:2016-05, Kap. 10		

BSP – Brettsperrholzelement, HTB – Holztafelelement, MW – Mauerwerk, TB – Trockenbau, KLB – Klebeband, KB – Komprimband, EL – Elastomerlager, V – Verspachtelung, BS – Brandschutzdichtmasse, SW – Sand-Waaben-Lager

Der Vergleich mit den Referenzversuchen hinsichtlich des Rauchdurchtritts zeigt, dass Holz-Holz-Anschlüsse in der Lage sind, mindestens dieselben Leistungskriterien wie dem Stand der Technik entsprechende, bauaufsichtlich zugelassene, nichtbrennbare Konstruktionsweisen zu erfüllen. Der Nachweis der Erfüllung der Schutzziele zur Verhinderung des Durchtrittes von Feuer und Rauch kann somit unter Festlegung von entsprechenden Randbedingungen für Holzbauanschlüsse erbracht werden. Nachfolgend sollen die wesentlichen Randbedingungen zur Erfüllung der notwendigen Voraussetzungen vorgestellt werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei in der Kombination von Maßnahmen zur Erfüllung der baupraktisch ohnehin vorhandenen Anforderungen an die Luftdichtheit mit den Anforderungen zur Begrenzung des Rauchdurchtritts.

4. Feststellungen und Empfehlungen zur konstruktiven Ausführung von Bauteil- und Elementfugen

Anhand der vergleichenden Untersuchungen zwischen mineralischen und holzbautypischen Anschlussvarianten ergeben sich folgende zentrale Erkenntnisse aus der quantitativen Beurteilung des Rauchdurchtritts durch die Anschlussfuge [10]:

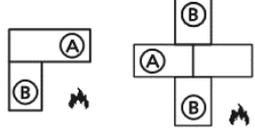
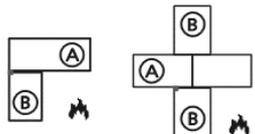
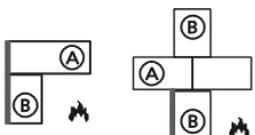
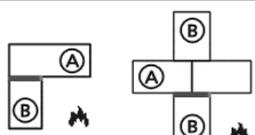
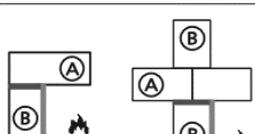
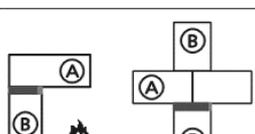
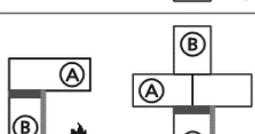
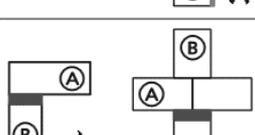
- Es gibt keine absolute Rauchdichtigkeit.
- Die Ausführung einer luftdichten Ebene zwischen Nutzungseinheiten ist eine notwendige Maßnahme zur Begrenzung des Rauchdurchtritts.
- Die luftdichte Ebene muss für die Dauer der vorgesehenen Brandeinwirkung dauerhaft erhalten bleiben. Brandschutztechnisch wirksame Maßnahmen auf der brandzugewandten Seite, die im Regelfall beidseitig ausgeführt werden, verringern den Rauchdurchtritt zusätzlich und erhöhen die Ausfallsicherheit des Gesamtsystems. Diese Dopplung erzeugt zudem eine erhöhte Robustheit, da bei kleinen einseitigen Defekten weiterhin keine Strömungen entstehen können. Die Schall- und Geruchsschutzeigenschaften der Bauteilanschlüsse werden ebenfalls verbessert.
- Abweichend zu DIN 4102-2 ist die Einhaltung des EI-Kriteriums nach DIN EN 13501-2 zwar Grundvoraussetzung für eine Beurteilung der Bauteilfuge, aber allein keine hinreichende Bedingung zur Beurteilung der Rauchdichtigkeit. Durch die Einhaltung der in [13] angegebenen konstruktiven Randbedingungen ist jedoch die Äquivalenz der Rauchdichtigkeit entsprechend der allgemein anerkannten Regeln der Technik aller Bauweisen gegeben.
- Übliche Anschlüsse von Bauteilen in Holztafelbauart und Massivholzbauart sind im Bezug zum Rauchdurchtritt gleichwertig zu seit langem akzeptierten Anschlüssen von mineralischen Bauteilen.
- Zu raumabschließenden Bauteilen flankierende, durchgehende Bauteil-, Lamellen und Elementfugen erfordern zusätzliche Maßnahmen sowie die Unterbrechung des Übertragungsweges im Anschlussbereich. Unbekleidete Bauteile können weitergehende Maßnahmen in der Lamellen- / Element- / Bauteilfuge erfordern.

Unter Anwendung der oben genannten Grundsätze kommen für die Ausführung der Fugen unterschiedliche Maßnahmen infrage. Die Ausführungsvarianten können in Abhängigkeit des geplanten Spaltmaßes s in der Fuge ausgewählt werden. Hierbei kann zwischen Maßnahmen in der Kontaktfläche sowie Maßnahmen auf der brandzu- und -abgewandten Seite unterschieden werden. Eine Auswahl von Maßnahmen ist in Tabelle 3 dargestellt. Für die vollständige Beschreibung der Anwendungsleitlinien wird auf die Informationsdienst Holz Broschüre «Leitdetails für Bauteilanschlüsse in den Gebäudeklassen 4 und 5» verwiesen [13].

Eine ausreichend lange Widerstandsfähigkeit gegen die Brandausbreitung ist bei Bauteilanschlüssen grundsätzlich gegeben, wenn diese Anschlüsse einen ausreichend hohen Widerstand gegenüber thermischer Beanspruchung und einen ausreichend hohen Widerstand gegenüber (Luft-)Strömung bzw. Rauch (d.h. Rauchdichtigkeit) aufweisen.

Innerhalb des Vorhabens wurde ermittelt, welche Randbedingungen eingehalten werden müssen, damit die beiden oben aufgeführten Eigenschaften ausreichend lange erhalten bleiben. Der Widerstand gegenüber thermischer Beanspruchung beruht vorrangig auf der Wahl und Anordnung der Baustoffe und auf den geometrischen Abmessungen derselben. Der Widerstand gegenüber (Luft-)Strömung bzw. Rauch hängt primär von der Qualität der Ausführung und der Einhaltung von zulässigen Toleranzen (Maßhaltigkeit) ab. Bei einer korrekten Ausführung ist somit davon auszugehen, dass die Widerstände der Anschlüsse gegenüber thermischer Beanspruchung und gegenüber Strömung ausreichend hoch sind. Die Maßnahmen zur Sicherstellung der ausreichenden Rauchdichtigkeit, also die Maßnahmen zur Realisierung eines ausreichenden Strömungswiderstandes, erfolgen entweder konstruktiv, über die gesamte Bauteilfuge, oder mittels zusätzlicher dichtender Maßnahmen (z.B. Klebebänder) auf der brandabgewandten und somit «kalten» Seite der Fügung.

Tabelle 3: Klassifizierung der Spaltmaße und Übersicht möglicher Maßnahmen aus [13]

Prinzip		①	②	③
S	Außenwand Trennwand	Maßnahme auf der brandzugewandten Seite	Maßnahme in der Kontaktfläche zwischen den Holzbauteilen	Maßnahme auf der brandabgewandten Seite
1		keine Maßnahme notwendig	keine Maßnahme notwendig	keine Maßnahme notwendig
2		keine Maßnahme notwendig	keine Maßnahme notwendig	Verspachtelung oder Verfugung Brandschutzdichtmasse /-stoffe /-bänder Dauerelastische Verfugung Dichtbänder
3		keine Maßnahme notwendig	keine Maßnahme notwendig	vollflächige Abdeckung mit Bekleidung / Fußbodenaufbau luftdichte Abklebung
4		Brandschutzdichtmasse / Brandschutzstoffe / Brandschutzbänder	Dämmstoff [B2]	keine Maßnahme notwendig
5		vollflächige Abdeckung mit Bekleidung / Fußbodenaufbau	Dämmstoff [B2]	keine Maßnahme notwendig
6		Brandschutzdichtmasse / Brandschutzstoffe / Brandschutzbänder	Dichtungsstreifen / Schalldämmlager bzw. Brandschutzdichtmasse	keine Maßnahme notwendig
7		vollflächige Abdeckung mit Bekleidung / Fußbodenaufbau	Dichtungsstreifen / Schalldämmlager bzw. Brandschutzdichtmasse	keine Maßnahme notwendig
8		keine Maßnahme notwendig	Mineralwolle [A]	keine Maßnahme notwendig

5 Spaltmaß in mm (A) raumabschließendes Bauteil / Element (B) raumabschließendes Bauteil / Element

Eine besondere Herausforderung stellen Anschlüsse von flankierenden Bauteilen dar, da hier die Gefahr einer Brandweiterleitung über eine raumabschließende Konstruktion hinweg besteht (siehe Abb. 8). In Bezug auf die bisherigen Grundlagen der M-HFHolzR [4] würde die klassifizierte Brandschutzbekleidung eine Rauchweiterleitung wirksam verhindern. Auf Basis der aktuellen bauaufsichtlichen Grundlagen (u.a. der LBO BW) können jedoch reduzierte Bekleidungen ausgeführt werden, die nicht den Anforderungen der M-HFHolzR entsprechen bis hin zu deren vollständigem Verzicht. Um eine Gleichwertigkeit zu erzielen, ist daher eine entsprechende Maßnahme in der Fügung des flankierenden Bauteiles zur Begrenzung des Rauchdurchtrittes anzuordnen. Hierfür eignen sich beispielsweise ein Mineralwolle-Schott nach DIN 4102-4 oder eine Verblockung aus Holz (siehe Abbildung 8).

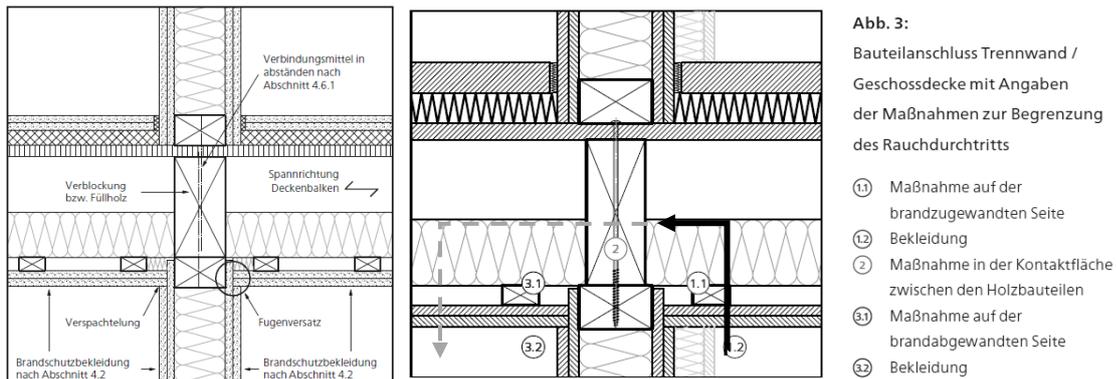


Abbildung 8: Anschluss Trennwand/Geschossdecke mit Anforderungen der MHolzbauRL [14] sowie Maßnahmen zur Begrenzung des Rauchdurchtritts [13]

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte bestätigt werden, dass ein Mineralwolle-Schott nach DIN 4102-4 [5] zwar die Anforderungen hinsichtlich des Raumabschlusses und des Temperaturdurchgangs (EI-Kriterien nach DIN EN 13501-2 [6]) erfüllt. Da das Mineralwolle-Schott jedoch ohne entsprechende Kompression eingebracht werden darf, muss auf Grundlage der Versuchsergebnisse davon ausgegangen werden, dass größere Mengen (kalter) Rauchgase über den Bauteilanschluss hinweg transportiert werden können. Im Sinne einer zusätzlichen Robustheit hinsichtlich des Personen- und Sachwertschutzes wird daher über die Mindestschutzziele hinaus die Anordnung einer Verblockung mit entsprechender Qualität für Holztafelbauweisen bei flankierenden Bauteilen empfohlen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Beschluss des baden-württembergischen Landtags vom 5. November 2014 zur Novellierung der Landesbauordnung (LBO BW) und deren Inkrafttreten zum 1. März 2015 wurden in Baden-Württemberg baurechtskonform Bauvorhaben in Holzbauweise bis zur Hochhausgrenze möglich. Vor diesem Hintergrund bedurfte es zur Planung und Umsetzung entsprechender Bauvorhaben jedoch Leitdetails hinsichtlich bewerteter Bauteile bzw. insbesondere geeigneter Bauteilanschlüsse mit dem Fokus auf deren Beurteilung hinsichtlich des Raumabschlusses. Daher wurden im Vorhaben HolzbauRLBW in vorheriger Abstimmung mit der Obersten Bauaufsicht des Landes Baden-Württemberg vorrangig praxisübliche Bauteilanschlüsse hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit im Sinne der LBO BW in der zuletzt am 18. Juli 2019 geänderten Fassung untersucht und weiterentwickelt.

Die Entwicklung von Leitdetails ist insbesondere auf Grund der fortschreitenden Novellierung der Landesbauordnungen als auch der Musterbauordnung (MBO) sowie der MHolzbauRL im Hinblick auf eine Öffnung zugunsten des mehrgeschossigen Holzbaus von elementarer Bedeutung. Mehrere Bundesländer haben bereits ihre Landesbauordnung hinsichtlich der Zulässigkeit von Bauteilen aus brennbaren Baustoffen, an die hochfeuerhemmende bzw. feuerbeständige Anforderungen bestehen, angepasst. In der aktuellen MBO [2] erfolgte dies ebenfalls mit Verweis auf technische Baubestimmungen. Durch die MHolzbauRL (2020) [14] liegt eine solche technische Baubestimmung bereits vor, deren bauaufsichtliche Einführung in den Ländern ansteht.

Die Annahme, allein massive Holzbaukonstruktionen und deren Anschlüsse seien in der Lage, die Schutzziele für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 zu erfüllen, konnte um die Erkenntnis erweitert werden, dass Anschlüsse von üblichen Konstruktionen in Holztafelbauweise unter Beachtung der im Holzbau bereits weitestgehend üblichen Maßnahmen nicht kritischer hinsichtlich der Rauchdichtigkeit sind. Grundsätzlich wurde anhand der Betrachtung von Bauteilanschlüssen, bei denen gemeinhin die Rauchdichtigkeit angenommen bzw. vorausgesetzt wird, im Vergleich zu praxisüblichen Anschlüssen in Holzbauweise herausgearbeitet, dass von letzteren kein erhöhtes Risiko hinsichtlich von Rauchentwicklung und Rauchdurchtritt ausgeht.

Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse konnten gesicherte quantitative Messungen zum Rauchdurchtritt bei Bauteil- und Elementfugen von Holz-Holz-Anschlüssen durchgeführt werden. Die Messtechnik bietet darüber hinaus das Potenzial, zukünftig eine verstärkte

Rolle im Rahmen der Bewertung von Feuerwiderstandsprüfungen einzunehmen. Die sich aus dem Projekt ergebenden Leitdetails wurden jüngst in der Schriftenreihe des Informationsdienst Holz veröffentlicht und stehen somit den Planern, Architekten, Bauaufsichten und den weiteren am Bau beteiligten Akteuren zur Verfügung.

6. Literatur

- [1] Landesbauordnung Baden-Württemberg (LBO BW) in der Fassung vom 05.03.2010, zuletzt geändert durch Gesetz vom 18.07.2019 (GBl. S. 313)
- [2] Musterbauordnung (MBO) in der Fassung November 2002, zuletzt geändert durch den Beschluss der Bauministerkonferenz vom 25.09.2020
- [3] Musterbauordnung (MBO) in der Fassung November 2002, geändert durch den Beschluss der Bauministerkonferenz vom 13.05.2016
- [4] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHolzR), Fassung Juli 2004
- [5] DIN 4102-4:2016-05: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile.
- [6] DIN EN 13501-2:2016-12: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung.
- [7] DIN EN 1363-1:2012-10: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung.
- [8] DIN 4102-2:1977-09, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
- [9] Sudhoff et.al.: Beurteilung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteil- und Elementfugen im Rahmen des HolzbauRLBW-Projektes, Tagungsband Symposium Heißbemessung 2019, Braunschweig.
- [10] Entwicklung einer Richtlinie für Konstruktionen in Holzbauweise in den GK 4 und 5 gemäß der LBO BW – HolzbauRLBW, Abschlussbericht abrufbar unter <https://www.holzbauoffensivebw.de/de/frontend/product/detail?productId=17>
- [11] DIN EN 1365-1:2013-08: Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 1: Wände; Deutsche Fassung EN 1365-1:2012 + AC:2013
- [12] DIN EN 1365-2:2015-02: Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 2: Decken und Dächer; Deutsche Fassung EN 1365-2:2014
- [13] Dederich, L. (Hrsg.): Leitdetails für Bauteilanschlüsse in den Gebäudeklassen 4 und 5, Informationsdienst Holz, holzbau handbuch, Reihe 3, Teil 5, Folge 2 <https://informationsdienst-holz.de/publikationen/leitdetails-fuer-bauteilanschluesse-gebaeudeklasse-4-und-5>
- [14] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL) Fassung Oktober 2020

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien
**Bauphysikalische Anforderungen
bei Aufstockungen und
Modulbauweise – Praxisbeispiele**

Besonderheiten der Holzmodulbauweise – Praxisbeispiele zum Brandschutz

Hendrik Reichelt
Kaufmann Bausysteme GmbH
Reuthe, Österreich



Besonderheiten der Holzmodulbauweise – Praxisbeispiele zum Brandschutz

1. Einleitung

Die Geschichte von KAUFMANN BAUSYSTEME beginnt mit Holz. Ganz natürlich. Statt von Innovation sprach man vor über 65 Jahren von Weiterentwicklung und von der bestmöglichen Nutzung des Werkstoffes Holz. Ganz im Sinne der Wirtschaftlichkeit und der Nachhaltigkeit. Daran hat sich bis heute nichts verändert.

Mit dem Projekt Hotel Ammerwald in Reutte, Österreich, gelang es 2009 das erste Großprojekt in Modulbauweise umzusetzen. Somit gelang der Startschuss für das serielle Bauen mit Holzmodulen wo zuvor der Holzmodulbau nur für kleine Anbauten oder Einzimmerapartments angewandt wurde. Weitere Projekte mit immer wiederkehrenden, gleichen Wohneinheiten für Hotels, Gesundheitszentren und Studentenwohnheimen konnten in der Folge umgesetzt werden. Mit dem Studentenwohnheim «Woodie», einem 6-geschossigem Gebäude mit Brettsperrholz als sichtbares Material für die Tragstruktur, konnte das erste Holzgebäude in Gebäudeklasse 5 in Hamburg errichtet werden.



Abbildung 1: Hotel Ammerwald, Reutte; AT



Abbildung 2: Stud.-Wohnheim Woodie; Hamburg; DE

Neben den, für sich als geschlossene Apartments, eingesetzten Raummodulen hat sich die Modulbauweise auch für die Herstellung von Wohnhäusern für Mehrzimmerwohnungen sowie Schul- und Bürogebäuden etabliert. 2019 wurden zum Beispiel drei Schulen in Berlin umgesetzt. Um die Klassenzimmer mit ca. 75 m² herzustellen mussten auf der Baustelle mehrere «offene» Module auf der Baustelle zusammengefügt werden.



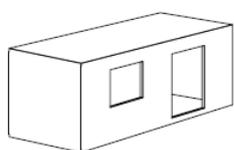
Abbildung 3: ISS Mahlsdorf; Berlin; DE

Alle diese seriell gefertigten Projekte sind für sich immer Prototypen gewesen, die für die Baugenehmigung den örtlichen Anforderungen an die Tragfähigkeit, den Schallschutz, die Energieeffizienz, ... und den BRANDSCHUTZ entsprechen mussten.

Einer von vielen Diskussionspunkten war und ist immer die Beurteilung des Raumabschlusses bei der (Bauteil-) Fügung der Module. Um Klarheit über das Brandverhalten zu gewinnen wurde das Forschungsvorhaben «FireSafeBox» gemeinsam mit der Holzforschung Austria und dem IBS Linz eingereicht und abgewickelt.

2. Anforderung an den Raumabschluss bei der Modulbauweise

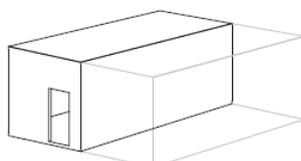
Die dreidimensionalen Raummodule werden bei Kaufmann Bausysteme ausschließlich in holzmassivbauweise errichtet und in einer Werkhalle vorgefertigt. Der Vorfertigungsgrad kann hierbei bis hin zu der fest installierten Möblierung ausgeweitet werden. Jedenfalls können alle Oberflächen, Anschlüsse und Installationen in hoher Qualität vorgefertigt und die Montagezeiten auf der Baustelle auf ein Minimum reduziert werden. Die Module werden für gewöhnlich als Quader ausgeführt und bestehen aus vier rechteckigen Wandelementen, einem Boden- und einem Deckenelement. Werden aus mehreren Modulen ein Raum errichtet, zum Beispiel ein Klassenzimmer, so werden Wandelemente durch Träger und Stützen ersetzt.



Einzelmodul

1 Raummodul = 1 Haus

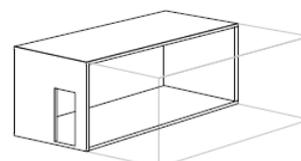
Kleinwohnung, Büro,
Anbau, Ausstellungsraum



geschlossenes Modul

1 Raummodul = 1 Raum

Hotel, Pflegeheim,
Studentenheim



offenes Modul

x Raummodule = 1 Raum

Wohnbau, Schule,
Kindergarten, Büro

Abbildung 4: Module mit unterschiedlichen Öffnungen (Quelle: zuschnitt 67 Raumstapel S.6; proHolz Austria)

Durch die Fügung der Module auf der Baustelle zu einem Gebäude findet man im Gegensatz zum zweidimensionalen Elementbau immer «doppelte» Wände und Decken, die zueinander einen bestimmten Abstand haben. Dies mag auf den ersten Blick zu Mehrkosten führen, die jedoch durch andere Vorteile (Schallschutz, Bauzeit etc.) kompensiert werden und zusätzlich Vorsatzschalen meist überflüssig machen. Daraus resultiert, dass die Oberflächen der Wände und Decken optimalerweise in Holz-sichtoberflächen, allenfalls mit einem Anstrich, ausgeführt werden. Der Nachweis der Anforderung an die Feuerwiderstandsdauer erfolgt bei den BSP-Wänden über die Bemessung auf Abbrand: Der im Brandfall nach der zugrundeliegenden Zeitspanne verbleibende Restquerschnitt der Wand muss die Tragfähigkeit des Gebäudes gewährleisten und durch die Produktzulassung (ETA) oder durch einen Klassifizierungsbericht nachgewiesen werden. (R Kriterium nach ÖNORM EN 13501-2: 2016-11-01). Die Wandbauteile erfüllen dann auch die Anforderungen an den Raumabschluss (E-) und die Wärmedämmung (I Kriterium nach ÖNORM EN 13501-2: 2016-11-01).

Wie sich die Fügung von Wand- und Deckenelementen in Bezug auf das E und I Kriterium verhält kann aus der Literatur, zum Beispiel aus Dataholz.eu, entnommen werden. Die in der Literatur vorgeschlagen Konstruktionen für die Nachweisführung kann zur Ausführung von doppelschaligen Wand- und Deckenelementen, wie man sie bei der Modulbauweise zwangsläufig vorfindet, nicht unmittelbar herangezogen werden (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6).

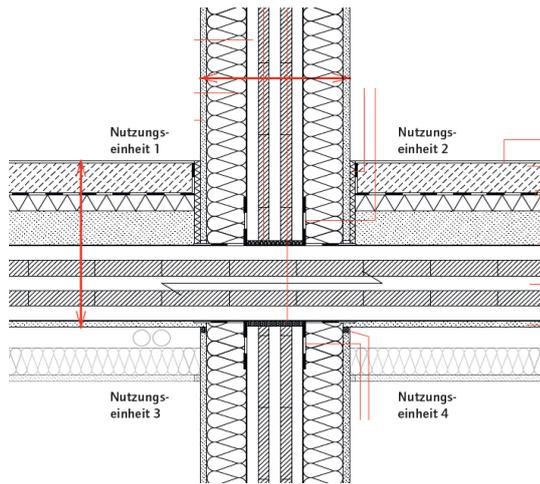


Abbildung 5: Knotendetail Holztafelbauweise
(Quelle: Bauteilfügung twmxgdm02 www.dataholz.eu)

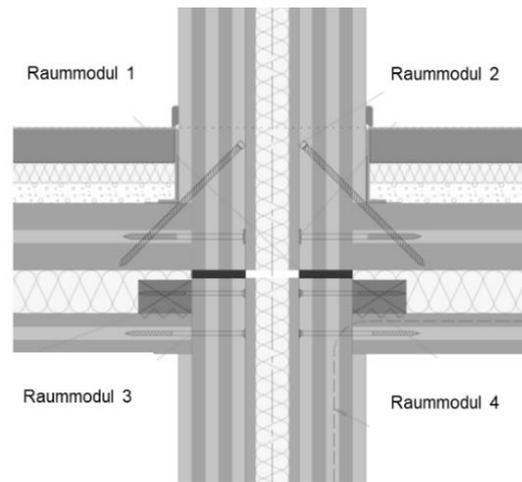


Abbildung 6: Knotendetail Holzmodulbauweise
(Quelle: Kaufmann Bausysteme)

Für die Nachweisführung war somit immer eine vorhabenbezogene gutachterliche Stellungnahme notwendig, was einen enormen planerischen Aufwand darstellt.

3. Der Prüfaufbau

Ein Ziel des Forschungsvorhaben FireSafeBox war es, einen Prüfaufbau für den Deckenprüfstand des IBS Linz zu entwickeln, um den in Absatz 1 erläuterten Aufwand in Zukunft zu minimieren. Die Herausforderung war in einem solchen kostspieligen Prüfaufbau möglichst viele allgemeingültige Situationen zu realisieren. Das Ziel dabei war das Kriterium EI 90 für alle Situationen zu erreichen.

Folgende Fragestellungen wurden unter anderem behandelt:

- Wie verhält sich der Anschluss zweier offener Module im Bereich Boden-, Wand- und Deckenanschluss?
- Wie verhält sich die nicht belastete Unterdecke im Brandfall?
- Wie verhält sich das Schallschuttlager im Brandfall?
- Welche Auswirkung hat ein nicht ausgedämmter Hohlraum?
- Welchen Einfluss haben Dämmungen mit einem Schmelzpunkt über und unter 1000° C?

Um die Beurteilung der Konstruktionen zu den angegebenen Fragestellungen zu stützen wurden an den relevanten Stellen im Prüfaufbau insgesamt 100 Temperaturmesspunkte installiert. Der Versuch wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 1363-1 durchgeführt und der Prüfaufbau nach der Einheitstemperaturkurve (ETK) abgebrannt.

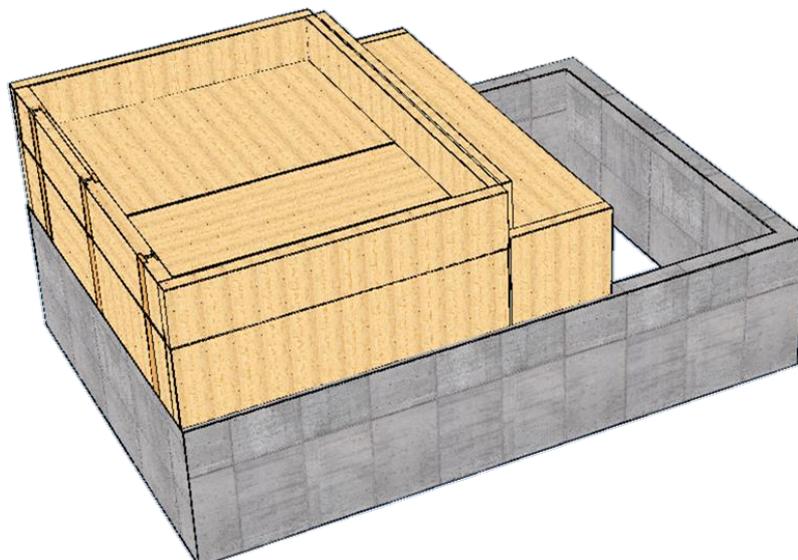


Abbildung 7: 3D Modell des Brandversuchs. (Quelle: Kaufmann Bausysteme)

4. Das Ergebnis

Nach dreitägigem Versuchsaufbau wurde der Großbrandversuch am 27.09.2019 in der IBS gemäß ÖNORM EN 1363-1 durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug 90 Minuten. Dabei wurde auf die Einhaltung der ETK sowie der Druckverhältnisse im Deckenofen geachtet. Die Entwicklung der Temperaturen in kritischen Bereichen wurden ebenfalls laufend beobachtet und kontrolliert.



Abbildung 8: Momentaufnahmen des Brandversuchs beim Start und nach 30, 60 und 90 Minuten Branddauer (Quelle: Kaufmann Bausysteme)

Pauschal kann angegeben werden, dass nach 90 Minuten Branddauer sämtliche im Brandversuch eingebauten Bauteilfugen den Anforderungen an die Kriterien zum Raumabschluss und zur Wärmedämmung stangehalten haben.

Kaufmann Bausysteme liegt nun ein Endbericht der Holzforschung Austria mit 69 Seiten und 4 Anhängen vor. Im Anhang 1 wurden insgesamt 39 Regeldetails der Kaufmann Bausysteme von der Holzforschung Austria auf das EI Kriterium beurteilt. 33 davon auf EI 90 und 6 auf EI 60.

An dieser Stelle bedankt sich der Autor bei Frau Dipl.-HTL-Ingⁱⁿ. Irmgard Matzinger der Holzforschung Austria und bei Dipl.-Ing. Ulrich Stöckl vom IBS - Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH für die sehr gute Zusammenarbeit. Ein weiterer Dank gilt der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) für die Fördermittel zu dieser Feasibility Studie.

Bauphysik im Holzmodulbau – Planung und Umsetzung

Jesse Zimmermanns
W. u. J. Derix GmbH & Co
Niederkrüchten, Deutschland



Bauphysik im Holzmodulbau – Planung und Umsetzung

1. Einleitung

Die Holzmodulbauweise aus X-LAM/Brettsper Holz hat bauphysikalische Besonderheiten gegenüber konventionellen oder elementierten Holzbauweisen. Dies zeigt sich auch beim Schallschutz. Eine grundsätzliche Konstruktionseigenschaft der Modulbauweise ist die durchgängige Zweischaligkeit der Trennwände und -decken, welche aus Sicht des Schallschutzes als vielversprechendes Potenzial gesehen werden kann. Durch die zweischalige Bauweise sind aber nicht automatisch alle Anforderungen erschlagen. Die Wahl des Bodenaufbaus, eine sinnvolle Ausbildung des Moduldeckels und die Entkopplung der Modulstöße sind entscheidend für einen wirksamen Schallschutz.

Aktuell besteht ein großes Defizit an belastbaren und erprobten Bauteilaufbauten, sowie Fachliteratur und normativen Nachweisen, derer sich in der Planung für die schalltechnische Bemessung bedienen werden kann. Daraus resultiert eine große Unsicherheit bei allen Projektbeteiligten. Belastbare Nachweise erfolgen in der Regel erst nach Fertigstellung des Gebäudes durch bauakustische Abnahmemessungen. Während des gesamten Projektverlaufs liegt somit das Planungsrisiko für die Einhaltung der Schallschutzanforderungen beim Bauherren, Schallschutzgutachter oder Modulhersteller. Für Produzenten von Holzmodulen heißt es daher, aktiv im Planungsprozess mitzuwirken. Verbindliche Vorgaben zur Qualität der vorgeschlagenen Wand- und Deckenaufbauten werden erwartet und durch den Produzenten verantwortlich vorgegeben, da es für Planer schwierig bis unmöglich ist, sichere Aussagen zu den Bauteilen zu treffen. Das Konfliktpotenzial ist groß, sollten die Prognosen bei den Messungen nicht bestätigt werden können.

Durch Versuchsstudien eine bessere Grundlage in der Planung und Umsetzung zu schaffen, liegt im Interesse aller Beteiligten. Aus dieser Motivation heraus sind interne Schallschutzmessungen an Testmodulen durchgeführt worden. Die Qualität der Decken- und Wandaufbauten konnte so gezielt erprobt werden. Gleichmaßen half die Studie, die Einflussfaktoren besser bewerten zu können. Die Versuchsstudie mit bauakustischen Messungen wird im Folgenden beschrieben und die Ergebnisse auszugsweise dargestellt.

Die Messungen sind mit maßgeblicher Unterstützung durch Matthias Lutter, Absolvent der TH Rosenheim, im Rahmen seiner Bachelorarbeit erfolgt. Die Messungen sind als bauakustische Messungen unter Berücksichtigung der DIN EN ISO 10140 erfolgt.

Weiterhin ist eine intensive Betrachtung und Messung der Stoßstellendämm-Maße durch Jan Georg Rathfelder, ebenfalls TH-Rosenheim, im Zuge seiner Masterarbeit erfolgt.

Es wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass alle aufgeführten Messwerte und Ergebnisse im Rahmen von bauakustischen Messungen (keine Prüfstandsmessungen) ermittelt worden. Die Anwendung oder Übertragung ist nicht sinnvoll bzw. allgemein gültig.

2. Bauteilprüfungen an Testmodulen

Um die Qualität der Trennbauteile und Anschlusssituationen in der Holzmassiv-Modulbauweise, sowie die Einflussgrößen, wie Entkopplung, Schalenabstand, Fußbodenaufbau und Ausbildung des Moduldeckels zuverlässiger bewerten zu können, wurden drei Raummodule mit einer Größe von ca. 3 m x 7 m x 3 m (B x L x H) erstellt. Durch die Ausbildung verschiedener, wechselbarer Moduldeckel und verschiedener Fußbodenaufbauten, konnte eine ausgedehnte Prüfmatrix erstellt werden. Messungen der Trennwände sind in untergeordnetem Umfang ebenfalls erfolgt.



Abbildung 1: Versuchsdurchführung

2.1. Bauteile

Für die Studie wurden fünf unterschiedliche Moduldeckel (Abbildung 4) erstellt. Deckel aus X-LAM mit und ohne Beschwerung, sowie drei Holzrahmenbauelemente, die in der Höhe der Gefache variieren. Eines davon ebenfalls mit einer Schüttung auf einer Trennlage beschwert. Alle Decken sind unterseitig mit Gipskarton beplankt.

Es wurden drei gängige entkoppelte Fußbodenaufbauten (Abbildung 3) gewählt: Nassestrich, Trockenestrich und Trockenestrich mit Beschwerung in Form einer gebundenen Schüttung.

Alle flankierenden Wände im Empfangs- und Senderraum sind als X-LAM Element mit Sichtoberfläche in Stärken von 80 mm bis 120 mm ausgeführt. Vorsatzschalen waren zum Zeitpunkt der Deckenmessungen nicht vorhanden. Die Entkopplung ist ungestört durch Elastomerlager erfolgt.

Die Wände der Module sind durchlaufend, so dass vertikal direkte Wandstöße vorliegen (Abbildung 2).

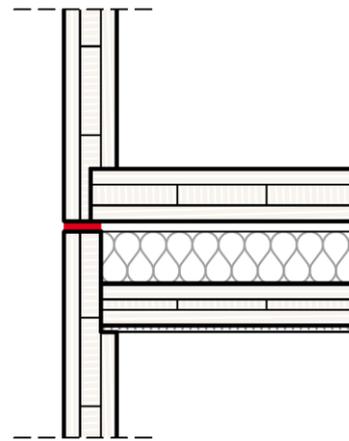


Abbildung 2: Systemschnitt

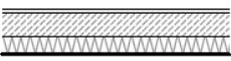
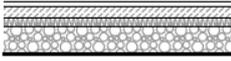
ZE	TEmS	TE
		
5,0 Zementestrich 4,0 Trittschalldämmung, mineralisch	2,5 Trockenestrich 2,0 Trittschalldämmung, mineralisch 6,0 Splittschüttung	2,5 Trockenestrich 2,0 Trittschalldämmung, mineralisch

Abbildung 3: Bodenaufbauten

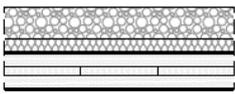
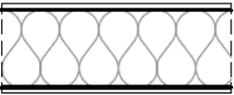
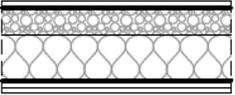
X - LAM 1	X - LAM 2	HRB 1	HRB 2	HRB 3
				
10,0 Mineralwolle 8,0 X-LAM, Brettsper Holz 1,0 Gipskartonplatte	7,0 Splittschüttung 3,0 Mineralwolle 8,0 X-LAM, Brettsper Holz 1,0 Gipskartonplatte	1,5 OSB 17,0 HRB/Mineralwolle 1,0 Gipskartonplatte	1,5 OSB 16,0 HRB (MW 100 SPL 60) 1,5 OSB 1,0 Gipskartonplatte	7,5 Luftschicht 1,5 OSB 10,0 HRB/Mineralwolle 1,0 Gipskartonplatte

Abbildung 4: Moduldeckel

2.2. Durchführung

Der Bau der drei Module, sowie fünf Deckenelemente erfolgte im Sommer 2019. Die bauakustischen Messungen wurden direkt im Anschluss im Außenbereich des Werksgeländes durchgeführt. Die drei baugleichen Module, die sich lediglich in der Wandstärke der Trennwände unterscheiden, wurden mit den unterschiedlichen Moduldeckeln bestückt. Die Fußbodenaufbauten wurden fest installiert. Mit Hilfe eines Autokranes wurde der Senderaum wechselnd auf die beiden verbleibenden Module versetzt.

Mit bauakustischen Messungen unter Berücksichtigung der DIN EN ISO 10140 wurde das Luftschalldämm-Maß, sowie der Norm-Trittschallpegel bestimmt. Alle Bauteilmessungen sind mit einer linienförmigen Entkopplung, Sylodyn NC, erfolgt.

Im Anschluss an die Deckenmessungen wurden akustische Messungen der Trennwände in verschiedenen Anordnungen durchgeführt. Das Anbringen von Vorsatzschalen erfolgte erst im Zuge dieser Messungen.

Bei der Erstellung der Testmodule wurde der Nassestrich irrtümlich mit einer steiferen Trittschalldämmung ausgeführt. Dies spiegelt sich auch in den Messergebnissen wider, die etwas schlechter als erwartet ausfielen. Dieser Aufbau ist unter baupraktischen Aspekten dennoch relevant, da eine dynamische Steifigkeit von 7MN/m^3 zwar häufig gefordert wird, im Zusammenspiel mit einer Fußbodenheizung aber nicht immer umsetzbar ist.

3. Auswertung

Alle Messreihen wurden bewertet, so dass entsprechende bauakustische Messkurven für das bewerte Luftschalldämm-Maß R'_{w} , sowie den bewerteten Trittschallpegel $L'_{n,w}$ vorliegen. Die Überlagerung der Messergebnisse zeigt die Eigenheiten der verschiedenen Decken- und Bodenaufbauten und auch spezifische Eigenschaften der Massivholz- und Modulbauweise auf.

Vereinzelte Ausbrüche der Messkurven konnten im Rahmen der Auswertung nicht zweifelsfrei zugeordnet werden und könnten auch aus Messfehlern oder ungewollten Schallkopplungen bei den Messungen resultieren. Die Auswertung der Deckenaufbauten und eine Einschätzung zu den Einflussfaktoren erfolgt im Folgenden.

3.1. Vergleich Prognose und Messung

Den bauakustischen Messungen sind frequenzunabhängige, als auch frequenzabhängige Berechnungen und Prognosen vorangegangen. Dazu wurden beispielsweise das Programm «VBAcoustic» und das Berechnungsverfahren nach Kühne und Blickle genutzt.

Die Bewertung der Flankenübertragung ist unter Berücksichtigung der DIN EN ISO 12354 und DIN 4109-2 erfolgt. Erwartungsgemäß erschwerten die fehlenden Bauteilkataloge und Bemessungsverfahren die Erstellung verlässlicher Prognosen.

Der Vergleich mit den Messungen zeigte, dass die Prognosen für den Trittschallpegel mitunter im unsicheren Bereich lagen. Umgekehrt ergab sich beim Ansatz von Beschwerden in den Moduldeckeln ein deutlich besseres Messergebnis, als vorab prognostiziert.

Die Prognosen der Spektrum-Anpassungswerte waren beim Zementestrich zutreffend. Insbesondere beim Trockenestrich mit Beschwerung jedoch unsicher. Die gemessenen Luftschalldämm-Maße lagen grundsätzlich etwas oberhalb der Prognosen.

3.2. Stoßstellenentkopplung

Wie bereits erwähnt, wurden alle Bauteilmessungen mit einer linienförmigen Entkopplung durch Elastomerlager durchgeführt. Anhand der Konstellation mit Trockenestrich mit Beschwerung und dem beschwerten X-LAM Deckel (X-LAM2) wurden zusätzlich verschiedene Entkopplungen bis hin zur direkten Kopplung studiert. Es zeigte sich, dass mit einer möglichen Verbesserung von bis zu 10 dB ein großes Potenzial vorhanden ist. Dies gilt insbesondere für den Luftschall. Aus den Messkurven des Trittschallpegels ist deutlich erkennbar, dass insbesondere bei tiefen Frequenzen die Wirksamkeit der Entkopplung nur bei richtig ausgelegten Lagern gelingt. In der konkreten Betrachtung konnte nur das regulär angedachte Lager die Eigenfrequenz des Estrichaufbaus wirksam bedämpfen. Dies zeigte beim Moduldeckel X-LAM1 noch deutlicher.

Ob die weiteren Entkopplungsvarianten bei korrekter Auslegung gleiche Ergebnisse erzielen können, kann nicht abschließend bewertet werden. Die Messungen schärfen in jedem Falle die Annahme, dass das reale Lastbild, die Materialqualität und die Qualität der Montageausführung erheblichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Entkopplung haben.

Die sehr detaillierte Betrachtung der Stoßstellendämm-Maße durch Herrn Jan Georg Rathfelder [2] zeigt ebenfalls auf, dass die mögliche Verbesserung groß ist und maßgeblich durch die Qualität und Auslegung des Lagers bestimmt wird.

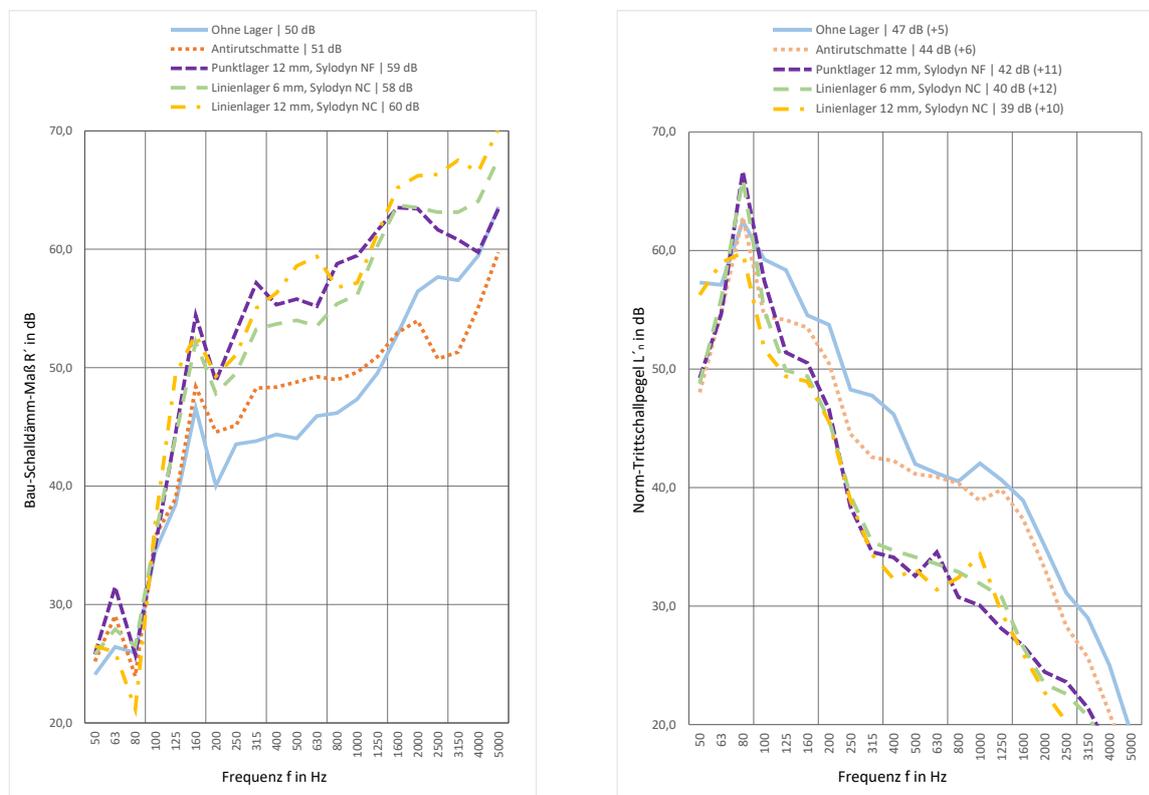


Abbildung 5: Messergebnisse, Bodenaufbau Trockenestrich mit Schüttung, Moduldeckel X-LAM2, R'_{w} bzw. $L'_{n,w}$ ($C_{1,50-2500}$)

Eine vollständige Entkopplung ist konstruktiv nicht immer möglich. Inwieweit punktuelle oder linienförmige Kopplungen die Qualität der Trennbauteile beeinflussen, kann aktuell nicht verlässlich prognostiziert werden.

Die Störung der Entkopplung durch Zugverbindungen, hier durch Teilgewindeschrauben zwischen Moduldeckel und Modulboden simuliert (Abbildung 6), erhöht den Trittschallpegel. Die Bedämpfung der Estricheigenfrequenz durch die Elastomerlager wird durch die Kopplung verringert, was am Anstieg des Schallpegels im Bereich der Resonanzfrequenz erkennbar ist.

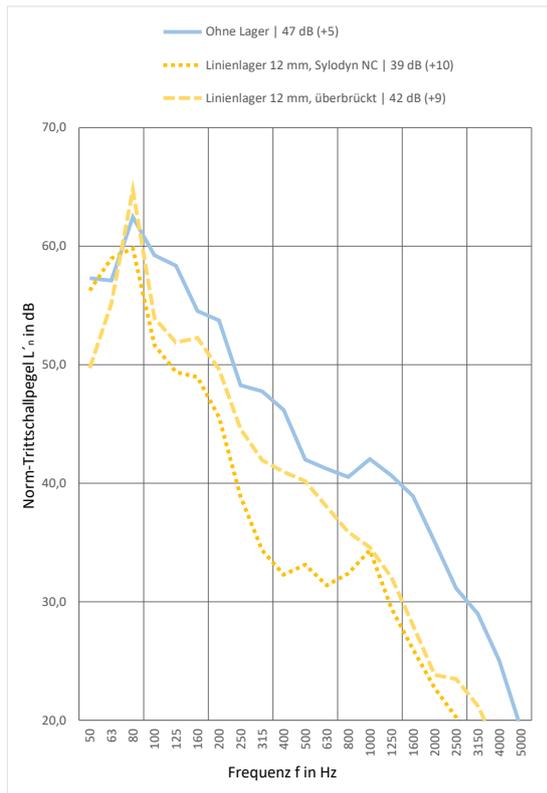
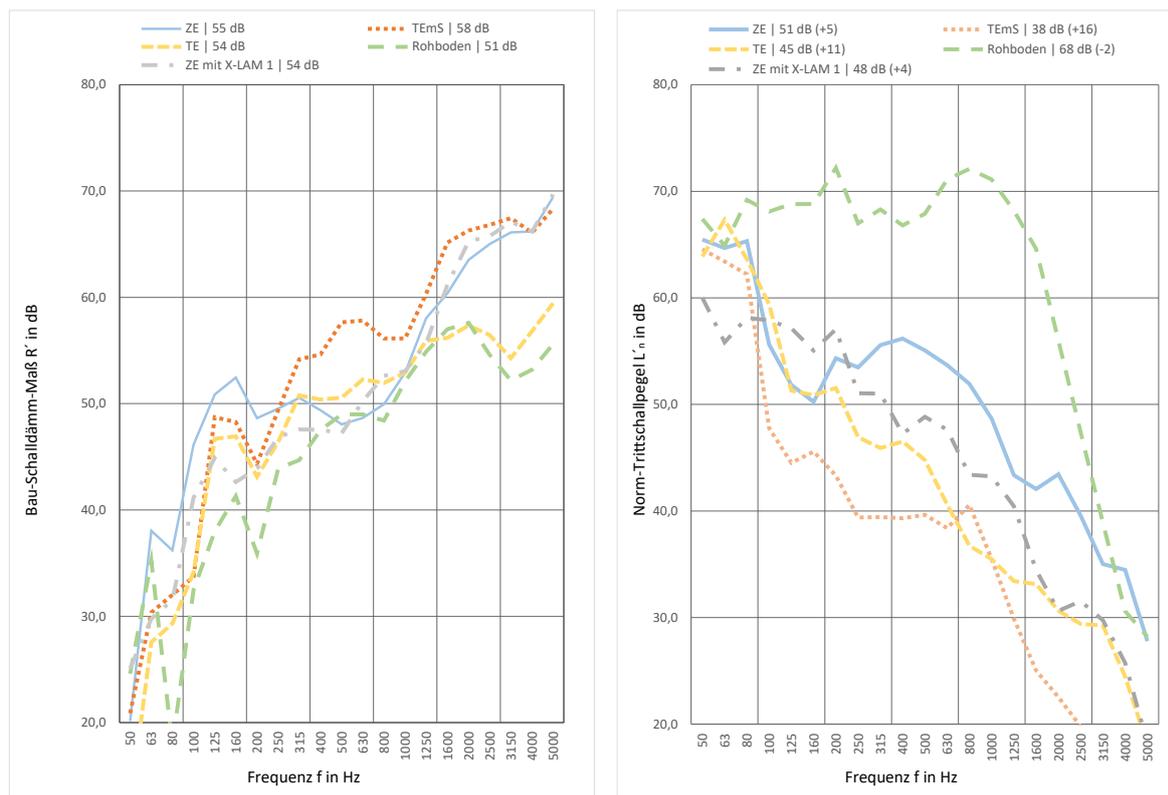
Abbildung 6: Schallkopplung, $L'_{n,w}$ ($C_{i,50-2500}$)

Abbildung 7: Kopplung mit Teilgewindeschrauben

3.3. Fußbodenaufbau

Erwartungsgemäß sind die Spektrum-Anpassungswerte des Nassestrichs viel geringer als die eines Trockenstrichs. Die Ausführung eines Trockenstrichs ohne Schüttung ist für gesetzliche Mindestanforderungen darstellbar, aber nicht unbedingt empfehlenswert. Innerhalb von Nutzungseinheiten und bei eingeschossigen Gebäuden ist der Trockenstrich ohne zusätzliche Beschwerung sicherlich eine praktikable und bzgl. der Vorfertigung in Modulbauweise bevorzugte Variante.

Die recht hohe Eigenfrequenz des Zementstrichs bei ca. 80-90 Hz wird auf die falsche Trittschalldämmung mit einer dynamischen Steifigkeit von ca. 40 MN/m³ zurückgeführt. Die Ausführung einer Schüttung bedämpft die Estricheigenfrequenz spürbar, so dass diese nur schwach ablesbar ist. In folgender Abbildung (Abbildung 8) sind die Estrichvarianten mit Ausbildung des Moduldeckels HRB1 dargestellt. Zusätzlich informativ die Konstellation mit Moduldeckel X-LAM1.

Abbildung 8: Varianten Bodenaufbau, Moduldeckel HRB1, R'_{w} bzw. $L'_{n,w}$ ($C_{1,50-2500}$)

3.4. Moduldeckel

Die Messung der verschiedenen Moduldeckel zeigt, dass sowohl X-LAM-Elemente, als auch HRB-Elemente wirksam eingesetzt werden können. Eine Tendenz zugunsten der X-LAM-Bauteile bei der Betrachtung des Trittschallpegels kann aus Abbildung 9 abgeleitet werden. Bei den Holzrahmenbau-Elementen zeigt sich wenig überraschend, dass große Schalenabstände mit den daraus resultierenden Resonanzfrequenzen wirksam sind. Der Ansatz zweier Schalen durch Einbau eines flachen HRB-Elementes mit Luftraum oberhalb (HRB3) konnte nicht überzeugen.

Die Beschwerung des Moduldeckels brachte nur in einzelnen Frequenzbändern Vorteile. Ob hier die Trennlage aus Mineralwolle positiv oder negativ zu bewerten ist, konnte in den Prüfungen nicht ermittelt werden. Es ist denkbar, dass das direkte Aufbringen der losen Schüttung zielführender sein könnte.

Bei Anwendung des Moduldeckels X-LAM1 zeigt sich für alle gewählten Bodenaufbauten eine Bedämpfung im Frequenzbereich von ca. 63 Hz. Diese Eigenschaft wird auch beim Trockenestrich bestätigt (Abbildung 9). Bei den Baumesungen konnte diese Eigenschaft nur beim Zementestrich gänzlich bestätigt werden (Abbildung 11).

Der Einbruch des Luftschalldämm-Maßes im Bereich der Koinzidenzfrequenz der Brettsperrholzelemente ist unabhängig des Moduldeckels aufgrund der Wandabstrahlung im Empfangsraum deutlich erkennbar. Das beschwerte X-LAM-Element, X-LAM2, und die HRB-Elemente, HRB1 und HRB2, weisen einen geringeren Einbruch der Luftschalldämmung im Vergleich zum unbeschwerten Moduldeckel X-LAM1 auf, was auf Grund der zusätzlichen Deckenabstrahlung konsistent ist. Beim Trittschallpegel hat die Koinzidenzfrequenz hingegen einen untergeordneten Einfluss und verursacht nur einen geringen Resonanzanstieg.

Abbildung 9: Varianten Moduldeckel, Bodenaufbau Trockenestrich mit Schüttung, R'_w bzw. $L'_{n,w}$ ($C_{1,50-2500}$)

3.5. Flankierende Wände

Bei allen Messungen zeigen sich Resonanzeinbrüche im Bereich von 100 Hz bis 200 Hz. Die Brettsperrholzwände im Empfangsraum scheinen auf Grund ihrer Koinzidenzfrequenz für den systematischen Einbruch der Messkurven verantwortlich zu sein. Insbesondere im Zusammenspiel mit Trockenestrichen können ungünstige Überlagerungen in diesem Frequenzbereich entstehen. Eine Kompensation dieses Effekts durch eine Ausbildung allseitiger Vorsatzschalen im Empfangsraum wurde im Rahmen der Studie nicht untersucht. Eine direkte Beplankung mit Werkstoffplatten ergab in den Messungen keine deutliche Verbesserung, was vermutlich an der nur geringfügig veränderten Koinzidenzfrequenz liegt. Bei der Planung ist das Zusammenspiel aus Koinzidenzfrequenz der Bauteile und der Eigenfrequenz des Estrichs zu berücksichtigen.

4. Verifizierung an gebauten Objekten

Die Erkenntnisse der Studie wurden anhand einiger gebauter Objekte verifiziert. Die Messergebnisse konnten in etwa reproduziert werden. Die Trittschalldämm-Maße in den Bauprojekten liegen durchschnittlich etwas oberhalb des in den Versuchen gemessenen Niveaus. Die Luftschalldämm-Maße im positiven Sinne ebenfalls. Innerhalb der Objekte zeigten sich systematische Streuungen beim Trittschallpegel, deren Ursache unter anderem bei der Auslegung und Anordnung der Elastomerlager vermutet wird. Weiterhin könnte die Ausbildung modulübergreifender Räume mit Unterzügen und Stützen verantwortlich sein.

Im konkreten Beispiel zweier baugleicher Mehrfamilienhäuser, welche dreigeschossig aus zwei Wohnungstypen erstellt worden, lagen bei den Messungen der beiden Wohnungstypen deutliche Abweichungen vor, obwohl Fußbodenaufbau und Entkopplungssystematik identisch ausgeführt worden. In beiden Häusern konnte dies nahezu reproduziert werden, so dass Montagefehler als Ursache unwahrscheinlich sind. Während im Kinderzimmer der großen Wohnung ein sehr niedriger Trittschallpegel in Qualität eines erhöhten Schallschutzes vorherrscht, wird im Schlafzimmer der kleinen Wohnung nur der gesetzliche Mindestanspruch erfüllt.

Die Messungen in den Mehrfamilienhäusern mit Grundriss gemäß Abbildung 10 veranlassen zu folgenden Annahmen:

- Die Ausführung mittels Zementestrich erfüllen in den Versuchs- und Baumessungen die gesetzlichen Mindestanforderungen. Die Anforderungen des erhöhten Schallschutzes wurden teilweise auch erzielt. Die Spektrum-Anpassungswerte sind niedrig.
- Die Entkopplung, insbesondere von Punktlasten unter Stützen, kann durch eine falsche Lagerauslegung oder zu hoch prognostizierte Lasten deutlich vermindert sein. Eine wünschenswerte Abstimmung bei ca. 25 Hz ist dann nicht mehr gegeben.
- Die Vorsatzschale im Empfangsraum der großen Wohnung verbessert die Bedämpfung im tiefen Frequenzbereich.



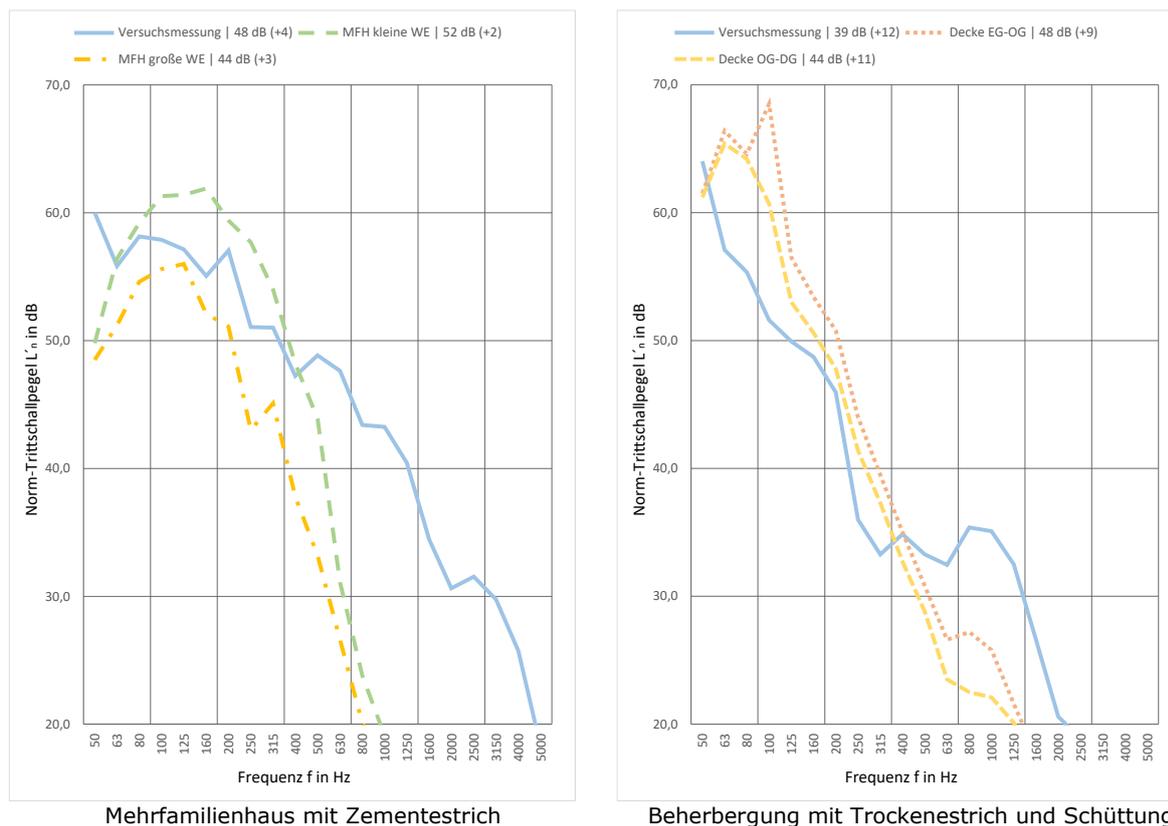
Abbildung 10: Grundriss Mehrfamilienhaus, Darstellung kleine und große Wohneinheit, dreigeschossig identisch

Im zweiten Objekt, eine dreigeschossige Beherbergung aus baugleichen Einzelapartments, konnte der Einfluss der Lagerauslastung festgestellt werden. Alle Bauteilanschlüsse und die Entkopplung sind in den Geschossen exakt identisch ausgeführt worden.

Durch einen starken Anstieg des Pegels zwischen 80-125 Hz, ist der bewertete Trittschallpegel der Trenndecke im EG ca. 4 dB höher als jener im 1.OG. Vergleichbar zeigte sich dies auch beim Luftschalldämm-Maß der Bauteile.

Die doppelte Belastung der Lager, welche in beiden Fugen identisch sind, scheint die entkoppelnde Wirkung soweit zu reduzieren, dass die Eigenfrequenz des Trockenestrichs deutlich messbar ist. In der Versuchsmessung ist die Resonanzfrequenz des Trockenestrich bei ca. 100 Hz kaum abgebildet und wird deutlich wirksamer bedämpft. Im Gegensatz zur Versuchsmessung betrug der Schalenabstand zwischen Moduldeckel und Modulboden nicht 100 mm sondern 40 mm. Vermutlich hat dies ebenfalls einen direkten Einfluss auf die Bedämpfung bei tiefen Frequenzen. Mit aktuellem Kenntnisstand kann nicht identifiziert werden, wie der Einfluss der beiden Faktoren gewichtet werden sollte.

Mit einem bewerteten Trittschallpegel, $L'_{n,w}$, von 44 dB bzw. 48 dB sind beide Objektmessungen insgesamt zufriedenstellend. Der Spektrum-Anpassungswert war jedoch bei beiden Messungen hoch. Durch eine bessere und differenzierte Lagerauslegung hätte voraussichtlich eine höhere und zwischen den Geschossen gleichwertige Qualität erreicht werden können.

Abbildung 11: Vergleich Versuchsmessung und Objekte, Norm-Trittschallpegel, $L'_{n,w}$ ($C_{1,50-2500}$)

5. Fazit

5.1. Eigenfrequenz Brettsperrholz

Bei den Luftschallmessungen hat die Koinzidenzfrequenz der Brettsperrholzbauteile, die bei üblichen Wandstärken im Bereich von 100-200 Hz liegt, häufig einen Einfluss auf die bewerteten Schallpegel. Eine wirksame Kompensation könnte die Ausbildung allseitiger Vorsatzschalen sein, die in der Studie nicht untersucht wurde. Eine hohe Qualität dieser Ausführung ist unumstritten, geht jedoch zu Lasten der möglichen Sichtoberflächen und deutlich größerer Wandstärken. Höhere Erstellungskosten bei verringertem Wohnflächenanteil gehen ebenfalls einher, weshalb dieses Vorgehen für die Marktfähigkeit des Holzmodulbaus kritisch ist.

5.2. Ausbildung und Dimensionierung der Entkopplung

Bei der Dimensionierung und Anordnung der Entkopplungslager ist eine genaue Prognose der vorherrschenden Lasten äußerst wichtig, um eine adäquate Lagerdimensionierung vornehmen zu können. Fehleinschätzungen in der Tragwerksplanung, können damit erheblichen Einfluss auf die Qualität der Trennbauteile haben.

Die differenzierte Auslegung der Entkopplung gilt es zu verfeinern. Häufig wird die zulässige Stauchung unter Eigengewicht als Dimensionierung herangezogen. Die Eigenfrequenz sollte bei der Auslegung noch stärker in den Fokus rücken.

Die Störung der Entkopplung durch vertikale Verbindungen wurde in den Versuchen simuliert. Da die Einflüsse der verschiedenen Verbindungstypen, wie Winkel, Schrauben, Knaggen und weitere Kopplungsarten kaum vorhersehbar sind, muss der Fokus zukünftig weiter auf der Ausbildung entkoppelter Zug- und Schubverbindungen liegen. Eine verlässliche Prognose der diversen Verbindungsmöglichkeiten ist aktuell nicht möglich.

5.3. Planung und Umsetzung zukünftiger Projekte

Die Studie zeigt die Potenziale der Modulbauweise und zweischaligen Ausbildung der Holzbauteile in diversen Varianten. Es bestehen viele praxisgerechte Bauteilaufbauten, die in der Modulbauweise angewandt werden können.

Die Kenntnis und Erfahrungen müssen durch weitere Studien zu den Bauteilen und Einflussgrößen vertieft werden, damit die Berechnungen und Prognosen eine höhere Zuverlässigkeit für Bauherren, Planer und Ersteller zulassen.

Langfristig müssen neben der sicheren Prognose der Bauteilqualitäten auch die verschiedenen Flankenausbildungen und Modulstöße in Berechnungs- und Prognoseverfahren verankert werden. Planer müssen in die Lage versetzt werden, unabhängig und verlässlich in Holz- und Holzmodulbauweise planen zu können, ohne dabei ein erhöhtes planerisches Risiko eingehen zu müssen. Bis dieser Zustand erreicht ist, ist der frühzeitige Austausch zwischen Bauherren, Planern und Herstellern unabdingbar. Insbesondere die verantwortliche Rolle der Hersteller bleibt vorerst bestehen.

5.4. Forschungsbedarf

Die Versuchsreihe stellt trotz des großen Umfangs getesteter Bauteile nur einen Bruchteil der möglichen Konstellationen dar. Eine Untersuchung einzelner Einflussfaktoren und Wechselwirkungen ist nur in Auszügen erfolgt.

Viele Aspekte müssen noch intensiver studiert werden, um sichere Prognosen tätigen zu können. Dazu zählen unter anderem:

- Erweiterung der gemessenen Bauteilaufbauten durch weitere Variation der Parameter: Schalenabstand, Dämmstoff und Bekleidung.
- Optimierung des Einsatzes von Beschwerungen auf dem Moduldeckel, sowie der Einsatz von Tilgern als Teil des Moduldeckels.
- Effiziente Auslegung der Bauteilstärken zur Vermeidung ungünstiger Resonanzerscheinungen durch die Koinzidenzfrequenzen der angrenzenden X-LAM Bauteile.
- Bewertung und Prognose von konstruktiven Kopplungen und Verbindungen.
- Wirksame und differenzierte Auslegung der Entkopplungslager.

6. Literaturhinweise

- [1] Bachelorarbeit an der TH Rosenheim, *Schallschutz in modularer Holzmassivbauweise, Ausarbeitung und Prüfung von Deckenaufbauten, sowie deren Bewertung unter schallschutztechnischen und wirtschaftlichen Aspekten*, 25.11.2019, Matthias Lutter
- [2] Masterarbeit an der TH Rosenheim, *Messtechnische Ermittlung von Stoßstellendämm-Maße von Wohnmodulen in Holzmassivbauweise*, 03.07.2020, Jan Georg Rathfelder

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien
**Bauphysikalisch-energetische Aspekte
der Gebäudehülle**

Grüne Fassaden – Auswirkung auf U-Wert, Oberflächentemperaturen und Wärmebrücken

Florian Teichmann
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie, TU Wien
Wien, Österreich



Azra Korjenic
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie, TU Wien
Wien, Österreich



Grüne Fassaden – Auswirkung auf U-Wert, Oberflächentemperaturen und Wärmebrücken

1. Ausgangssituation

Weltweit nehmen die Bevölkerungszahlen von Städten kontinuierlich zu – bis zum Jahr 2050 werden rund zwei Drittel der Menschen in Städten leben [1]. Um ausreichend Platz für Wohnraum, Arbeitsplätze sowie notwendige Infrastruktur zur Verfügung zu stellen, ist eine immer dichtere Bebauung des urbanen Raums erforderlich. Dies führt dazu, dass weniger Platz für Grün- und Freiflächen vorhanden ist. Doch gerade diese bestimmen die Lebensqualität in Städten maßgeblich und haben neben dem Erholungseffekt für die sich dort aufhaltenden Menschen auch weitere positive Auswirkungen auf das Stadtklima und die Luftqualität. Als Ausgleich für diese weichenden Grünflächen bedarf es daher innovativer Lösungen. Die vertikale Begrünung von Gebäuden wurde diesbezüglich als wirkungsvolle Maßnahme identifiziert. Bauwerksbegrünungen können dabei nicht nur die Luftqualität erhöhen, Staub binden, sowie die CO₂-Konzentration und Lärm reduzieren, sondern sie wirken auch auf das Mikroklima in der Umgebung der Begrünung und können zu einer Reduktion des Heiz- und Kühlenergiebedarfs beitragen [2]–[7]. Die Begrünung von Gebäuden, insbesondere in Städten, stellt demnach eine wirkungsvolle Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel dar.

Auch wenn die Begrünung von Fassaden keine neue Erfindung ist, rückt sie aufgrund dieser positiven Auswirkungen in den letzten Jahren vermehrt in den Fokus. Mit dem Entstehen neuer technischer Lösungen für die Integration des «lebenden Baustoffs» Pflanze an der Fassade geht auch der Forschungsbedarf von unterschiedlichen Kombinationen von Bauweisen der Außenwand und Fassade und der Begrünungsart einher. Gegenstand bisheriger Umsetzungen und Untersuchungen sind meist Begrünungen an Gebäuden aus Ziegel und Stahlbeton. An Holzbauten wurden Fassadenbegrünungen bisher nur vereinzelt umgesetzt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zur Auswirkung von Fassadenbegrünung auf die thermische Qualität von Außenwandkonstruktionen unterschiedlicher Bauweisen dargestellt und in weiterer Folge das Potential sowie die Möglichkeiten und Grenzen von Fassadenbegrünung im Holzbau dargestellt.

2. Fassadenbegrünung im Allgemeinen

Die erste österreichische Norm zu Fassadenbegrünung (ÖNORM L 1136, Ausgabe: 2021-04-01, Vertikalbegrünung im Außenraum – Anforderungen an Planung, Ausführung, Pflege und Kontrolle [8]) unterscheidet verschiedene Arten der vertikalen Begrünung, welche auf ähnliche Weise auch in anderen Regelwerken, Leitfäden und Richtlinien (z.B. Leitfaden für Fassadenbegrünung der Stadt Wien [9], Fassadenbegrünungsrichtlinien der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V.[10]) beschrieben werden:

- Bei der bodengebundenen Begrünung befindet sich der Wurzelraum der Pflanze im an das Gebäude direkt angrenzenden Erdreich. Bodengebundene Begrünung kann, den Voraussetzungen der zu begrünenden Außenwand sowie den eingesetzten Pflanzen (Selbstklimmer oder Kletterpflanzen) entsprechend, mit oder ohne Rankhilfe ausgeführt werden.
- Sollte kein bzw. nicht ausreichend Platz am Boden vorhanden sein (z.B. bei geringen Gehsteigbreiten) oder wenn es gestalterisch erwünscht ist, ist eine Begrünung in dafür vorgesehenen Trögen möglich («troggebundene Vertikalbegrünung»). Eingesetzt wird diese Art der Begrünung auch bei größerer Gebäudehöhe, sodass das Begrünungsziel schneller erreicht werden kann, da die troggebundene Begrünung auch eine Begrünung mit Kletterpflanzen in höheren Geschoßen beginnend ermöglicht.

- Bei der wandgebundenen vertikalen Begrünung befindet sich der gesamte Lebensraum der Pflanze direkt an der Fassade und in dafür vorgesehenen Trögen, Taschen, Behältern oder Ähnlichem. Die Ausführung dieser Begrünungsart kann teilflächig (z.B. in übereinander angeordneten Trogreihen) oder vollflächig (z.B. durch Module, wie in Abbildung 1 dargestellt) erfolgen.[8]

Abbildung 1 zeigt ein modulares Begrünungssystem, welches im Rahmen eines Forschungsprojekts an einer Schule in Wien umgesetzt wurde. Dargestellt ist das Erscheinungsbild im Vergleich zwischen dem Zustand direkt nach der Bepflanzung (Sommer 2017) und zwei Jahre danach (Sommer 2019). Diese Veränderungen durch den «lebenden Baustoff Pflanze» müssen bei allen Planungen und Ausführungen von Begrünungsmaßnahmen berücksichtigt werden.



Abbildung 1: Beispiel - wandgebundene Vertikalbegrünung mit vollflächigem Vegetationsträger – links: kurz nach der Bepflanzung (Sommer 2017); rechts: zwei Jahre nach der Bepflanzung (Sommer 2019).

Wandgebundene Begrünungssysteme sind an der Fassade befestigt und funktionieren bauphysikalisch als vorgehängte Konstruktionen mit Hinterlüftungsspalt. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau einer Außenwandkonstruktion mit Fassadenbegrünung und Hinterlüftungsebene.

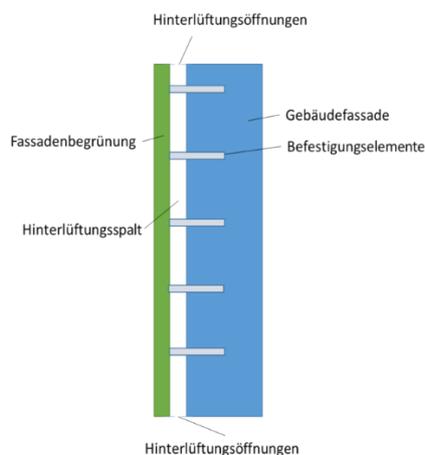


Abbildung 2: Schematische Darstellung der bauphysikalischen Funktionsweise wandgebundener Begrünung.

3. Auswirkung von Fassadenbegrünungen auf den U-Wert

Bei der Auswirkung von Fassadenbegrünung auf den Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) einer Fassade sind zwei gegenteilige Effekte zu beachten: Einerseits wirkt die Fassadenbegrünung mitsamt dem dahinter befindlichen Hinterlüftungsspalt in gewisser Weise als Dämmschicht, andererseits verursachen die Befestigungselemente bei gedämmten Fassaden zusätzliche Wärmebrücken, die wiederum zu einer Verringerung der Dämmwirkung führen. Um in Summe eine Verbesserung des Wärmeschutzes einer Außenwandkonstruktion zu erzielen, ist daher besonderes Augenmerk auf die Minimierung der Wärmebrücken zufolge der Befestigungselemente der Fassadenbegrünung zu legen.

3.1. Troggebundene Begrünung nach Sanierung

Die ersten Untersuchungen des Einflusses von Fassadenbegrünung auf den U-Wert von gedämmten Fassaden wurden im Jahr 2018 am Amtsgebäude der Magistratsabteilung 31 in Wien durchgeführt, das im Zuge einer thermischen Sanierung auch mit einer troggelundenen Fassadenbegrünung mit Gerüstkletterpflanzen ausgestattet wurde. Bereits an den durchgeführten Wärmebild-Aufnahmen aus dem Dezember 2018 (siehe Abbildung 3) erkennt man leichte Wärmebrücken im Bereich der Befestigungs-Konsolen, die für eine Verankerung der lasttragenden Unterkonstruktion der Fassadenbegrünung an der gedämmten Vollziegelaußenwand sorgen. [11]

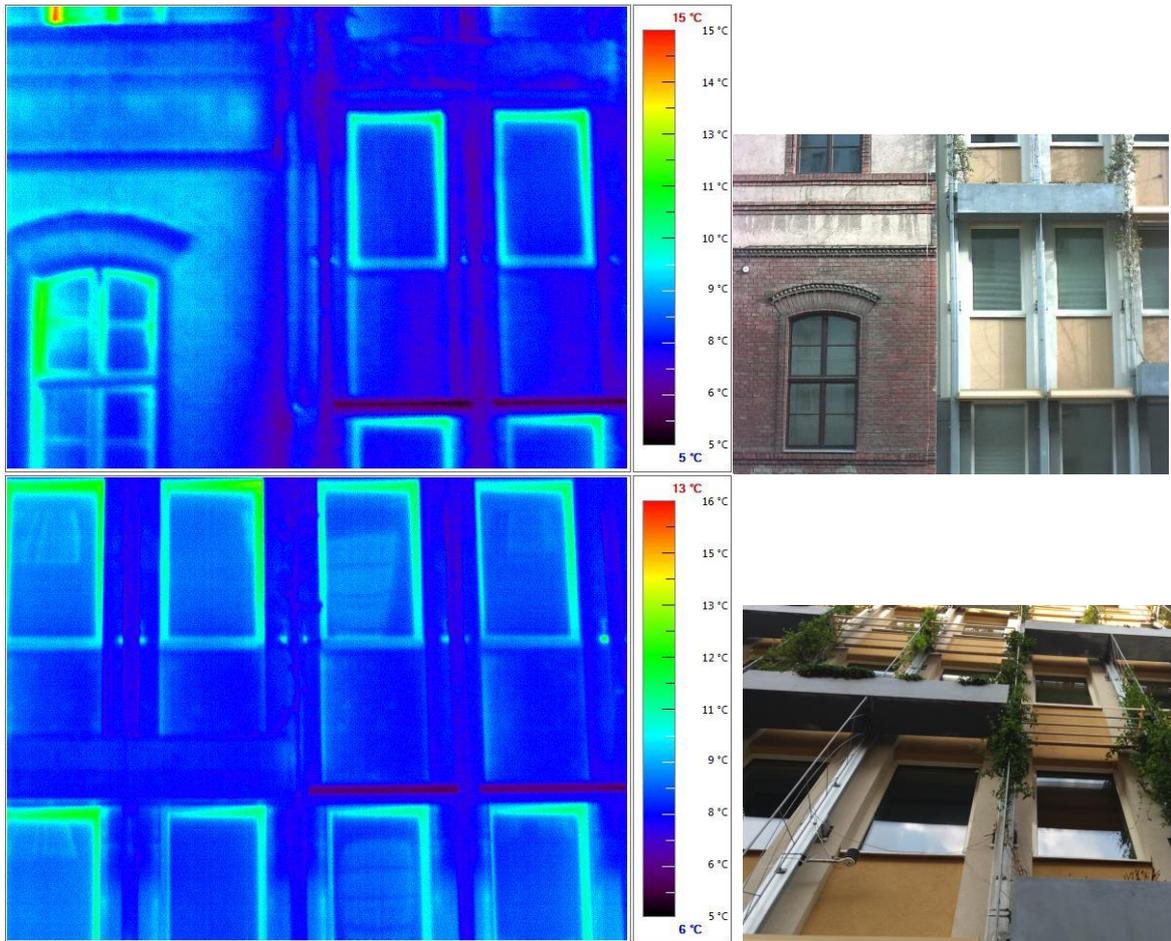


Abbildung 3: IR-Aufnahmen der Fassadenbegrünung der MA 31 in Wien, 2018.

Anhand der Messdaten aus den Jahren 2016 bis 2018 kann der stationäre U-Wert unter der Annahme eines weitestgehend eindimensionalen Wärmetransports aus dem Wärmestrom durch die Konstruktion und der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen oder unter Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände innen und außen und des Wärmedurchgangswiderstands der Konstruktion mit der Formel 1 berechnet werden. Der gesamte Wärmedurchgangswiderstand (R_T) ist die Summe der Übergangswiderstände (R_{se} und R_{si}) und der Wärmedurchlasswiderstände (R_i).

$$U = \frac{q}{T_i - T_e} = \frac{1}{R_T} \quad \text{mit} \quad R_T = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se} \quad (1)$$

U	stationärer U-Wert in $\text{W/m}^2\text{K}$
q	Wärmestrom in W/m^2
T_i	Innentemperatur in $^\circ\text{C}$
T_e	Außentemperatur in $^\circ\text{C}$
R_T	Wärmedurchgangswiderstand in $\text{m}^2\text{K/W}$

- R_i Wärmedurchlasswiderstand der Wand in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
 R_{si} Wärmeübergangswiderstand innen in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
 R_{se} Wärmeübergangswiderstand außen in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$

Die durch Mittelwertbildung der gesammelten Messdaten, bei ausreichend großer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, berechneten U-Werte in den ersten drei Jahren nach der Begrünung der Fassade zeigen eine geringfügige Verringerung von Jahr zu Jahr (siehe Tabelle 1). Das ist auf die Erhöhung der Grünmasse und die daraus folgende Erhöhung des äußeren Wärmeübergangswiderstandes zurückzuführen. Da die Fassade inhomogen begrünt ist, können diese Werte jedoch nicht für die gesamte Fassade herangezogen bzw. auf weitere Objekte übertragen werden.

Tabelle 1: Gemessene U-Werte der Fassadenbegrünung der MA 31 in den Jahren 2016, 2017 und 2018 nach der Errichtung der troggebundenen Fassadenbegrünung.

Gemessene U- Werte	
Jahr	U -Wert in $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
2016	0,16
2017	0,15
2018	0,13

Um die Verbesserung des Wärmeschutzes zufolge der Begrünung den negativen Auswirkungen zufolge der zusätzlichen Wärmebrücken gegenüberstellen zu können, wurde eine dreidimensionale Wärmebrückenberechnung der ausgeführten Stahl-Konsolen mit der Software AnTherm durchgeführt (siehe Abbildung 4) [12]. Da die gesamten vertikalen Lasten aus der Fassadenbegrünung über die vorgestellte Stahl-Konstruktion direkt in den Boden eingeleitet werden, ergibt sich für die Konsolen eine reine Normalkraft-Belastung und somit eine vergleichsweise geringe statisch erforderliche Anzahl an Konsolen pro Quadratmeter.

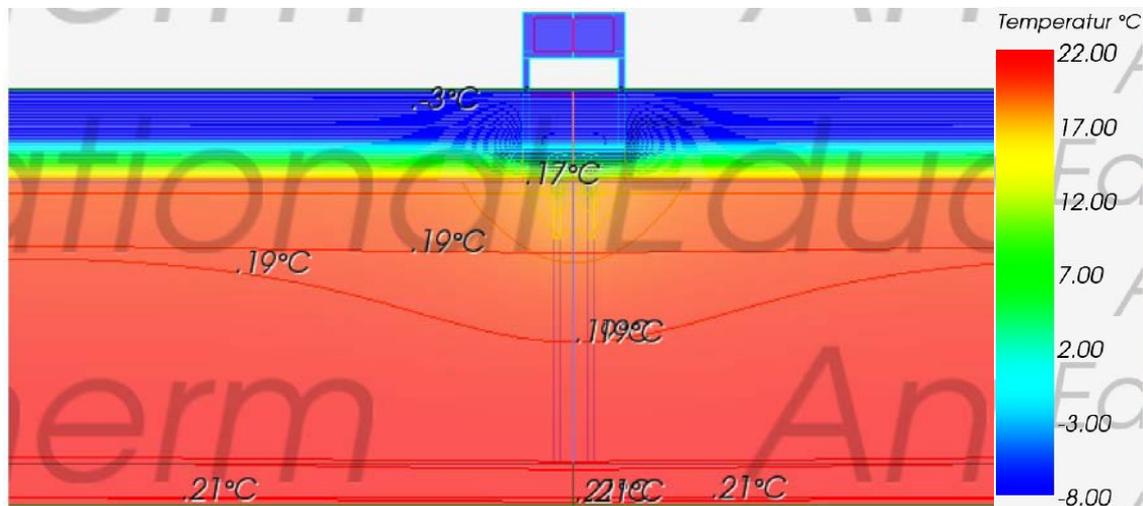


Abbildung 4: Verlauf der Isothermen im Bereich der Konsolen bei der Fassadenbegrünung der MA 31.

Der durch die Simulation bestimmte punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient χ einer einzelnen Konsole beträgt:

$$\chi = 0,071 \text{ W/K} \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung einer Anzahl von acht Konsolen auf der Referenzfläche von 13,5 m² (= 0,59 Konsolen je Quadratmeter) ergibt sich eine Veränderung des U-Wertes von:

$$\Delta U = c \cdot \chi = 0,042 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3)$$

ΔU Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten in W/(m²K)

c Anzahl der Befestigungselemente pro Quadratmeter

χ punktueller Wärmebrücken-Verlustkoeffizient in W/K

Aus dem Vergleich der berechneten Vergrößerung des U-Wertes zufolge zusätzlicher Wärmebrücken durch die Befestigungselemente mit der Verringerung zufolge der Dämmwirkung der Begrünung wird ersichtlich, dass sich die positiven und die negativen Effekte in etwa die Waage halten.

3.2. Fassadengebundene Begrünung im Bestand

Im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes, das sich mit der Umsetzung zahlreicher Begrünungsmaßnahmen an einem Gymnasium in der Kandlgasse im 7. Wiener Gemeindebezirk beschäftigte, wurden von 2016 bis 2018 Temperatur- und Wärmestrom-Messungen an zwei verschiedenen Begrünungssystemen an der Innenhoffassade des Schulgebäudes durchgeführt [13]. Die Auswertung der Messdaten hat ergeben, dass bei Begrünungssystemen mit kleineren Hinterlüftungsöffnungen die thermische Dämmwirkung der Außenwandkonstruktion stärker zunimmt, als bei Begrünungssystemen mit größeren Hinterlüftungsöffnungen (siehe Abbildung 5). Verblendungen an den Seiten und andere Maßnahmen, die das Durchströmen von Außenluft reduzieren, erhöhen die Dämmwirkung. Außerdem ist es von Vorteil, wenn das Begrünungssystem großflächig ist und möglichst wenige Unterbrechungen (Grenzflächen zur Außenluft) aufweist. Die Dicke und Bauweise des Begrünungssystems hat dabei eine kleinere Bedeutung.

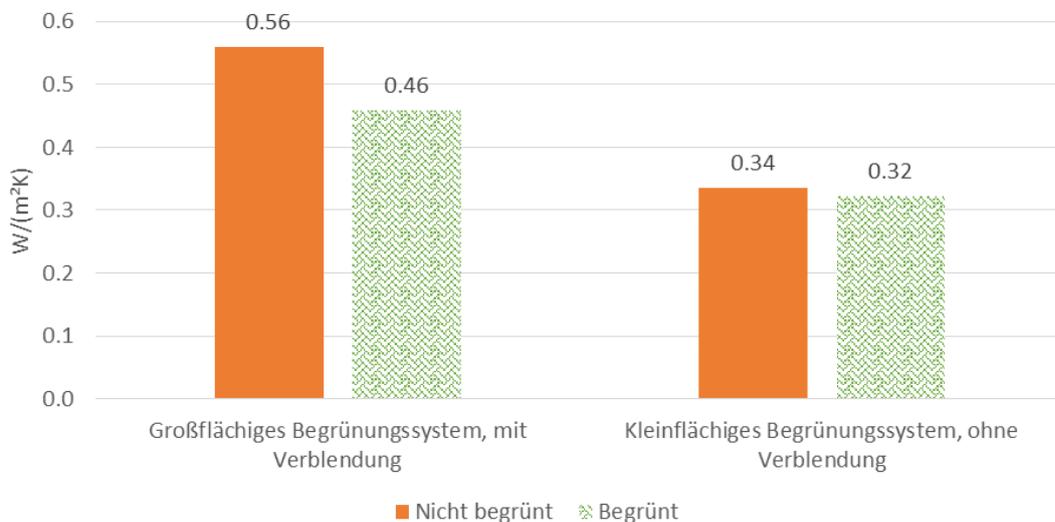


Abbildung 5: U-Werte der begrünter und der nicht begrünter Fassaden beim GRG7; links für das großflächige Begrünungssystem mit Verblendung und rechts für das kleinflächige Begrünungssystem ohne Verblendung.

Die Fassaden, an denen die untersuchten Begrünungssysteme montiert sind, weisen unterschiedliche Dämmqualitäten auf: Das großflächige Begrünungssystem mit Verblendung ist an einem Teil der Fassade montiert, der aus Vollziegeln besteht, während das kleinflächige Begrünungssystem ohne Verblendung an einer Außenwand aus Hochlochziegeln montiert ist. Dementsprechend unterscheiden sich die U-Werte der nicht begrünter Fassaden. Entscheidend, um die Auswirkungen der Fassadenbegrünung zu erkennen, ist der jeweilige Vergleich zwischen der begrünter und der nicht begrünter Fläche. Der zusätzliche Wärmedurchgangswiderstand aufgrund der Begrünung liegt beim kleinflächigen Begrünungssystem ohne Verblendung bei 0,12 m²K/W und beim großflächigen Begrünungssystem mit Verblendung bei 0,39 m²K/W. Das großflächige Begrünungssystem mit Verblendung bewirkt somit eine Verbesserung der Altbaumauer von etwa 20 %, das kleinflächige System ohne Verblendung lediglich eine Verbesserung von 6 %.

3.3. Fassadengebundene Begrünung an gedämmten Fassaden

Beim Folgeprojekt des in Abschnitt 3.2 angeführten Forschungsprojektes wurden an zwei weiteren Schulen in Wien zahlreiche Begrünungsmaßnahmen im Gebäude und an der Außenfassade umgesetzt [14]. In diesem Projekt wurden die Fassadenbegrünungen jedoch an wärmegeprägten Fassaden montiert, um auch für diesen Anwendungsfall Aussagen über die Beeinflussung der Dämmwirkung treffen zu können. In beiden Fällen handelt es sich hierbei um eher großflächige fassadengebundene Begrünungen, bei denen die Seitenflächen verblendet sind (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Kassettsystem am BRG15 Diefenbachgasse (li) und Trogsystem am BRG16 Schuhmeierplatz (re).

Die Auswertung der Messdaten zeigt eine geringfügige Erhöhung der Dämmwirkung im Bereich der fassadengebundene Begrünung, was bei einem Vergleich der blauen Balken (unbegrünte Referenzmessung) mit den grünen, schräg strichlierten Balken (Messung im Bereich der Begrünung, ohne Einfluss von Wärmebrücken) zu erkennen ist (siehe Abbildung 7).

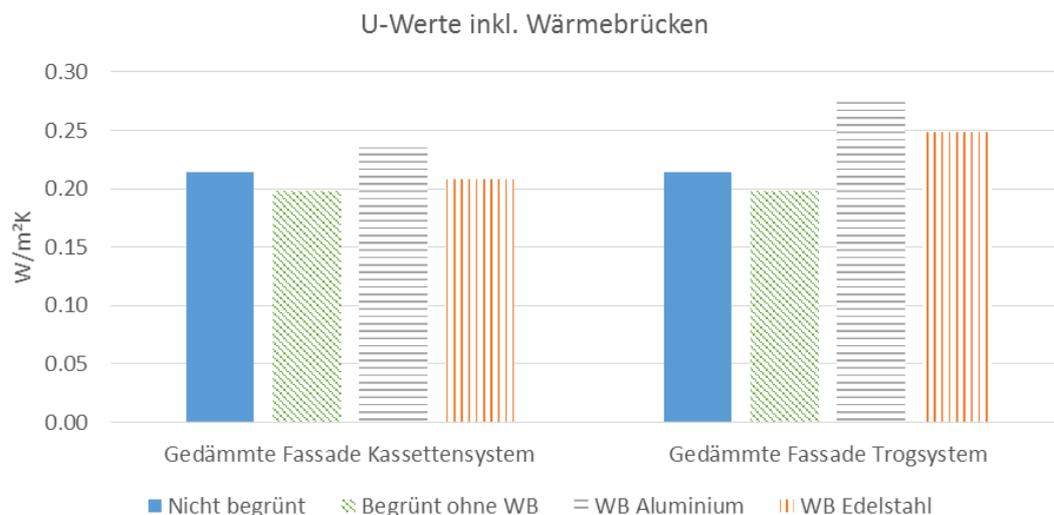


Abbildung 7: U-Werte für die untersuchten Schulgebäude mit gedämmten Fassaden für den begrünt und den nicht begrüntem Abschnitt der Fassade, mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken.

Der U-Wert im Bereich der nicht begrüntem Fassade (U_{NG}) wurde dabei mittels Formel 4 und jener im Bereich der begrüntem Fassade ohne Berücksichtigung von Wärmebrücken (U_G) mittels Formel 5 berechnet (siehe auch Abbildung 8), wobei der zusätzliche Wärmeübergangswiderstand R_{se} , aufgrund der fassadengebundene Begrünung (in der Formel als R_A bezeichnet) entsprechend den Ergebnissen aus dem Vorprojekt (siehe Abschnitt 3.2) mit $0.39 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ angesetzt wurde.

$$U_{NG} = \frac{1}{R_T} \quad (4)$$

$$U_G = \frac{1}{R_G} = \frac{1}{R_T + R_A} \quad (5)$$

- U_{NG} U-Wert der unbegrünten Referenzfassaden, ohne Berücksichtigung von Wärmebrücken (blaue einfarbig gefüllte Säulen in Abbildung 7)
- U_G U-Wert im Bereich der Fassadenbegrünungen, ohne Berücksichtigung von Wärmebrücken (grüne, diagonal strichlierte Säulen in Abbildung 7)
- R_T Gesamt-Wärmedurchgangswiderstand der unbegrünten Referenzfassaden
- R_G Wärmedurchgangswiderstand im Bereich der Fassadenbegrünungen, ohne Berücksichtigung von Wärmebrücken (durch Befestigungselemente)
- R_A Zusätzlicher Wärmeübergangswiderstand zufolge fassadengebundener Begrünung

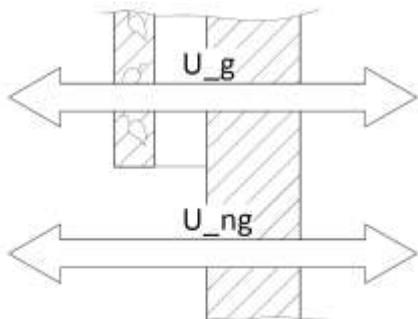


Abbildung 8: Darstellung der U-Werte U_G im Bereich der Begrünung (ohne Wärmebrücken) und U_{NG} in Bereichen ohne Begrünung.

Die grauen horizontal gestreiften und die orangen vertikal gestreiften Säulen in Abbildung 7 zeigen die U-Werte der begrünten Fassade, wenn die Wärmebrücken zufolge der Befestigungselemente (aus Aluminium bzw. Edelstahl) berücksichtigt werden (in Formel 6 als U_L -Wert bezeichnet). Die U-Wert-Veränderungen (ΔU -Werte), die sich aufgrund der entstanden Wärmebrücken ergeben, werden auf Basis der χ -Werte gemäß dynamischer Simulation in AnTherm wie in Formel 3 angegeben berechnet. Die ΔU -Werte beschreiben dabei jene Werte, die den U-Werten aufgrund der Wärmebrücken dazu addiert werden müssen (siehe Formel 6).

$$U_L = U_G + \Delta U \quad (6)$$

U_L U-Wert des begrünten Fassadenabschnittes unter Berücksichtigung der Wärmebrücken (grau horizontal gestreifte und orange vertikal gestreifte Säulen in Abbildung 7).

An gedämmten Fassaden wirken sich Wärmebrücken stärker aus als an nicht gedämmten Fassaden. Die untersuchten Fassaden an den beiden Schulen in der Diefenbachgasse und am Schuhmeierplatz in Wien sind gedämmte Fassaden. Die ΔU -Werte sind hier größer als $0,01 \text{ m}^2\text{K/W}$, wodurch diese Ausführungen nicht mehr als «wärmebrückenfrei» bezeichnet werden können. Die Wärmebrücken des Kassettensystems fallen geringer aus, weil das System weniger Verankerungen benötigt als das Trogsystem. Das liegt zum einen am geringeren Gewicht pro m^2 und zum anderen daran, dass in diesem Fall ein Teil der Last direkt nach unten auf die Dachterrasse abgeleitet werden kann.

Auch das Verankerungsmaterial ist ein einflussreicher Parameter für die Erhöhung des U-Wertes: Edelstahl leitet Wärme weitaus weniger gut als Aluminium, weshalb die Wärmebrücken deutlich geringer ausfallen, wenn die Verankerungen aus Edelstahl ausgeführt werden.

3.4. Fassadengebundene Begrünung mit Holz-Unterkonstruktion

International wurden bereits einige wenige Projekte mit einer Kombination von Fassadenbegrünung und Holzbau umgesetzt. Bei diesen Vorzeigeprojekten handelt es sich jedoch um individuelle, prototypische Lösungen für Neubauten: das gesamte Gebäudekonzept ist komplett auf diese Kombination ausgelegt und wird aus Imagegründen in den Vordergrund gestellt. Zu diesen Vorzeigeprojekten gehören bspw. das «25 Verde» [15] in Turin, Italien, mit einer Fassade aus Lärchenholz und Begrünung in Trögen oder das Headquarter von ASI Reisen in Natters, Österreich [16], welches vor der Pfosten-Riegel-Fassade aus Holz einen «grünen» Vorhang an einem Metallrahmen aufweist. Damit es nun also nicht bei diesen einzelnen Vorzeigeprojekten bleibt und eine vermehrte Umsetzung von Fassadenbegrünung auch im

Holzbau unterstützt wird, bedarf es demnach weiterer Untersuchungen, um zu zeigen, was notwendig ist, damit eine Fassadenbegrünung «risikolos» im Holzbau sowie auch an Bestandsgebäuden umgesetzt werden kann.

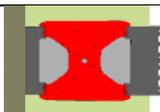
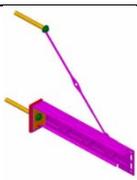
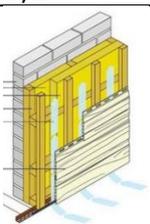
Aus diesem Grund werden am Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien der TU Wien bereits jetzt in einigen laufenden Forschungsprojekten Aspekte zur Begrünung von Holzbauten integriert. So werden im Projekt MehrGrüneSchulen [17] nicht nur Do-it-yourself Low-Cost-Begrünungslösungen aus Holz für die Anwendung in und an Schulgebäuden entwickelt, sondern es wurde auch eine Forschungsfassade am Camillo Sitte Bautechnikum in Wien errichtet, bei der unterschiedliche Begrünungssysteme mit einer Gesamtfläche von 76 m² auf einer vor die Dämmebene gestellten Holz-Unterkonstruktion montiert wurden. Diese Forschungsfassade, dargestellt in Abbildung 9, wird nun im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts messtechnisch untersucht.



Abbildung 9: Forschungsfassade mit unterschiedlichen Begrünungssystemen an einer Holz-Unterkonstruktion, umgesetzt am Camillo Sitte Bautechnikum in Wien im Rahmen des Forschungsprojekts MehrGrüneSchulen [17]

Die Musterumsetzung der Forschungsfassade, die finanziell von der Bundesimmobiliengesellschaft (BIG) unterstützt wurde, ist im November 2020 entstanden. Im Zuge der Planung wurde versucht, die Begrünungssysteme und die gesamte Fassadensanierung ökologisch und ökonomisch zu optimieren. Hierzu wurde unter anderem die Unterkonstruktion der Fassadenbegrünung unter die Lupe genommen, da diese bei üblichen Anwendungen eine maßgebliche Wärmebrücke darstellen kann. Tabelle 2 zeigt die Optimierungsvarianten zur Reduktion der Wärmebrücken der Unterkonstruktion, die innerhalb des Planungsteams diskutiert wurden.

Tabelle 2: Vergleich der U-Werte für verschiedene Varianten der Unterkonstruktion für die Fassadenbegrünungssysteme der Forschungsfassade am Camillo Sitte Bautechnikum in Wien.

Vergleich der U-Werte in W/(m ² K)					
Sanierte Wand	Schöck Isolink	Hilti Fox VT	EJOT-Winkelstütze	StoP-Fassadenanker	Holz-UK
0,171	0,176	0,182	0,191	0,197	0,206
100%	+ 3%	+ 6%	+ 12%	+ 15%	+ 20%
	6 Stk/m ²	4 Stk/m ²	2 Stk/m ²	4 Stk/m ²	B=12cm, alle 1,2m
					
	Gewindestangen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)	Konsole aus GFK	Schwerlastanker aus Edelstahl mit Zugseil	Konsole aus Edelstahl	Unterkonstruktion aus kreuzweisen Holzlatten

Auf Grundlage der durchgeführten Wärmebrückenberechnungen wurde entschieden, die Holz-Unterkonstruktion für die Fassadenbegrünungssysteme nicht innerhalb der Dämmebene anzuordnen, sondern direkt davor zu stellen, und die Verankerungen an der Bestandswand mit Edelstahl-Gewindestangen auszuführen. Da gemäß statischer Bemessung über die gesamte Fläche der Fassadenbegrünung (insgesamt 76 m²) nur 45 Gewindestangen (Durchmesser M16) zur Verankerung der Holz-Unterkonstruktion erforderlich sind, ergibt sich eine Erhöhung des U-Wertes von lediglich:

$$\Delta U = c \cdot \chi = \frac{45}{76} \cdot 0,018 = 0,011 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}), \quad (7)$$

wobei der punktuelle Wärmebrücken-Verlustkoeffizient χ auch hier mit der Software AnTherm unter Annahme einer Wärmeleitfähigkeit der Edelstahl-Gewindestangen von 15 W/mK berechnet wurde. Die errechnete Erhöhung des U-Wertes ist vergleichbar mit jener der Passivhaus-tauglichen Hilti Fox VT-Konsolen gemäß Tabelle 2.

4. Thematisch relevante bauphysikalische Forschungsergebnisse mit Bezug auf den Holzbau

Bisherige Umsetzungen von Fassadenbegrünungen sowie durchgeführte Forschungsprojekte und damit verbundene wissenschaftliche Untersuchungen erfolgten fast ausschließlich an Fassaden, bei denen die Grundkonstruktion der Außenwand aus Materialien wie Ziegel oder Stahlbeton besteht. Fassadenbegrünung im Holzbau fand bisher wenig bzw. keine Beachtung. Eine zentrale Frage, die sich daher stellt, lautet: «Welche bisherigen Untersuchungen und bauphysikalischen Forschungsergebnisse aus durchgeführten Projekten sind für Fassadenbegrünungen im Holzbau relevant und welche übertragbar?»

Aufgrund der bauphysikalischen Funktionsweise von wandgebundenen Fassadenbegrünungen als hinterlüftete Konstruktionen wird besondere Aufmerksamkeit der Untersuchung der Luftfeuchtigkeit und Temperatur im Hinterlüftungsspalt sowie brandschutztechnischen Aspekten, die in Verbindung mit dem Holzbau zunehmend an Bedeutung gewinnen, gewidmet:

- Hygrische Messungen im Hinterlüftungsspalt zwischen der ursprünglichen Fassade und dem Begrünungssystem am Gebäude der Magistratsabteilung 48 der Stadt Wien, welches mit einer teilflächigen wandgebundenen vertikalen Begrünung ausgestattet ist, haben gezeigt, dass die Feuchte-Problematik durch die Begrünung sogar entschärft wird: Die Luftfeuchtigkeit ist in Bereichen mit Begrünung geringer als in Bereichen ohne Begrünung, da das Begrünungssystem die Fassade vor der Witterung schützt, durch die Hinterlüftung aber von der Bestandswand entkoppelt ist. [18]
- Des Weiteren konnten Messungen der Luft- und Oberflächentemperatur an einer begrünten Südfassade und einer entsprechenden Referenzfassade (nicht begrünt) an einer Schule in Wien deutlich die Reduktion der Temperaturschwankungen durch die Fassadenbegrünung zeigen. Darüber hinaus wurde herausgestellt, dass Fassadenbegrünung die Temperatur direkt an der Fassade an kalten Tagen erhöht und an heißen Tagen im Sommer reduziert. [13]

Die Grundlage für die Einordnung von Fassadenbegrünungen bezogen auf den Brandschutz bieten die Ergebnisse von Brandversuchen der Magistratsabteilung 39 – Bauphysiklabor, welche in Anlehnung an die ÖNORM B 3800-5 durchgeführt wurden. Mit dem Ziel, entsprechend der OIB-Richtlinie 2 die mögliche horizontale und vertikale Brandweiterleitung über die Fassade zu verhindern, und das Brandverhalten der eingesetzten Systemkomponenten berücksichtigend, wurden auf Basis dieser Untersuchungen Vorgaben in Abhängigkeit der Gebäudeklasse formuliert. Für die Gebäudeklassen 1 bis 3 sind bezogen auf die Fassadenbegrünung keine besonderen Nachweise erforderlich. Für Gebäude mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m ist die Begrünung abgesehen von einzelnen Ausnahmefällen nicht zulässig. Brandschutztechnische Vorgaben für die Gebäudeklassen 4 und 5 sehen neben dem Einsatz nicht brennbarer Materialien (bspw. für Rankhilfen) einen vertikalen Schutzabstand von 100 cm zur Dachkonstruktion vor. Darüber hinaus werden nachweisfreie Ausführungen formuliert, in denen u.a. geschoßweise Brandabschottungen oder auch Fensteröffnungen berücksichtigt werden. [19]

Diese genannten Forschungsergebnisse können gleichfalls auf Fassadenbegrünungen im Holzbau übertragen werden. Zu beachten ist jedoch die Erhaltung der Dauerhaftigkeit der Konstruktion. Als Beispiel zu nennen ist die Ermöglichung der Erneuerung von brandschutztechnischen Anstrichen bei einer durch das Begrünungssystem verdeckten Außenwandkonstruktion. Bezüglich der erforderlichen Anstriche für den Holzschutz ist darüber hinaus auf eine Verträglichkeit der Pflanzen mit dem verwendeten Holzschutzmittel sowie auf dessen Biozidfreiheit zu achten.

5. Normative und Richtlinien

Seit April 2021 gibt es in Österreich eine Norm, die sich der Vertikalbegrünung im Außenraum widmet. Diese ordnet Holzwände als begrünbare Bauweise ein [8]. Ebenso sieht der Leitfaden Fassadenbegrünung der Stadt Wien Holzuntergründe als geeignete Fassadenoberflächen für eine Begrünung an [9]. Der Bundesverband GebäudeGrün e.V. [20], [21] empfiehlt lediglich eine Begrünung mit Gerüstkletterpflanzen und fassadengebundenen Systemen und rät von einer Begrünung mit Selbstklimmern ab. Dies ist in erster Linie damit begründet, dass einerseits bei Holzfassaden, insbesondere bei hinterlüfteten Holzverkleidungen, oft Fugen vorhanden sind, in welche die Pflanzen hineinwachsen können. Andererseits ist bei Eintritt von Feuchtigkeit in Holzfassaden ein höheres Schadensrisiko vorhanden, weshalb eine Begrünung mit Selbstklimmern eher als «nicht geeignet» einzustufen ist.

Die deutsche Fassadenbegrünungsrichtlinie der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) [10] enthält unter anderem allgemeine baukonstruktive und technische Anforderungen bzw. Voraussetzungen, die als Entscheidungshilfe zur Auswahl der Begrünung dienen. Bodengebundene Begrünung, also Begrünung mit Selbstklimmern und Gerüstkletterpflanzen, wird dabei nur empfohlen, wenn «keine offenen Fugen» vorhanden sind. Wandgebundene Begrünungen sind bei ausreichenden statischen Reserven der Außenwandkonstruktion auch im Holzbau möglich, sofern ein Hinterlüftungsspalt vorgesehen wird. Im Folgenden werden einzelne Wandaufbauten in Holzbauweise betrachtet und deren Begrünungsmöglichkeiten aufgezeigt (siehe auch Abbildung 10):

- Bei ungedämmten Außenwänden in Ständer- und Fachwerkbauweise sind Kletterhilfen für eine Begrünung mit Gerüstkletterpflanzen im Fachwerk als statisch wirksamer Bereich zu verankern.
- Bei gedämmten Außenwänden in Ständer- und Fachwerkbauweise ist darüber hinaus zu beachten, dass bei wandgebundener Begrünung oder Begrünung mit Gerüstkletterpflanzen notwendige Verankerungen im Fachwerk bereits bei der Gebäudeplanung vorzusehen sind sowie ausreichender Abstand zwischen der Sekundärkonstruktion für die Begrünung bzw. Kletterhilfen und der Fassade vorhanden ist. Es sollten wärmebrückenreduzierte Halterungen eingesetzt werden.
- Als dritte Variante werden gedämmte Außenwände als mehrschalige, hinterlüftete Wandaufbauten betrachtet. Wie bei allen anderen Varianten ist hier insbesondere darauf zu achten, dass spätere Instandhaltungstätigkeiten an der Holzfassade auch nach Erreichen des Begrünungsziels durchgeführt werden können und bspw. Holzschutzanstriche auch auf die Fassade hinter der Begrünung aufgebracht werden können, ohne diese zu beschädigen.

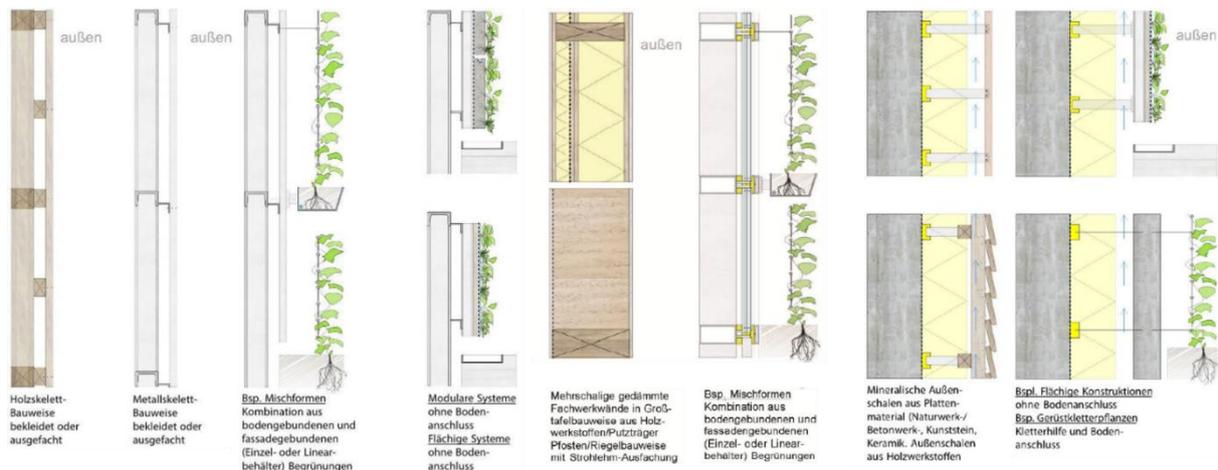


Abbildung 10: Unterschiedliche Bauweisen und deren Begrünungsmöglichkeiten nach der deutschen Fassadenbegrünungsrichtlinie der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) [10]

Die Befestigung von Rankhilfen für Kletterpflanzen kann an Holzfassaden auf unterschiedliche Weise ausgeführt werden (siehe Abbildung 11). Die wesentlichen Einflussfaktoren sind dabei einerseits die vorhandene Außenwandkonstruktion und deren Anforderungen hinsichtlich Brandschutz, Luftdichtheit, Optik etc. sowie andererseits das Gewicht und die Blattflächendichte der Pflanzen und die daraus entstehenden zusätzlichen Lasten (Eigengewicht, Wind, Schnee etc.). Gemäß [22] kann in folgende Ausführungsvarianten unterschieden werden:

- Die einfachste und günstigste, jedoch auch nur für kleine Seilsysteme und geringe zusätzliche Lasten geeignete Variante stellt die Befestigung in der Wandverkleidung durch Einschlagen oder Eindrehen kleiner Halterungen (z.B. Ösen-Schrauben) in die Außenschale als Direktbefestigung dar. Der maximal mögliche Abstand zwischen Begrünung und Fassade beträgt dabei jedoch 2 cm.
- Bei Außenschalen mit einem Hohlraum und der Möglichkeit zur Einführung von z.B. einem Hohlraumdübel stellt eine Hohlrumbefestigung eine weitere Möglichkeit zur Befestigung dar.
- Bei beidseitiger Zugänglichkeit der zu begrünenden Vertikalen (z.B. bei Geländern) ist die Durchsteckmontage der Rankhilfe in Form eines Gewindeschafts mit Gegenmutter möglich.
- Bei dünner Außenschale und hohen zu erwartenden Lasten ist eine Befestigung der Rankhilfen im Tragwerk notwendig. Hierbei ist insbesondere auf etwaige Folien oder Abdichtungen Rücksicht zu nehmen.
- Am häufigsten erfolgt die Befestigung von Rankhilfen in der Außenschale und der dahinterliegenden Holzlattung der Unterkonstruktion, wodurch ein größerer Materialquerschnitt zur Verfügung steht. Diese Art der Befestigung gilt zwar als stabil, jedoch auch als recht unflexibel, da der Verlauf der Rankseile von der Unterkonstruktion vorgegeben wird.

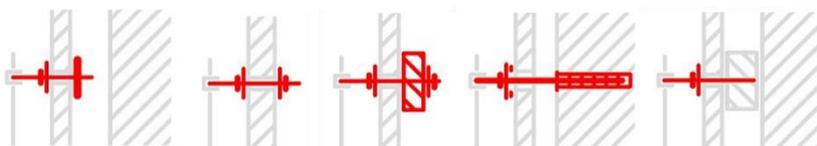


Abbildung 11: Befestigungsmöglichkeiten von Rankhilfen nach [22] von links nach rechts: Hohlrumbefestigung, Ranktechnik mit Durchsteckmontage (ohne und mit zusätzlicher Aussteifung), Befestigung im Tragwerk, Befestigung in Außenschale und Holzlattung.

6. Fazit und Ausblick

Generell ist festzuhalten, dass Fassadenbegrünung den U-Wert und somit den Wärmeverlust von Außenwandkonstruktionen reduziert. Erfolgt eine Befestigung der Fassadenbegrünung an der Außenwandkonstruktion, entstehen jedoch zusätzlich Wärmebrücken, die bei einer gesamtheitlichen Betrachtung der Auswirkungen der Fassadenbegrünung auf die thermische Qualität der Gesamtkonstruktion mitberücksichtigt werden müssen. An ungedämmten Fassaden sind diese Wärmebrücken normalerweise vernachlässigbar; an gedämmten Fassaden kann die Fassadenbegrünung aufgrund der Wärmebrücken deren thermische Qualität jedoch auch verschlechtern. Dabei ist zu beachten, dass eine Verblendung der Seitenflächen das Durchströmen des Hinterlüftungsspalts mit kalter Außenluft reduziert und somit die Dämmwirkung der Fassadenbegrünung erhöht. Außerdem ist es in Hinblick auf den Wärmeschutz von Vorteil, wenn das Begrünungssystem großflächig ist und möglichst wenige Unterbrechungen (Grenzflächen zur Außenluft) aufweist. Die Wirkung einer zusätzlichen, im Begrünungselement integrierten Dämmschicht ist hingegen sehr gering und kann lediglich bei ungedämmten Altbauten zu einer weiteren Reduktion der Wärmeverluste führen.

In Bezug auf die Ausführung der Unterkonstruktion für begrünte Fassaden können folgende Empfehlungen festgehalten werden:

- Systeme mit Stahl-Unterkonstruktion sind gegenüber Systemen mit Aluminium-Unterkonstruktion jedenfalls zu bevorzugen. Eine weitere Verringerung der Wärmebrückenwirkung kann durch Edelstahl- bzw. Kunststoff-Konsolen erzielt werden.
- Wenn möglich, sind die vertikalen Lasten direkt über die Begrünungs-Unterkonstruktion in den Boden abzuleiten, da somit die erforderliche Anzahl an Befestigungselementen stark reduziert werden kann.
- Die Dämmebene sollte nach Möglichkeit nur von stabförmigen Befestigungselementen (z.B. Gewindestangen) durchdrungen werden. Massive Konsolen sollten, wenn erforderlich, erst außerhalb der Dämmebene angeordnet werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass bei sorgfältiger Planung der Unterkonstruktion von begrünten, hinterlüfteten Fassaden deren Wärmebrücken auf ein Minimum reduziert werden können und sogar wärmebrückenfreie Konstruktionen (ΔU -Werte $< 0,01 \text{ m}^2\text{K/W}$) möglich sind. In jedem Fall sind jedoch die projektspezifischen Rahmenbedingungen gesondert zu berücksichtigen und durch einen fachlich spezialisierten (Grün-) Fassadenplaner entsprechende Lösungsvorschläge zu erarbeiten, die sowohl den statischen als auch den bauphysikalischen Belangen Genüge tun.

7. Literatur

- [1] United Nations - Department of Economic and Social Affairs/Population Division, «World Urbanization Prospects - 2014 Revision», New York, 2015.
- [2] M. T. Hoelscher, T. Nehls, B. Jänicke, und G. Wessolek, «Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation», Energy Build., Bd. 114, S. 283–290, 2016.
- [3] B. Raji, M. J. Tenpierik, und A. Van Den Dobbelsteen, «The impact of greening systems on building energy performance: A literature review», Renew. Sustain. Energy Rev., Bd. 45, S. 610–623, 2015.
- [4] M. R. Ismail, «Quiet environment: Acoustics of vertical green wall systems of the Islamic urban form», Front. Archit. Res., Bd. 2, Nr. 2, 2013.
- [5] D. Tudiwer und A. Korjenic, «The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade», Energy Build., Bd. 135, S. 10–19, 2017.
- [6] T. Van Renterghem, M. Hornikx, J. Forssen, und D. Botteldooren, «The potential of building envelope greening to achieve quietness», Build. Environ., Bd. 61, 2013.

- [7] R. W. F. Cameron, J. E. Taylor, und M. R. Emmett, «What's ,cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls», *Build. Environ.*, Bd. 73, S. 198–207, 2014.
- [8] ÖNORM L 1136:2021 04 01 -Vertikalbegrünung im Außenraum - Anforderungen an Planung, Ausführung, Pflege und Kontrolle. 2021.
- [9] F. Kraus u. a., LEITFADEN FASSADENBEGRÜNUNG. MA 22 - Wiener Umweltschutzabteilung - Bereich Räumliche Entwicklung, 2019.
- [10] FLL - Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., «Fassadenbegrünungsrichtlinien - Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen». S. 167, 2018.
- [11] TU Wien und BOKU Wien, «Forschungsbericht Vegetationstechnisches und bauphysikalisches Monitoring des «Vertikalen Gartens» der MA31 in der Grabnergasse 4-6, 1060 Wien», Wien, 2018.
- [12] F. Teichmann, «Beurteilung und Optimierung der Wärmebrücken bei begrünten hinterlüfteten Fassaden sowie Entwicklung eines Modells mit zusätzlich vorgelagerten PV-Modulen», Diplomarbeit an der TU Wien, Wien, 2018.
- [13] A. Korjenic u. a., «GrünPlusSchule@Ballungszentrum», Wien, 2018.
- [14] A. Korjenic u. a., «GRÜNEzukunftSCHULEN. Grüne Schuloasen im Neubau. Fokus Planungsprozess und Bestandsgebäude», Wien, 2020.
- [15] Architektur Fachmagazin, «Ein Baumhaus als urbaner Wohnraum – 25 Verde». [Online]. Verfügbar unter: <https://www.architektur-online.com/projekte/einbaumhaus-als-urbaner-wohnraum-25-verde>. [Zugegriffen: 17-Sep-2021].
- [16] ArchDaily, «ASI Reisen Headquarters / Snøhetta». [Online]. Verfügbar unter: <https://www.archdaily.com/946508/asi-reisen-headquarters-snohetta>. [Zugegriffen: 17-Sep-2021].
- [17] TU Wien Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien, «MehrGrüneSchulen». [Online]. Verfügbar unter: <https://www.obt.tuwien.ac.at/mehrgrueneschulen/projekt/>. [Zugegriffen: 25-Mar-2022].
- [18] D. Tudiwer, «Einflüsse vertikaler Gebäudebegrünung auf Wärmeschutz, sommerliche Überwärmung und hygrothermische Behaglichkeit», Technische Universität Wien, 2019.
- [19] D. Werner, G. Pommer, K. Danzinger, und S. Pomper, «Studie zum Thema, Brandverhalten von Grünfassaden in großmaßstäblichen Versuchen», Wien, 2018.
- [20] FBB Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V. (FBB), «Grüne Innovation Fassadenbegrünung», Saarbrücken, 2011.
- [21] Bundesverband GebäudeGrün e.V., «Planungshinweise». [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gebaeudegruen.info/gruen/fassadenbegruenung/planungshinweise>. [Zugegriffen: 17-Sep-2021].
- [22] FassadenGrün, «Sonder- und Holzfassaden». [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fassadengruen.de/uw/rankhilfen/uw/ranktechnik/holzfassaden.html>. [Zugegriffen: 18-Okt-2021].

Bauwerkintegrierte Photovoltaik in Fassaden – energetische Bilanzierung

Christian Popp
TU Dresden, Institut für Baukonstruktion
Dresden, Deutschland

Dorothea Koallick
TU Dresden, Institut für Baukonstruktion
Dresden, Deutschland

Bernhard Weller
TU Dresden, Institut für Baukonstruktion
Dresden, Deutschland



Bauwerkintegrierte Photovoltaik in Fassaden – energetische Bilanzierung

1. Bauwerkintegrierte Photovoltaik in Fassaden

Photovoltaik(PV)-Module können additiv am Gebäude montiert oder in die Gebäudehülle integriert werden. Die additive Montageform der PV wird als *Building applied Photovoltaic* (BAPV) bezeichnet während die Bauwerksintegration der PV in die Gebäudehülle als *Building integrated Photovoltaic* (BIPV) benannt wird. Fassadenintegrierte Photovoltaik zählt zur BIPV und ersetzt konventionelle Fassadenbekleidungen durch PV-Module. Normativ spricht man nach der EN 50583 von BIPV, «wenn PV-Module eine konstruktive Komponente des Gebäudes darstellen und eine der in der Europäischen Richtlinie für Bauprodukte CPD 89/106/EWG definierten Funktionen erfüllen». Das BIPV-Modul übernimmt demnach relevante Gebäudefunktionen, wie mechanische Festigkeit und strukturelle Integrität, primärer Witterungsschutz gegen Regen, Schnee, Wind und Hagel, Energieeinsparung, Abschattung, Tageslichtbeleuchtung, Wärmedämmung, Brandschutz oder Schallschutz. Zeitgleich werden die sonst ungenutzten Flächen zur Energiegewinnung aktiviert. Abbildung 1 stellt die möglichen BIPV-Montagemöglichkeiten nach EN 50583 dar, wobei sich die Varianten 1 und 2 (v. l.) auf Dachsysteme beziehen, die Varianten 3 und 4 (v. l.) als BIPV-Fassadenintegration einzuordnen sind und Variante 5 (v. l.) in der Regel Sonderfälle der Fassadenintegration, wie PV-Sonnenschutzsysteme oder Balkonbrüstungen darstellt. [1]

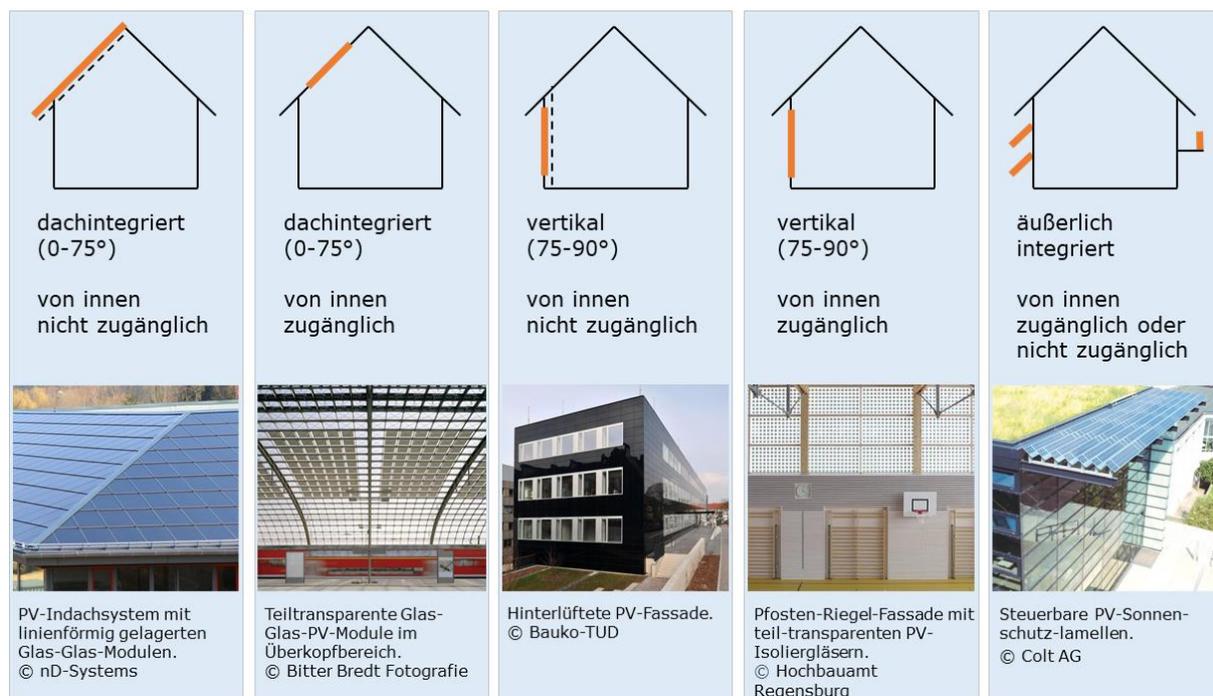


Abbildung 1: Montagemöglichkeiten der bauwerkintegrierten Photovoltaik nach EN 50583.

Die normative Definition lässt jegliche gestalterischen Anforderungen unberücksichtigt. Gerade bei der Fassade als «Gesicht» des Gebäudes sind jedoch die visuellen Anforderungen und der regionale, städtebauliche und soziokulturelle Kontext von hoher Bedeutung. Laut Krippner sind daher für eine erfolgreiche Integration von Solaranlagen in das Gebäude «wesentlich im Sinne einer architektonischen Integration [...] neben den baukonstruktiven und energetischen Aspekten die schlüssige Einbindung in ein übergeordnetes Gestaltungskonzept.» [2].

Die Fassade stellt die Trennschicht zwischen dem Innenraum und der Außenumgebung dar. Gleichmaßen bildet sie das Gesicht und prägt die Außenwirkung eines Gebäudes. Sie muss ihre Schutzfunktionen vor u. a. schwankenden Witterungsbedingungen, Schall-

quellen, Staub- und Luftverunreinigung, mechanischen Beanspruchungen und elektromagnetischer Strahlung erfüllen und zusätzlich den soziokulturellen Ansprüchen des regionalen städtebaulichen Kontexts gerecht werden. Dies führt dazu, dass konstruktive, bauphysikalische aber auch ästhetische Anforderungen an eine Fassade gestellt werden. Diese müssen gleichermaßen berücksichtigt werden, um eine sichere Konstruktion zu entwickeln, die an die örtlichen klimatischen Gegebenheiten angepasst ist und so Energieeinsparung und ein behagliches Raumklima ermöglicht, jedoch auch den regionalen städtebaulichen Kontext widerspiegelt. [3, S. 18] Bei der Integration von Photovoltaik in die Fassade werden weitere elektrische, ertragsbedingte und wirtschaftliche Anforderungen relevant. Das führt zu einer erhöhten Komplexität bei der Planung der Anlagen und kann Konflikte zwischen den Gewerken und Fachdisziplinen erzeugen. So kann sich z. B. die Fokussierung auf die Wirtschaftlichkeit zu Lasten der Ästhetik auswirken. Umgekehrt können lokale Besonderheiten, der städtebauliche Kontext sowie der Denkmal- und Umgebungsschutz eine gestalterisch besonders anspruchsvolle BIPV-Integration erfordern bzw. diese gänzlich versagen.

Die Potentiale von PV-Fassaden werden bereits seit den 1990er Jahren erforscht [4], [5] und bereits im Jahr 1991 erfolgte mit dem Verwaltungsgebäude des Energieversorgers STAWAG Stadtwerke Aachen die weltweit erste Anwendung und Errichtung einer fassadenintegrierten Photovoltaikanlage [2], [6]. Die PV-Anlage mit polykristallinen Solarzellen in Isolierverglasungen ist heute, über 30 Jahre nach ihrer Errichtung, noch in Betrieb und nahezu im ursprünglichen Zustand, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. [7]



Abbildung 2: PV-Pfosten-Riegel-Fassade am STAWAG-Gebäude in Aachen. (Foto: STAWAG.)

Innerhalb der letzten 30 Jahre gab es eine Reihe an technologischen Entwicklungen in den Bereichen der Elektrotechnik, Konstruktion, Fertigung und Gestaltung. Eine Vielzahl individueller Objekte mit BIPV-Fassaden belegen, dass inzwischen für alle gebräuchlichen Formen der Fassadenkonstruktionen und Gebäudetypen BIPV-Lösungen entwickelt und realisiert wurden. Zudem wird beim Vergleich der PV-Fassaden am STAWAG-Gebäude (Abbildung 2) und am Walther-Hempel-Bau der TU Dresden (Abbildung 3) deutlich, dass der gestalterische Anspruch aber auch die technischen Möglichkeiten, um diesen zu wahren, sich stark weiterentwickelt haben.



Abbildung 3: Hinterlüftete Photovoltaik-Fassade am Walther-Hempel-Bau der TU Dresden. (Foto: Bauko TUD.)

2. Aspekte von BIPV-Fassaden

2.1. Ertragssituation

Die Sonnenstrahlung als Antrieb des photovoltaischen Effekts unterliegt naturgemäßen Schwankungen. Neben den Tag- und Nachtzeiten aufgrund der Erdrotation entstehen durch die Neigung der Erdrotationsachse die Jahreszeit, die sich in den solaren Strahlungsintensitäten, Einstrahlungswinkeln und den Witterungsbedingungen stark unterscheiden. Zusätzlich erhalten Regionen auf der nördlichen Erdhalbkugel in den nördlicheren Breiten geringere absolute Jahreseinstrahlungswerte als weiter südlich beziehungsweise äquatorial gelegene Standorte. Auch in Deutschland zeigt sich dies, wobei nördlich gelegene Standorte (z. B. Hamburg) rund 15 % weniger Solarstrahlung pro Jahr erreichen als südlich gelegene Standorte (z. B. Garmisch-Partenkirchen). [8, S. 86 ff.]

Neben dem Standort ist jedoch auch die Flächenorientierung und Neigung der PV-Module entscheidend für den Ertrag. Hier besitzt die Einbausituation in der Fassade in der Regel geringere Einstrahlungswerte und PV-Erträge als optimal ausgerichtete Dachsysteme. Da jedoch nicht immer eine optimale Orientierung der Dachflächen vorliegt und diese aufgrund von Einbauten, Dachgauben oder begrenzter Fläche nicht (ausreichend) genutzt werden können, lohnt sich die Betrachtung der Fassade, da hier immer eine Gebäudefläche Richtung Süden orientiert ist. So zeigt Abbildung 4, dass der Jahresertrag einer Südfassade vergleichbar zu ostorientierten Dachflächen und darüber hinaus gleichmäßiger über das Jahr verteilt ist. Gerade in den Wintermonaten und in der Übergangszeit, wenn ein hoher Energiebedarf besteht, besitzt die Südfassade Vorteile gegenüber west- und ostorientierten Dachflächen. Somit sind PV-Fassaden im Hinblick auf einen möglichst hohen Deckungsgrad des Gebäudeenergiebedarfs eine sinnvolle Alternative bzw. Ergänzung zu dachintegrierten PV-Systemen.

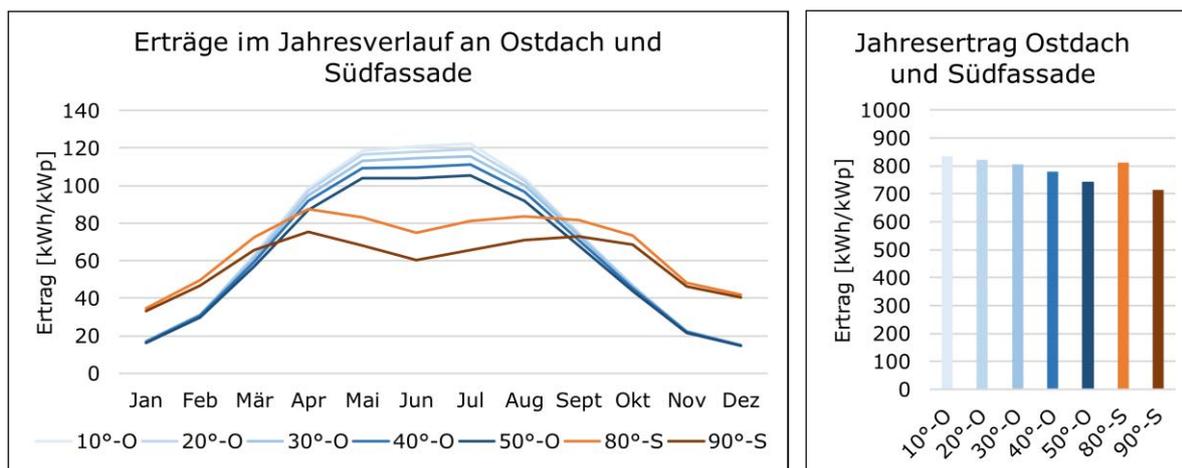


Abbildung 4: PV-Erträge pro kWp installierter Anlagenleistung in Potsdam an ostorientierten Dachflächen und an Südfassaden. (Daten: PVGIS © European Union, 2001-2021.)

Die aktuellen Energieszenarien zur Reduktion bzw. Vermeidung fossiler und nuklearer Energieträger basieren auf der Steigerung der erneuerbaren Energien in Kombination mit Energiespeicherung und -umwandlung, der Nutzung flexibler Verbraucher und der Kopplung der Verbrauchssektoren (z. B. Wärme und Elektrizität). [9] Aufgrund der beschriebenen tages- und jahreszeitbedingten Schwankungen der Solarstrahlung sind für diesen Transformationsprozess ein stärkerer Ausbau der erneuerbaren Energien und eine stetigere PV-Stromproduktion mit Erträgen in Frühjahr und Herbst sowie in den Morgen- und Abendstunden notwendig. [10]

Die Aktivierung der (Süd-)Fassaden durch BIPV fördert dies und baut so die Erträge abseits der sommerlichen PV-Stromerzeugungsspitzen aus. Darüber hinaus ermöglichen intelligentes Lastmanagement und flexible Verbraucher die Orientierung des Energieverbrauchs am Energieertragsprofil und damit die Steigerung des objektspezifischen Ausnutzungsgrads der BIPV-Systeme. [11] Zusätzlich reduziert diese gezielte Flächenbelegung den lokalen Netzstrombezug und die Netzeinspeisung, was in Kombination mit Batteriespeichern und Lastmanagementsystemen die Stromnetze entlastet. [2, S. 26 ff.]

2.2. Wirtschaftlichkeit

Mit der im Jahr 2000 im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) eingeführten EEG-Vergütung wurde der von PV-Anlagen ins Netz eingespeiste Strom bundesweit finanziell vergütet, wodurch die solare Stromerzeugung an Wirtschaftlichkeit und Nachfrage gewann. Gut geplante und ertragreiche PV-Anlagen stellten seitdem aufgrund der für 20 Jahre festgelegten Vergütung planbare Investments mit profitablen Renditen dar. Seit Anfang der 2000er Jahre wurde die EEG-Vergütung jedoch schrittweise verringert und verlor inzwischen jede förderpolitische Wirkung. [12, S. 39]

Zeitgleich ist ein Ansteigen der Strompreise zu beobachten. So wurde Anfang 2012 für Haushalte mit kleineren PV-Anlagen die Netzparität erreicht – der mit einer Photovoltaikanlage erzeugte Strom bzw. die EEG-Vergütung liegen seitdem unter dem Preis des Netzstroms (siehe Abbildung 5, links). Während es vor der Netzparität wirtschaftlicher war, möglichst hohe PV-Erträge zu erzeugen und diese direkt ins Netz einzuspeisen, ist es seitdem rentabler, möglichst viel des produzierten PV-Stroms selbst zu verbrauchen. Die Substitution des Netzstroms durch eigenen PV-Strom rückte somit in den Fokus der Betreiber:innen von PV-Anlagen. Im Zuge enormer Energiepreissteigerungen im Frühjahr 2022 wurde die endgültige Abschaffung der EEG-Vergütung beschlossen. [13] Dies wird die Bedeutung des Eigenverbrauchs nochmals steigern.

Betrachtet man die Entwicklung der Stromgestehungskosten unterschiedlicher Technologien in den letzten Jahren, so ist zu beobachten, dass die Kosten fossiler Stromerzeugung zunehmend angestiegen sind, während die Stromgestehungskosten erneuerbarer Technologien wie Wind und Photovoltaik stetig gesunken sind (siehe Abbildung 5, rechts). Die sinkenden Stromgestehungskosten der PV sind vor allem auf stark sinkende Investitionskosten von PV-Anlagen zurückzuführen, die sich zwischen 2008 und 2019 unabhängig von

der Anlagengröße mehr als halbiert haben. Grundsätzlich bestehen bei den Anlagenpreisen jedoch starke Preisschwankungen, wie eine bundesweite Preisermittlung zwischen 2017 und 2018 ergeben hat. Im Mittel sinken die Kosten jedoch mit der Anlagengröße. Während die Kosten einer 2 kWp-Anlage bei etwa 2000 €/kWp lagen, kostete eine 10 kWp-Anlage etwa 1600 €/kWp. [14, S. 8 ff.]

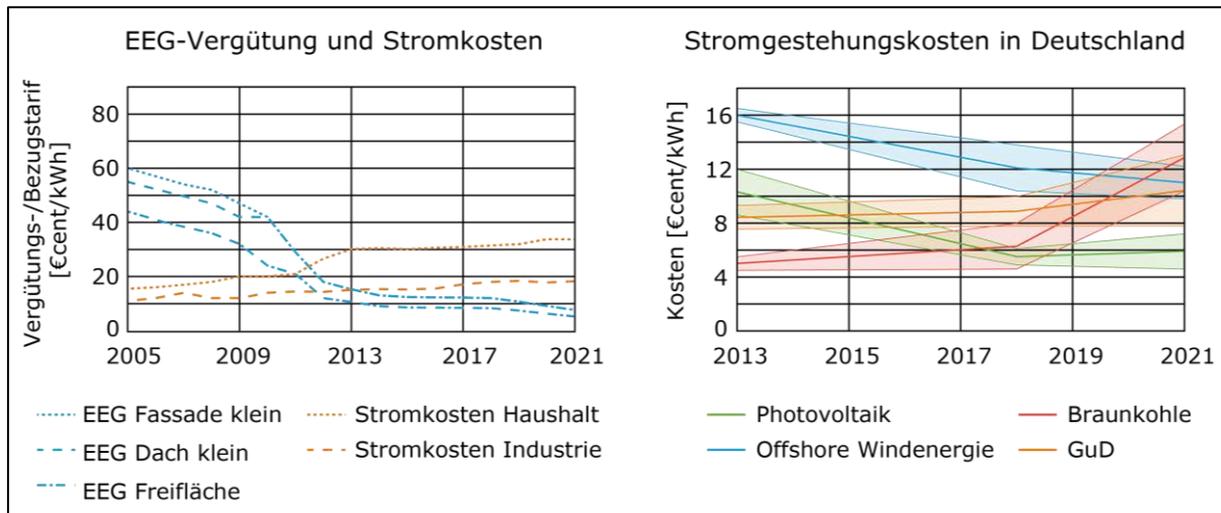


Abbildung 5: Links: Entwicklung EEG-Vergütung und Strompreise. (Daten: Solarenergie Förderverein Deutschland e.V. und Statista.)

Rechts: Entwicklung der Stromgestehungskosten unterschiedlicher Technologien. (Daten: Fraunhofer ISE.)

Diese Prognose lässt sich auch auf den Bereich der fassadenintegrierten Photovoltaik übertragen. Allerdings treffen dort die Bereiche des Bauwesens und der Energiewirtschaft und damit unterschiedliche Bewertungsansätze aufeinander. Während im Bauwesen oft nur die Investitionskosten im Fokus stehen, wird in der Energiewirtschaft die Investition zusammen mit der gesamten Nutzungsphase und darin anfallenden Kosten und Gewinnen bilanziert. Dadurch lässt sich auch die Amortisation einer Investition, also der Zeitpunkt, an dem die aufgewendeten Investitionskosten durch den Ertrag einer Anlage erwirtschaftet wurden, ermitteln.

Pauschale Aussagen zur Ökonomie von BIPV-Systemen sind allerdings mit einer größeren Unsicherheit behaftet. Dies liegt an der großen Preisspanne der verfügbaren BIPV-Systeme, allgemein hohen Preisschwankungen im Baubereich, einer Vielzahl an Ausführungsvarianten und gebäudespezifischen Ertragssituationen sowie Stromnutzungskonzepten. Präzise Aussagen zur Wirtschaftlichkeit einer BIPV-Anlage können daher nur fallspezifisch für definierte Systemrandbedingungen getroffen werden.

Betrachtet man die Investitionskosten einer BIPV-Fassade und eines konventionellen Fassadensystems, ist die Vergleichsführung entscheidend. So sind die Investitionskosten pro Quadratmeter einer hinterlüfteten CIGS-PV-Fassade etwa doppelt so hoch wie die einer hinterlüfteten Fassade mit Holz- oder Aluminiumbekleidung. Dies ändert sich jedoch beim Vergleich der CIGS-PV-Fassade mit architektonisch und konstruktiv anspruchsvolleren Fassadensystemen. Dort liegen die Investitionskosten der CIGS-PV-Fassade in einem ähnlichen Bereich wie die hinterlüfteter Fassaden mit Faserzement- oder Glasbekleidung und können sogar nur halb so hoch sein wie die einer hochwertigen Natursteinfassade. [15, S. 70 ff.]

Die fortschreitende Sektorenkopplung zwischen Strom, Wärme und Verkehr, steigende Strom- und Energiepreise sowie sinkende Investitions- und Stromgestehungskosten bei der Photovoltaik verstärken somit die Rentabilität von PV-Systemen in den letzten Jahren. Zukünftige Entwicklungen, wie der seit Januar 2021 eingeführte CO₂-Preis, der in den kommenden Jahren stetig steigen wird, werden diesen Trend weiter verstärken. [16] Auswirkungen politischer Entwicklungen und Spannungen, wie sie im Zuge des Angriffskriegs von Russland auf die Ukraine im Frühjahr 2022 auftraten, verstärken die Bedeutung einer unabhängigen und fossilsfreien Energieversorgung und bringen die erneuerbaren Energien zusätzlich in den Fokus von Politik und Gesellschaft. Somit ist mit einer zunehmenden

Förderung, Nachfrage und Wirtschaftlichkeit von BIPV-Systemen zu rechnen. So wurde für Deutschland unter Berücksichtigung der EEG-Vergütung prognostiziert, dass eine Investition im Jahr 2030 in eine BIPV-Fassadenanwendungen in Abhängigkeit des Gebäudenutzungsprofils und des BIPV-Fassadentyps eine Rendite zwischen 7,3 % und 9,3 % erzielt. [17, S. 36] Dies spiegelt sich auch in einer aktuellen Marktanalyse wider, die für den globalen BIPV-Markt ein Wachstum um 23,9 % zwischen 2020 und 2025 prognostiziert. [18, S. 1]

2.3. Flächenpotentiale der Fassade

Um den gesamten Energiebedarf Deutschlands mit erneuerbaren Energien zu decken, werden mehr Photovoltaikflächen benötigt. Die fassadenintegrierte PV kann hierfür einen entscheidenden Beitrag leisten. Wenn Dachflächen nicht ausreichen bzw. nicht nutzbar sind, kann (zusätzlich) die Fassade mit PV aktiviert werden. Hierbei sollte aufgrund der in Kapitel 2.1 beschriebenen Vorteile die Südfassade favorisiert werden.

Darüber hinaus besitzt die fassadenintegrierte PV das Potential, einen Kernbestandteil der deutschlandweiten Versorgung mit erneuerbaren Energien zu bilden. So wäre gemäß einer Studie das 2015 theoretisch nutzbare PV-Flächenpotential der Fassaden in Deutschland ausreichend, um den gesamten elektrischen Energiebedarf des Landes in diesem Jahr zweimal zu decken. [19, S. 250] Eine weitere Studie ermittelte deutschlandweit insgesamt 5000 km² BIPV-Modulfläche an Gebäuden, von denen 56 % Dächern und 44 % Fassaden zugeordnet werden. BIPV an diesen Flächen würde 742 TWh Solarstrom pro Jahr erzeugen. [20, S. 852 ff.] Die potentiellen BIPV-Erträge dieser Studie sind etwas geringer, dennoch liegen sie um den Faktor 1,4 über dem Stromverbrauch Deutschlands, der von 2015 bis 2030 durchschnittlich 517 TWh betragen wird. [21, S. 73]

Der Europäischen Union zufolge sind 75 % des Gebäudebestands in der EU nicht energieeffizient [22] und müssen im Zuge des Green Deals in den kommenden Jahren energetisch saniert werden [23]. Hier besteht ein enormes Potential an ungenutzten Gebäudeflächen, die durch BIPV-Integration zur Erzeugung erneuerbarer Energien aufgewertet werden können. Die größten Fassadenflächen liegen gemäß einer weiteren BIPV-Potentialanalyse [24] zu 60,06 % an Wohngebäuden, 22,23 % an Gewerbe und Industriebauten und 4,93 % an Gebäuden für Land- und Forstwirtschaft.

2.4. Ökologische Vorteile von BIPV

Gemäß der Novelle des Klimaschutzgesetzes der Bundesregierung wird ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand bis zum Jahr 2045 angestrebt. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die am Bau Beteiligten Emissionen und Fehlinvestitionen in nicht zielführende Technologien vermeiden – „Energieeffizienz und die Integration erneuerbarer Energien im einzelnen Gebäude [sind] die wesentlichen Eckpfeiler“ [25, S. 44]. Der Stromverbrauch Deutschlands wird im Jahr 2050 trotz der wachsenden Elektrifizierung im Gebäudebereich und im Verkehrssektor aufgrund von steigenden Effizienzmaßnahmen ähnlich hoch wie der aktuelle Verbrauch sein. [21, S. 28] Um die Ziele des Klimaschutzgesetzes zu erreichen, ist aber eine komplette Umstellung auf erneuerbare Energien notwendig. [25, S. 17 f., 44 ff.], [26, S. 5]

Wie aus Abbildung 6 hervorgeht, liegen die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen einer PV-Dachanlage um den Faktor 16,6 unter denen der Steinkohle und um den Faktor 10 unter denen von Erdgas. Wird eine Kilowattstunde (kWh) Steinkohlestrom durch eine Kilowattstunde Photovoltaikstrom ersetzt, werden rund 780 g CO₂-Äquivalent eingespart. Diese eingesparten 780 g CO₂-Äquivalent entsprechen wiederum dem Treibhauspotential von zusätzlichen 15,6 kWh Photovoltaikstrom. Mit identischen Emissionen lassen sich somit entweder 16,6 kWh PV-Strom oder 1 kWh Steinkohlestrom erzeugen. [10, S. 47 f.], [27]

Durch die Versorgung mit gebäudenahe erzeugter regenerativer Energie werden folglich fossile Energieträger verdrängt, was den Ressourcenverbrauch und die Emissionen zur Konditionierung der Gebäude während der Nutzungsphase reduziert. Außerdem beträgt die Energierücklaufzeit, also der Zeitraum, in dem eine PV-Anlage die Energie, die zur Produktion des Systems benötigt wurde, selbst produziert hat, im europäischen Durchschnitt nur etwa 1 Jahr. [10, S. 36]

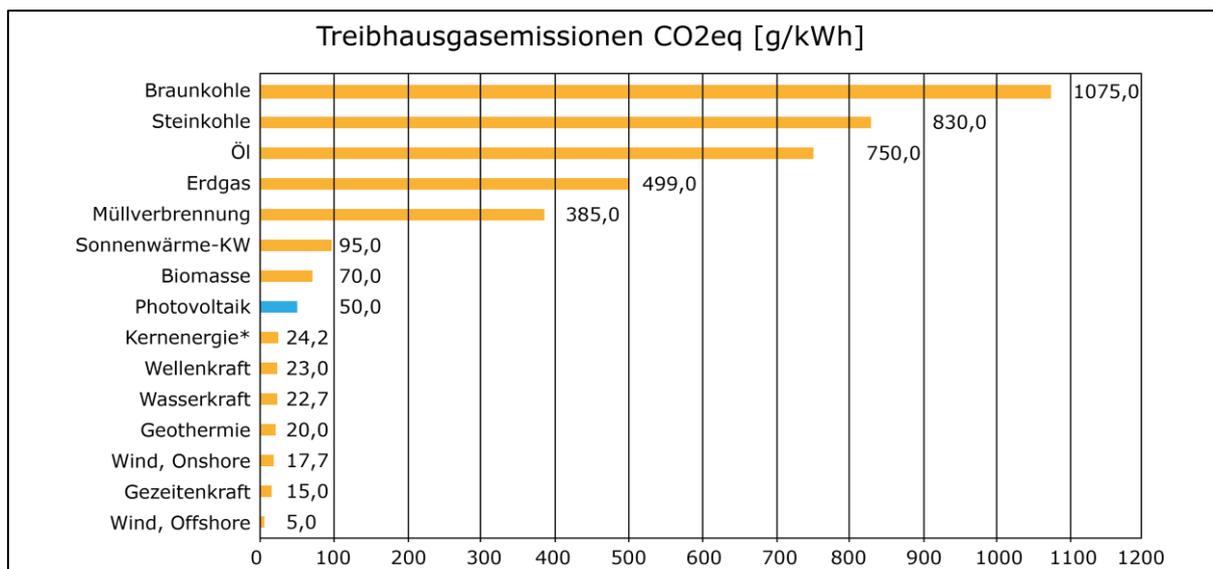


Abbildung 6: Durchschnittliche CO₂eq-Emissionen verschiedener Stromerzeugungstechnologien und Energieträger. Emissionen einzelner Technologievarianten wurden zur Haupterzeugungsform zusammengefasst.

* Ohne Einbeziehung der Endlagerung von Atommüll.

(Quelle: EnergieAgentur.NRW.)

3. Energetische Bilanzierung von PV-Fassaden

3.1. Bilanzierung nach Gebäudeenergiegesetz

Aktuell schreibt die EU-Gebäuderichtlinie noch das *Niedrigstenergiegebäude* als den geltenden energetischen Standard für neue Gebäude vor. Dieses *Niedrigstenergiegebäude* sieht ein sehr energieeffizientes Gebäude vor, dessen verbleibender geringer Energiebedarf in einem hohen Grad aus erneuerbaren und standortnah erzeugten Energien gedeckt wird. Für die Umsetzung dieser Definition sind die jeweiligen Mitgliedsländer der Europäischen Union selbst zuständig. [28]

In Deutschland erfolgt die Umsetzung seit November 2020 durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG), das die Energieeinsparverordnung (EnEV), das Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz (EEWärmeG) und das Energieeinsparungsgesetz (EnEG) ersetzt. Gemäß § 23 des GEG darf PV-Ertrag, der in unmittelbarem räumlichen Zusammenhang zum Gebäude erzeugt und vorrangig dort genutzt wird, zu einem gewissen Anteil direkt vom Jahresprimärenergiebedarf abgezogen werden. Für diese Anrechnung schreibt das GEG eine differenzierte Vorgehensweise vor. So ist bei Gebäuden mit Stromdirektheizung und bei Nichtwohngebäuden, deren Strombedarf größer als der Energiebedarf für die Heizung ist, der monatliche Ertrag dem Bedarf nach DIN V 18599-9 gegenüberzustellen, wobei der Referenzklimastandort Potsdam und Standardwerte zu Nennleistung des PV-Moduls anzusetzen sind. Der anrechenbare Stromertrag wird nicht begrenzt. Liegt keine Stromdirektheizung vor und ist der Strombedarf bei Nichtwohngebäude geringer als der Energiebedarf für die Heizung, so ergibt sich die Anrechnung und deren Höhe in Abhängigkeit der Gebäudart, einer Speichernutzung sowie in Abhängigkeit des Energiebedarfs der Anlagentechnik ab einer gewissen PV-Anlagengröße. Abbildung 7 stellt das Anrechnungsverfahren nach § 23 GEG dar. [29]

Gebäudeart	Bedingung	Anrechenbar	Zusätzlich anrechenbar ab gewisser Anlagengröße	Maximal anrechenbar
Wohngebäude	Ohne Speicher	150 kWh pro kWp	$kWp > 0,03 * A_N / \text{konditionierte Geschosse}$ -> + 0,7 * Jahresendenergiebedarf der Anlagentechnik	30 % des Jahresprimärenergiebedarfs des Referenzgebäudes
	Mit Speicher ≥ 1 kWh je kWp	200 kWh pro kWp	$kWp > 0,03 * A_N / \text{konditionierte Geschosse}$ -> + 1,0 * Jahresendenergiebedarf der Anlagentechnik	45 % des Jahresprimärenergiebedarfs des Referenzgebäudes
Nicht-wohngebäude	Ohne Speicher	150 kWh pro kWp	$kWp > 0,01 * NGF$ -> + 0,7 * Jahresendenergiebedarf der Anlagentechnik	30 % des Jahresprimärenergiebedarfs des Referenzgebäudes <u>und</u> 1,8 * endenergetischer Jahresertrag der Anlage (nach DIN V 18599-9)
	Mit Speicher ≥ 1 kWh je kWp	200 kWh pro kWp	$kWp > 0,01 * NGF$ -> + 1,0 * Jahresendenergiebedarf der Anlagentechnik	45 % des Jahresprimärenergiebedarfs des Referenzgebäudes <u>und</u> 1,8 * endenergetischer Jahresertrag der Anlage (nach DIN V 18599-9)
Nicht spezifiziert	Stromdirektheizung (z. B. Infrartheizung, elektr. Heizstab; keine Wärmepumpe!)	Monatlicher PV-Ertrag nach DIN V 18599-9 (Referenzklima Potsdam, Standardwerte der PV-Nennleistung) dem tatsächlichen Strombedarf gegenüberstellen		
Nicht-wohngebäude	Strom für Lüftung, Kühlung, Beleuchtung und Warmwasser > Energie für Beheizung			

kWp = installierte Nennleistung | A_N = Gebäudenutzfläche | NGF = Nettogrundfläche

Abbildung 7: Anrechnung von gebäudenah erzeugtem PV-Ertrag nach GEG.

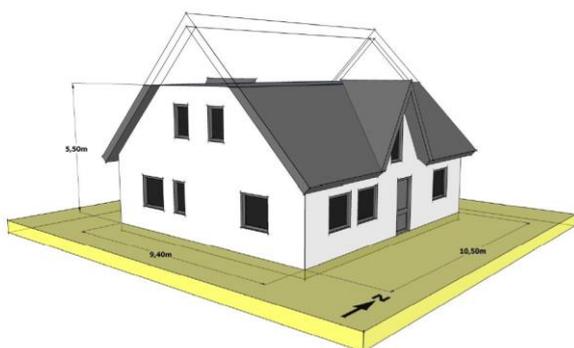
Durch die Anrechnung von PV-Erträgen auf den Jahresprimärenergiebedarf wird die Erzeugung erneuerbarer Energie in der Gebäudeenergiebilanz erfasst und auf dem Energieausweis eines Gebäudes ausgegeben. Eine PV-Integration kann so beispielsweise einen geringeren Dämmstandard ausgleichen. Das Verfahren berücksichtigt die Größe der PV-Anlage, den Einfluss eines Speichers sowie den Strombedarf der Anlagentechnik. So ermöglicht ein strombetriebener Wärmeerzeuger, wie beispielsweise eine Wärmepumpe mit hohem Endenergiebedarf, eine höhere PV-Stromanrechnung als ein fossiler Wärmeerzeuger mit geringem Endenergiebedarf. Dies ist als positiver Ansatz einzuordnen. Allerdings wird nur im detaillierten Verfahren nach DIN 18599-9 zwischen unterschiedlichen Ausrichtungen der PV-Flächen und PV-Technologien differenziert. Dem vereinfachten Anrechnungsverfahren könnte es in dieser Hinsicht an Genauigkeit mangeln.

3.2. Wertung der Bilanzierungsansätze

Nachfolgend werden das pauschale Bilanzierungsverfahren nach GEG § 23 (1), (2) und (3) und dessen Ergebnisse exemplarisch für ein Einfamilienhaus mit Standort Potsdam mit unterschiedlichen Anlagen- und Photovoltaikvarianten beschrieben. Dabei wird auch ein Vergleich der GEG-Bilanzierung zu einer detaillierteren Bilanzierung mit dem Monatsbilanzverfahren nach DIN V 18599 gezogen. Grundlage für diesen Vergleich bildet ein kleines Einfamilienhaus aus der *Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen* (siehe Abbildung 8). [30, S. 30 f.]

Es werden zwei unterschiedliche energetische Standards verglichen, wobei der erste einer energetisch konservativen Basisvariante (Altbau) entspricht, während der zweite eine hocheffiziente Ausführung (Neubau) darstellt. Für beide Varianten werden PV-Flächen mit etwa 35 m² (6,3 kWp) an Südfassade, Süddach, Ostfassade und Ostdach untersucht.

Gebäudedarstellung



Angaben

Wohngebäude (EFH) | 2 Geschosse
 $V_{\text{Beheizt}}: 465 \text{ m}^3$ | $A_{\text{Beheizt}}: 148,2 \text{ m}^2$

Standard 1:

- $U_{\text{Mittel}} = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Gas-Brennwertkessel

Standard 2:

- $U_{\text{Mittel}} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Luft-Wasser(L-W)-Wärmepumpe

PV-Flächen:

- ca. $35 \text{ m}^2 = 6,3 \text{ kWp}$
- $30^\circ \text{ Süd}, 90^\circ \text{ Süd}, 30^\circ \text{ Ost}, 90^\circ \text{ Ost}$

Abbildung 8: Modellgebäude Typ Einfamilienhaus (EFH). V_{Beheizt} entspricht dabei dem beheizten Gebäudevolumen, A_{Beheizt} entspricht der beheizten Nutzfläche und U_{Mittel} stellt den über die Gebäudehüllflächen gemittelten Transmissionskoeffizienten dar.

Anrechenbar sind nach dem pauschalen Bilanzierungsverfahren des GEG unabhängig von der PV-Flächenorientierung die folgenden Erträge:

Standard 1

Pauschal anrechenbar:

Wohngebäude ohne Speicher	150 kWh/(a kWp)
Installierte PV-Leistung (P_{PK})	6,3 kWp
=	945 kWh/a

In Abhängigkeit der Anlagengröße anrechenbar:

Beheizte Nutzfläche A_N	148,2 m^2
Geschosszahl n	2
$P_{\text{PK}} = 6,3 \text{ kWp} > A_N \times 0,03 / n =$	2,223 ✓
Endenergiebedarf Anlagentechni	4,5 kWh/(m^2a)
Anrechenbarer Anteil	0,7
=	466,83 kWh/a

Maximal anrechenbar

Jahresprimärenergiebedarf Referenzgebäude	122,5 kWh/(m^2a)
Maximaler Abzug	30 %
=	5446,35 kWh/a

Anrechenbar

	9,53 kWh/(m^2a)
	1411,83 kWh/a

Standard 2

Pauschal anrechenbar:

Wohngebäude ohne Speicher	150 kWh/(a kWp)
Installierte PV-Leistung (P_{PK})	6,3 kWp
=	945 kWh/a

In Abhängigkeit der Anlagengröße anrechenbar:

Beheizte Nutzfläche A_N	148,2 m^2
Geschosszahl n	2
$P_{\text{PK}} = 6,3 \text{ kWp} > A_N \times 0,03 / n =$	2,223 ✓
Endenergiebedarf Anlagentechni	25,3 kWh/($\text{m}^2 \text{ a}$)
Anrechenbarer Anteil	0,7
=	2624,62 kWh/a

Maximal anrechenbar

Jahresprimärenergiebedarf Referenzgebäude	133,9 kWh/($\text{m}^2 \text{ a}$)
Maximaler Abzug	30 %
=	5953,19 kWh/a

Anrechenbar

	24,09 kWh/($\text{m}^2 \text{ a}$)
	3569,62 kWh/a

Tabelle 1: Nach GEG anrechenbare PV-Erträge auf den Jahresprimärenergiebedarf des Gebäudes für den Standard 1 (Altbau mit Gas-Brennwertkessel) und Standard 2 (Neubau mit L-W-Wärmepumpe).

Der erhöhte Endenergiebedarf der strombasierten Wärmeerzeugung beim Standard 2 führt dazu, dass dort mehr PV-Ertrag angerechnet werden kann. Die Integration einer PV-Anlage wird somit beim strombasierten Heizsystem besser bewertet als beim auf fossilen Energien beruhenden Heizsystem. Dies ermöglicht eine gute energetische Einordnung des Gebäudes mittels Gebäudeenergieausweis, der die energetische Gebäudequalität mit Kennzahlen, wie dem Primärenergiebedarf, dem Endenergiebedarf und den aus der Gebäudekonditionierung resultierenden CO_2 -Emissionen beschreibt. Ein auf fossilen Energieträgern basierendes Heizsystem erreicht durch eine PV-Integration nur eine geringere Verbesserung des Energieausweises.

Gemäß dem aktuellen Vorschlag zu Überarbeitung der EU-Gebäuderichtlinie sollen ab 2027 alle öffentlichen und ab 2030 alle neuen Gebäude *Nullemissionsgebäude* sein. Ein *Nullemissionsgebäude* soll auf einer sehr hohen Gesamtenergieeffizienz basieren und den sehr geringen verbleibenden Energiebedarf vollständig aus erneuerbaren Energien decken, die am Standort, im Wohnviertel oder im Rahmen von Energiegemeinschaften erzeugt werden. [31] Das bedeutet, dass vermehrt gebäudenahere erneuerbare Energien benötigt werden, deren Ertrag möglichst zur Deckung des Energiebedarfs des Gebäudes genutzt werden kann. Ertrag und Bedarf müssen also möglichst in Übereinstimmung gebracht werden.

Zusätzlich können Speicherlösungen die Ertragslücken schließen. Solche Anforderungen lassen sich mit dem pauschalen Bilanzierungsansatz des GEG nicht berücksichtigen. Hier erfordert es eine genauere Bilanzierung, wie z. B. das Monatsbilanzverfahren oder detaillierte PV-Anlagensimulationen im Stunden- oder Minutenschritt.

Betrachtet man die beiden oben beschriebenen EFH-Standards mit dem Monatsbilanzverfahren, so zeigen sich Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten im Monatsverlauf und in den Jahreswerten. Es lässt sich detaillierter zwischen den Orientierungen und Neigungen, deren Wirkung auf die Stromproduktion sowie der Übereinstimmung mit dem Strombedarf differenzieren (siehe Abbildung 9).

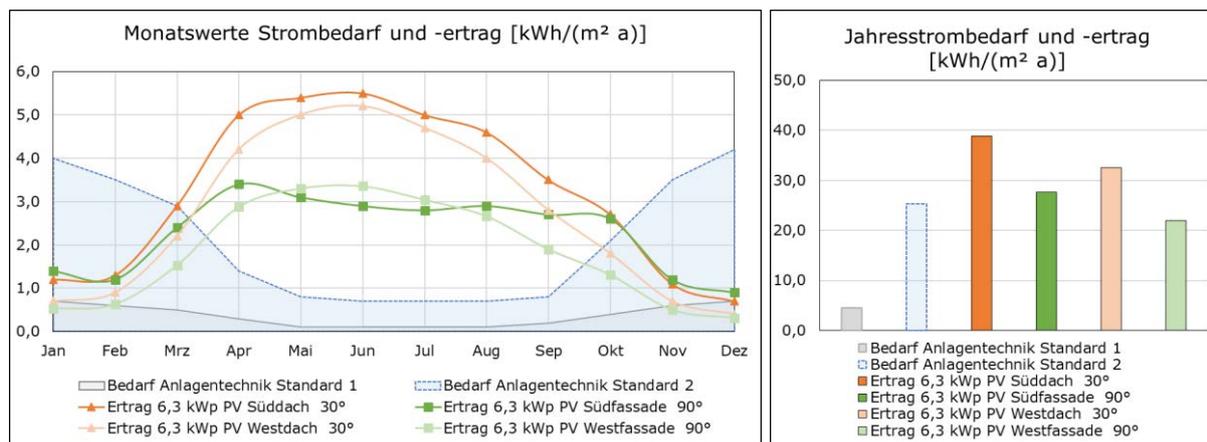


Abbildung 9: Strombedarf der beiden Standards und Stromproduktion unterschiedlich orientierter PV-Systeme.

Es zeigt sich, dass die Südfassade auch hier in den Wintermonaten, wenn der größte Energiebedarf besteht, höhere Erträge erzielt als die anderen Orientierungen. Im Sommer erzielen vor allem das Süd- und das Westdach hohe Erträge, für die jedoch bei beiden energetischen Standards keine ausreichende Stromabnahme besteht. Geht man von einer auf das Gebäude isolierten Betrachtung aus, so können alle PV-Varianten im Sommer nur den bestehenden Bedarf decken und den zusätzlich entstehenden Strom nicht zur Gebäudekonditionierung einbringen. Im Winter hingegen kann die Südfassade aufgrund des höheren Ertrags mehr lokalen Bedarf decken. Hier liegen die Erträge teils sogar über denen des Süddachs. Berücksichtigt man dies mit Hinblick auf die Ziele eines ganzjährig treibhausgasneutralen Gebäudebestands und geringen Speicherkapazitäten, so erscheint die Südfassade neben einem Süddach trotz geringerer Jahreserträge gegenüber dem Westdach als zu favorisierende Variante.

Betrachtet man den Primärenergiebedarf der beiden energetischen Standards und geht davon aus, dass die PV-Erträge, solange Strombedarf auf Seiten der Anlagentechnik besteht, komplett mithilfe Steuerungs- und Speichertechnik (z. B. Wärmepumpe Smart Grid (SG)-Ready) zur Gebäudekonditionierung genutzt werden können, bestätigt sich dieses Bild. Bei dem auf fossilen Energieträgern basierendem Heizsystem (Standard 1) ist die Reduktion des Primärenergiebedarfs durch die PV nur in begrenztem Maße möglich, da dort primär der fossile Energieträger Gas und nur wenig Strom verbraucht wird. Die Südfassade erreicht dennoch eine ähnliche Verbesserung wie das Süddach. Beim strombasierten Heizsystem (Standard 2) kann viel vor Ort erzeugter PV-Strom zum Betrieb der Anlagentechnik genutzt werden. Dadurch lässt sich der Primärenergiebedarf um mehr als die Hälfte verringern. Zudem zeigt sich, dass die Südfassade die größte Verringerung des Primärenergiebedarfs erreicht. Hier zahlen sich die winterlichen Stromerträge, die während der Heizperiode genutzt werden können, aus (siehe Abbildung 10).

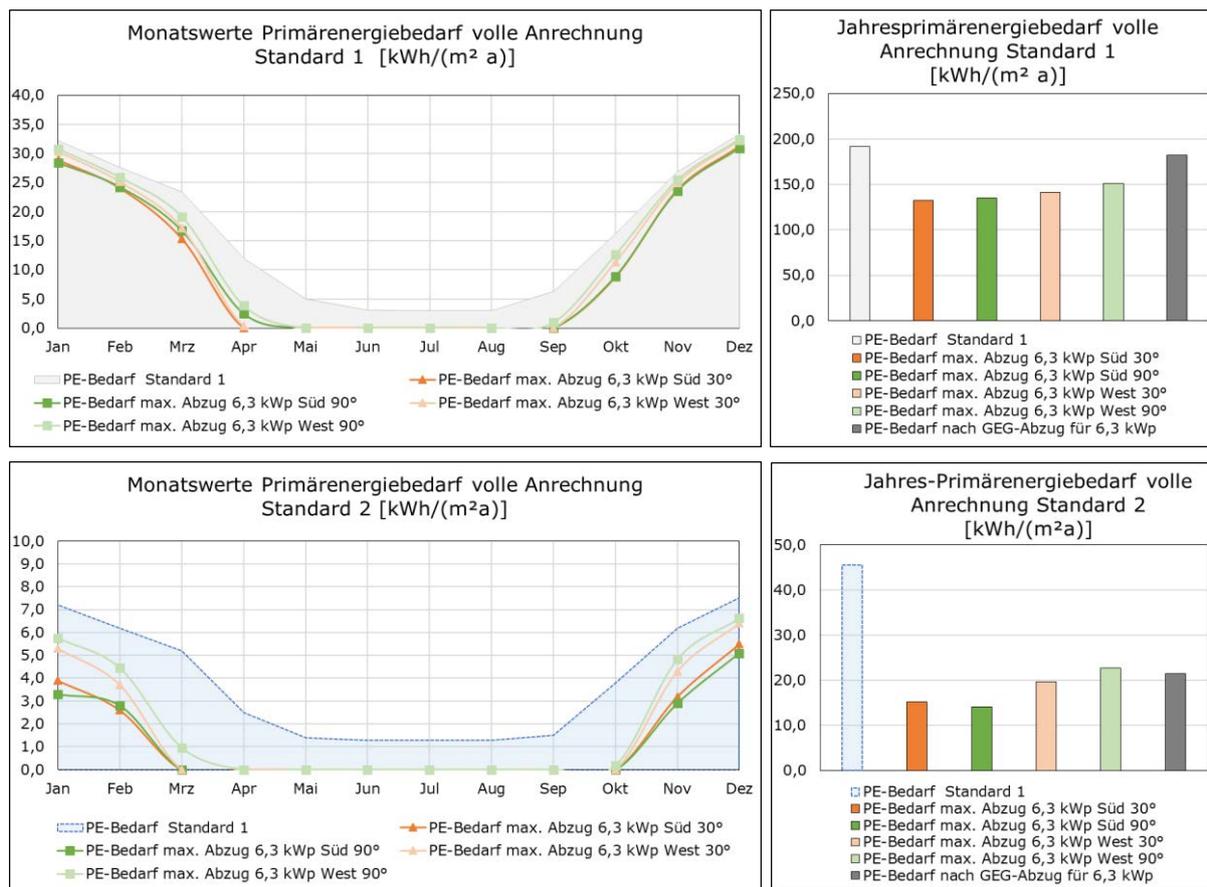


Abbildung 10: Primärenergiebedarf der beiden Standards ohne PV sowie bei Anrechnung der maximal möglichen PV-Erträge auf den Strombedarf der Anlagentechnik für unterschiedlich orientierte PV-Systeme.

Die genauere Betrachtung der Orientierung hat bei beiden Systemen einen sichtbaren Einfluss auf den resultierenden Primärenergiebedarf. Der Einfluss fällt bei den strombasierten Systemen stärker aus. Außerdem wird deutlich, dass die mittels GEG-Bilanzierung ermittelten Abzüge (Tabelle 1) beim strombasierten Standard 2 näher an den detaillierten Abzügen nach dem Monatsbilanzverfahren liegen als beim fossilen System des Standard 1.

Für eine detaillierte Auslegung reicht aber auch das Monatsbilanzverfahren nicht aus. Spätestens bei der Integration von Speichersystemen sollte eine PV-Systemsimulation in Minutenschritten erfolgen, um Erträge, Verbräuche sowie Speicher- und Entladevorgängen und damit auch die Eigenverbräuche, Einspeisevorgänge und den Netzbezug realgetreu abbilden zu können. Außerdem ist für die detaillierte Planung einer BIPV-Anlage auch der Nutzerstrom zu berücksichtigen, der aber sehr fallspezifisch ausfallen kann.

4. Lebenszyklusbetrachtung

4.1. Zukünftige Entwicklung und Vorteile der BIPV

Gemäß dem aktuellen Vorschlag zu Überarbeitung der EU-Gebäuderichtlinie wird neben dem *Nullemissionsgebäude* ab 2030 auch die Berechnung des Lebenszyklus-Treibhausgaspotentials neuer Gebäude gefordert. Für Gebäude mit einer größeren Nutzfläche als 2000 m² soll dies bereits ab 2027 gelten. [31]

BIPV-Fassaden besitzen hierfür, wie im Kapitel 2.4 beschrieben, den Vorteil der treibhausgasemissionsarmen Energieerzeugung direkt am Gebäude. Mit zunehmend sinkenden Emissionen im Energie- und Verkehrssektor, wie sie im Klimaschutzplan angedacht sind, werden die ohnehin schon geringen Treibhausgasemissionen der PV noch weiterhin sinken. Darüber hinaus besitzen BIPV-Fassaden weitere ökologische Vorteile gegenüber konventionellen Fassaden. So ersetzen BIPV-Systeme konventionelle Fassadenbekleidungen durch PV-Elemente und aktivieren verfügbare jedoch nicht genutzte Flächen zur Energieerzeugung.

gung. Dadurch spart die PV-Fassadenintegration Ressourcen und graue Energie im Vergleich zu einer Aufdach-PV-Anlage ein, da die konventionelle Fassadenbekleidung aufgrund der PV-Module und die Aufdach-Montagesysteme bei einer ohnehin bestehenden Fassadenunterkonstruktion obsolet werden. Zusätzlich werden weniger Freiflächen mit PV belegt und sind zur Kultivierung von Biomasse nutzbar. Somit ist die BIPV eine flächen-, material- und ressourceneffiziente Form, Bauen und Energieerzeugung zu vereinen und kann einen wesentlichen Beitrag liefern, die Klimaschutzziele bis 2045 zu erreichen.

Dieser gesamtökologische Mehrwert einer BIPV-Anlage wird jedoch nur durch eine ganzheitliche Betrachtung und Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von der Herstellung über die Errichtung und Nutzung bis zur Entsorgung sowie durch den Vergleich zu konventionellen Bauweisen ohne energieerzeugende Funktion erfassbar. Dies wird aktuell bei der Planung von Gebäuden und PV-Anlagen jedoch nicht berücksichtigt. Hier ist ein Paradigmenwechsel erforderlich, damit die zur Verfügung stehenden Flächenpotentiale der Fassaden sinnvoll genutzt werden.

4.2. Lebenszyklusbetrachtung der BIPV-Fassade

Das oben beschriebene Einfamilienhaus wurde auf die Potentiale der BIPV im Lebenszyklus untersucht. Hierbei änderte sich die Vergleichsführung. Statt des Vergleichs zwischen Fassade und Dach wurden die identischen Bauteile, also die BIPV-Fassade und eine konventionelle Fassade, gegenübergestellt.

An der rund 35 m² großen Südfassade des EFH werden unterschiedliche Varianten von Wandaufbauten und Anlagentechnik betrachtet. Es wurde angenommen, dass 90 % der Fläche mit PV belegt werden können. Die Systeme sind ohne Batteriespeicher ausgeführt. Folgende Varianten wurden für die beiden Standards bilanziert:

Standard 1 – $U_{\text{Mittel}} = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Standard 2 – $U_{\text{Mittel}} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Massive Wand ohne PV und Gas-Kessel	
Massive Wand voll belegt mit PV und Gas-Kessel mit Heizstab	
Massive Wand voll belegt mit PV und Pelletkessel mit Heizstab	
Massive Wand voll belegt mit PV und Luft-Wasser(L-W)-Wärmepumpe	

Für die Lebenszyklusbetrachtung müssen die während der Nutzungsphase vor Ort genutzten und ins Netz eingespeisten PV-Erträge sowie der durch andere Energien, wie beispielsweise fossile Energieträger oder Netzstrom, gedeckter Energiebedarf mittels energetischer Bilanzierung erfasst werden. Aus den dabei ermittelten Daten zur Energieversorgung und Energieproduktion des Gebäudes (Lebenszyklusphase B6) lassen sich dann die während der Nutzungsphase anfallenden Emissionen und Verbräuche bilanzieren.

Zusätzlich erfolgte die Ökobilanzierung der Konstruktion, des PV-Systems und der anlagentechnischen Hauptkomponenten des Heizsystems. Dabei wurden die tragende Wand, die Unterkonstruktion, das PV-Modul, die Verkabelung, der Wechselrichter sowie – in Abhängigkeit des anlagentechnischen Systems – Pufferspeicher, Gaskessel, Pelletkessel oder Wärmepumpe bilanziert. Die Bilanzierungsdaten zu den Konstruktionen und anlagentechnischen Komponenten wurden aus [32] bezogen. Die Bilanzierungsdaten der PV-Systeme stammen aus [33]. Hierbei wurden vereinfachend repräsentative Daten von Dachsystemen und polykristallinen Standard-PV-Modulen genutzt. Die darin enthaltenen Daten umfassen die Lebenszyklusphasen A1-A3 (Herstellung), C2-C4 (Lebensende) und D (potentielle Gutschriften) und decken somit die relevanten Lebensphasen von Herstellung bis Lebenswegende und eine mögliche Gutschrift aufgrund Recyclingvorteilen ab. Betrachtet wurde ein Nutzungszeitraum bis 2045, da bis dahin Treibhausgasneutralität vorliegen soll und die Bilanzierungsdaten zu diesem Zeitpunkt nicht mehr mit den aktuell verfügbaren Daten übereinstimmen werden.

In Abbildung 11 sind die Ergebnisse der über den gesamten Lebenszyklus gebundenen und emittierten Treibhausgase der verschiedenen Varianten für das Einfamilienhaus dargestellt. Mögliche Gutschriften außerhalb der Systemgrenzen (Modul D) sind nicht enthalten.

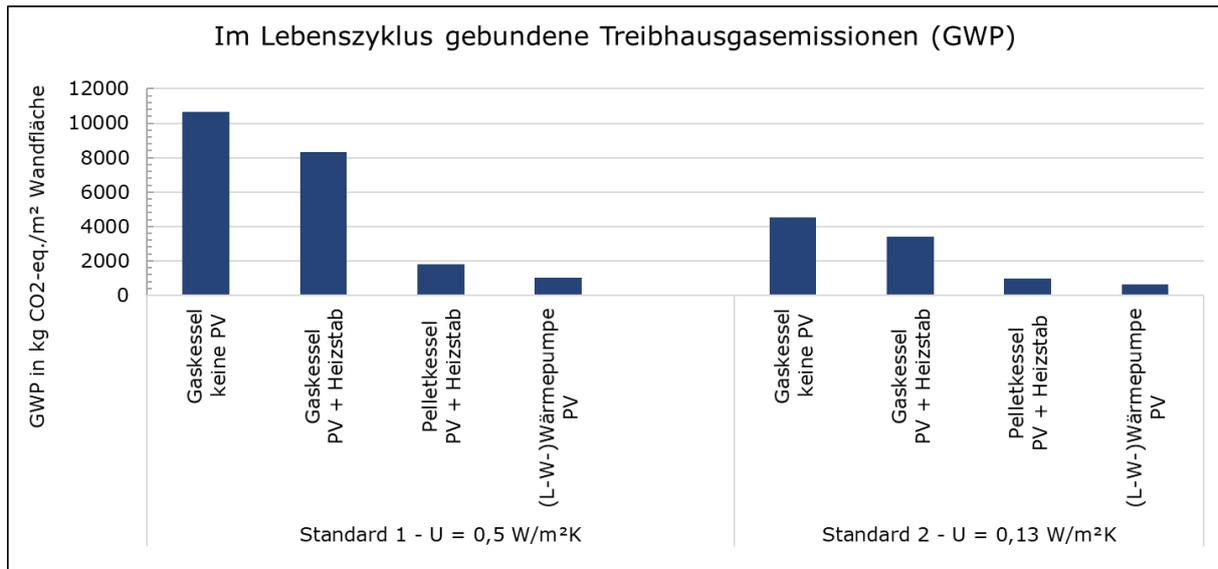


Abbildung 11: Im Lebenszyklus für die Module A1-A3 (Herstellung), B6 (Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes) und C2-C4 (Lebensende) gebundene Treibhausgasemissionen (GWP) der verschiedenen Fassaden- und Anlagenvarianten.

Es zeigt sich, dass die massive Wand ohne PV und Gaskessel in beiden energetischen Standards die schlechteste Variante darstellt. Durch die Ergänzung einer PV-Anlage an der Südfassade und die Kombination mit einem Heizstab lassen sich bei beiden Standards über den Lebenszyklus 22-25 % der Treibhausgasemissionen einsparen. Der Pelletkessel mit PV-Fassade und Heizstab erreicht in beiden Standards eine Verbesserung um 78-83 % während die Wärmepumpe mit PV-Fassade in beiden Standards eine Reduktion um 86-90 % erreicht. Eine erhöhte Energieeffizienz des Gebäudes ($U_{\text{Mittel}} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ statt $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) führt zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen zwischen 59 % und 39 %, wobei die zusätzliche Dämmung bei dem fossil betriebenen Heizsystem am effektivsten ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Um die bereits einsetzende Klimaerhitzung zu begrenzen, müssen Wege zur Treibhausgasneutralität gefunden werden. Der Klimaschutzplan und die Novelle des Klimaschutzgesetzes der Bundesregierung skizzieren unterschiedliche Maßnahmen, die uns bis spätestens 2045 zu einer treibhausgasneutralen Lebensweise führen sollen. Hier stellen BIPV-Fassaden ein bisher kaum genutztes Potential dar. So erreichen Südfassaden eine gleichmäßigere Ertragsverteilung als andere Orientierungen und die höchsten Stromerträge in der Heizperiode. Die nutzbaren Flächenpotentiale sind enorm und aufgrund sinkender Systempreise und steigender Preise der fossilen Energien wird die fassadenintegrierte BIPV zunehmend rentabler werden. Darüber hinaus nutzt sie bereits versiegelte Flächen und ist aufgrund des Materialersatzes und der energetischen Aktivierung bisher inaktiver Flächen als äußerst flächen-, material- und ressourceneffizient einzuordnen. Außerdem führt eine BIPV-Fassadenintegration aufgrund der emissionsarmen Energieerzeugung der PV zur Reduktion des im Gebäude gebundenen Treibhausgaspotentials. Abgesehen von Bauweisen mit einem hohen Holzanteil kann dies durch konventionelle Fassaden ohne Energieerzeugung nicht erreicht werden. Diese Vorteile werden jedoch erst bei einer lebenszyklusumfassenden und die PV-Flächenorientierung berücksichtigenden Bilanzierung deutlich. Der bisherige PV-Bilanzierungsansatz des GEG berücksichtigt dies nicht. Würden hier lebenszyklusorientierte Bewertungen und ein erhöhter Detailgrad bei der PV-Bilanzierung berücksichtigt, so könnten Vorteile von BIPV-Fassaden vermehrt erkannt und ausgenutzt werden.

6. Literatur

- [1] DIN EN 50583-1, „DIN EN 50583-1:2016-10 - Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules“. Oktober 2016.
- [2] P. D. R. Krippner u. a., *Gebäudeintegrierte Solartechnik: Photovoltaik und Solarthermie – Schlüsseltechnologien für das zukunftsfähige Bauen: Energieversorgung als Gestaltungsaufgabe*, 1. Edition. München: DETAIL, 2016.
- [3] T. Herzog, R. Krippner, und W. Lang, *Fassaden Atlas*, 1st edition. Basel ; Boston: Birkhäuser, 2004.
- [4] B. Decker, B. Grimmig, D. Mencke, und D. Stellbogen, „Besonderheiten bei der Projektierung von Photovoltaikfassadenanlagen“, *Forschungsverbund Sonnenenergie - „Themen 97/98“*, Bd. Solare Gebäudetechniken, S. 95–103, 1998.
- [5] C. Bendel, U. Rudolph, B. Decker, D. Mencke, D. Schekulin, und I. Voigtländer, „Photovoltaik-Fassaden - Technische Aspekte, Qualifizierung und Betriebserfahrungen“, *FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE THEMEN 96/97*, S. 22–31, Feb. 1997.
- [6] B. Weller, C. Hemmerle, S. Jakubetz, und S. Unnewehr, *Photovoltaik: Technik, Produkte, Details*. Walter de Gruyter, 2012.
- [7] R. Vermöhlen, „Anfrage zu PV-Fassade an STAWAG-Gebäude“, 11. November 2021.
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN V 18599-10:2018-09 - Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten“. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., September 2018.
- [9] P. Sterchele u. a., „Studie: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen“, *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*, S. 66, Feb. 2020.
- [10] D. H. Wirth und F. Ise, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, 14.05.2021“, S. 96, Mai 2021.
- [11] R. Hollinger, B. Wille-Hausmann, T. Erge, J. Sönnichsen, T. Stillahn, und N. Kreifels, „SPEICHERSTUDIE 2013 Kurzgutachten zur Abschätzung und Einordnung energiewirtschaftlicher, ökonomischer und anderer Effekte bei Förderung von objektgebunden elektrochemischen Speichern“, *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg*, Jan. 2013.
- [12] K. Mertens, *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, 3., Aktualisierte Edition. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015.
- [13] B. für W. und Klimaschutz, „Kabinett bringt Abschaffung der EEG-Umlage auf den Weg“. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220309-kabinett-bringt-abschaffung-der-eeg-umlage-auf-den-weg.html> (zugegriffen 14. März 2022).
- [14] J. Bergner und V. Quaschnig, „Sinnvolle Dimensionierung von Photovoltaikanlagen für Prosumer“, Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, Berlin, März 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/HTW_2019_Sinnvolle_Dimensionierung.pdf
- [15] P. Corti, P. Bonomo, F. Frontini, P. Macé, und E. Bosch, „Building Integrated Photovoltaics: A practical handbook for solar buildings' stakeholders“, © 2020 SUPSI-Becquerel Institut, Status Report 2020, Okt. 2020.
- [16] „CO2-Bepreisung für weniger Emissionen“, *Webseite der Bundesregierung | Startseite*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/weniger-co2-emissionen-1790134> (zugegriffen 14. März 2022).
- [17] Becquerel Institute, „BIPVBOOST - BIPV SOLUTIONS IN EUROPE: COMPETITIVENESS STATUS & ROADMAP TOWARDS 2030 - White Paper“, Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://bipvboost.eu/public-reports/download/bipv-solutions-in-europe-competitiveness-status-ro>

- [18] „BCC Research Report Overview - Building-Integrated Photovoltaics (BIPV): Technologies and Global Markets“, BCC Research LLC 2021, EGY072D, Mai 2021.
- [19] K. Fath, „Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings“, 2018. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000081498> (zugegriffen 28. August 2020).
- [20] J.-B. Eggers u. a., *PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland*. 2020.
- [21] A. Kemmler u. a., „Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 - Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030“. Prognos AG, Fraunhofer ISI, GWS, iinas im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 10. März 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- [22] „Energieeffizienz von Gebäuden“, Europäischen Kommission – Dienststellen: Energie – Im Blickpunkt, Brüssel, Feb. 2020.
- [23] Europäische Kommission, „MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN EUROPÄISCHEN RAT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN - Der europäische Grüne Deal“, Europäische Kommission, Brüssel, COM(2019) 640 final, Dez. 2019.
- [24] H. Poglitsch u. a., „Eine Frage des Flächensparens: Wo können 1 Milliarde Photovoltaik-Module in Deutschland installiert werden?“, in *Flächennutzungsmonitoring X Flächenpolitik – Flächenmanagement – Indikatoren*, Bd. Flächenpolitik-Flächenmanagement-Indikatoren, G. Meinel, U. Schuhmacher, M. Behnisch, und T. Krüger, Hrsg. Berlin: Rhombos-Verlag, 2018, S. 133–142.
- [25] B. für U. BMU Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Hrsg., „Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“, S. S. 7, 43-45, Feb. 2019.
- [26] BMU, „Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019“, S. 19, 2019.
- [27] EnergieAgentur.NRW, „Klimabilanz Photovoltaik - Wie groß ist der CO₂-Fußabdruck von Solarstrom“. 2017.
- [28] „Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“, S. 23.
- [29] U. Jungmann und K. Lambrecht, *GEG im Bild: Praxisgerecht kommentiert und grafisch umgesetzt*. Köln: Müller, Rudolf, 2021.
- [30] S. Klauß, „Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit“, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Kassel. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2010/DatenbankModellgebaeude/DL_Endbericht.pdf;jsessionid=8F3599B9E57463E332C9E4734322D864.live21324?__blob=publicationFile&v=1
- [31] Europäische Kommission, „Vorschlag für eine RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)“. Europäische Kommission, Brüssel, 15. Dezember 2021.
- [32] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), „Ökobaudat 2021-II“. 25. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oekobaudat.de/>
- [33] J. Hengstler, M. Russ, A. Stoffregen, A. Hendrich, M. Held, und A.-K. Briem, *Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen*, Bd. 35/2021. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2021. Zugegriffen: 26. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-bewertung-der-oekobilanzen-von>

Sommerlicher Wärmeschutz und Holzbau – Vorurteile und Tatsachen

Michael Eichenberger
PIRMIN JUNG Schweiz AG
Thun, Schweiz



Sommerlicher Wärmeschutz und Holzbau – Vorurteile und Tatsachen

1. Einleitung

Es muss davon ausgegangen werden, dass im Laufe der nächsten Jahrzehnte aufgrund der Klimaerwärmung die Aussenlufttemperaturen in Europa in den Sommermonaten weiter ansteigen werden. Gemäss den schweizerischen Klimaszenarien CH 2018 des Bundes [1] werden nicht nur die Durchschnittstemperaturen, sondern auch die Höchsttemperaturen in den Sommermonaten weiter ansteigen. Man geht heute in der Schweiz davon aus, dass die heissesten Sommertage im Jahre 2060 in einem durchschnittlichen Sommer bis zu 5.5° Grad Celsius wärmer sein könnten als heute.

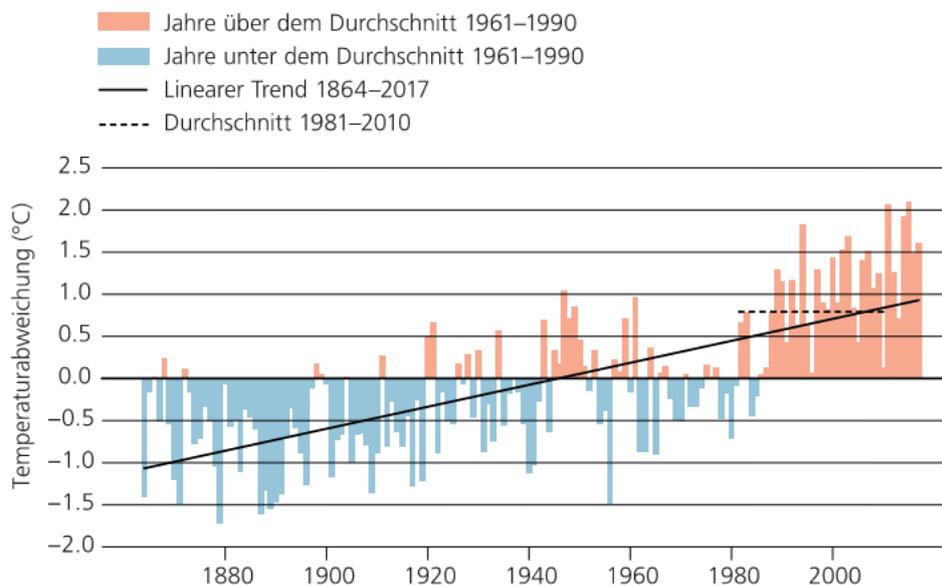


Abbildung 1: Jahresmitteltemperatur 1864–2017 – Abweichung vom Durchschnitt der Jahre 1961–1990 im Schweizer Mittel [1]

Aktuell gehen wir in der Planung davon aus, dass wir Gebäude mit einer Lebensdauer von 50 bis 100 Jahren erstellen. Sprich die Bauten, welche heutzutage erstellt werden, müssen also auch zukünftigen klimatischen Bedingungen gewachsen sein. Bei der Planung muss dementsprechend das Ziel von behaglicher Raumlufttemperaturen im Sommer mit möglichst ohne energieintensive Kühlmassnahmen über den gesamten Nutzungszyklus verstärkt in den Fokus gerückt werden.

Um gute Lösungen für die thermische Behaglichkeit von Gebäuden in Holz-, wie aber auch in Massivbauweise zu finden, müssen diese gesamtheitlich mit diversen Einflussfaktoren betrachtet werden.

Entgegen der häufigen Meinung, dass hauptsächlich die Wärmespeicherfähigkeit eines Baukörpers das Hauptkriterium für den sommerlichen Wärmeschutz darstellt, sind zwingend weitere Parameter zu berücksichtigen, auf welche im Folgenden eingegangen werden soll.

2. Einflussfaktoren sommerlichen Wärmeschutz

2.1. Übersicht

Einen grossen Einfluss auf die Behaglichkeit im Sommer – und damit verbunden die künftige Nutzbarkeit unserer Gebäude – haben unter anderem die folgenden Parameter:

- Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes und der einzelnen Räume
- Interne Wärmelasten durch Personen oder elektronische Geräte
- Solare Wärmegewinne über Verglasungen und Fenster an Fassade und Dach
- Bewegliche Verschattungssysteme und bauliche Verschattungen
- Lüftung und die Möglichkeit einer ausreichenden Nachtauskühlung
- Gute gedämmte Gebäudehülle
- Konzept Gebäudetechnik
- Verhalten der Gebäudenutzenden

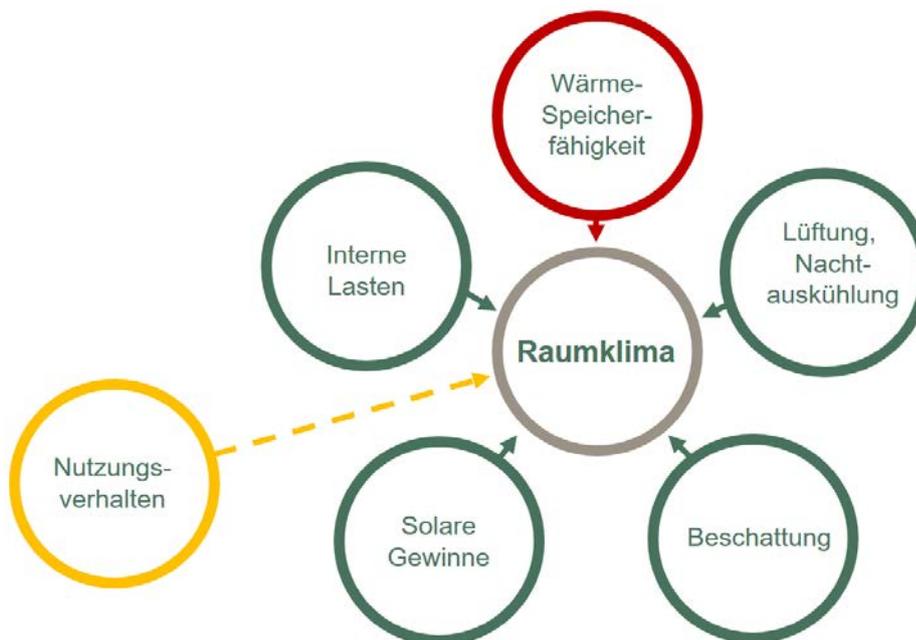


Abbildung 2: Übersicht Einflussfaktoren auf das Raumklima (eigene Darstellung)

2.2. Wärmespeicherfähigkeit

Von der Bauart her unterscheidet sich der Holzbau vom Massivbau einzig bei der Wärmespeicherfähigkeit der Bausubstanz, da diese materialabhängig ist.

Was ist denn die Wärmespeicherfähigkeit C_R überhaupt?

Vereinfacht gesagt ist es die Fähigkeit eines Raumes Energie, in Form von Wärme, aufzunehmen und diese zeitverzögert wieder abzugeben. Wobei die Wärmespeicherfähigkeit raumabhängig von Flächen und Volumen des Raumes ist.

- geringe C_R : schnelleres Aufheizen und schnelleres Auskühlen
- hohe C_R : langsames Aufheizen aber auch langsames Auskühlen

Ziel muss es sein, die Materialisierung von Gebäuden, insbesondere von Holzkonstruktionen so zu optimieren, dass diese die im Sommer anfallende Wärme aufnehmen und zeitverzögert zum richtigen Zeitpunkt wieder abgeben können.

Dazu gibt es einige Untersuchungen und Studien zu diesem Thema. Insbesondere ist die Parameteruntersuchung des sommerlichen Raumklimas von Wohngebäuden der Berner Fachhochschule [2], die Untersuchung der EMPA [3] und der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes von Holzbauten von PIRMIN JUNG Schweiz AG [4] zu erwähnen.

In allen drei Studien wurde der Einfluss verschiedenster Parameter auf den sommerlichen Wärmeschutz untersucht und ermittelt. Dabei wird insbesondere auch die thermische Speichermasse mit einbezogen. Die thermische Speichermasse ist bei Holzbauten oft kleiner als bei Massivbauten. Deshalb ist dieser Vergleich besonders spannend.

Die nachfolgenden Grafiken zeigen den Temperaturverlauf eines typischen Massivbaus ($C_R = 75 \text{ Wh/m}^2\text{K}$) und eines Holzbaus ($C_R = 45 \text{ Wh/m}^2\text{K}$) im Vergleich.

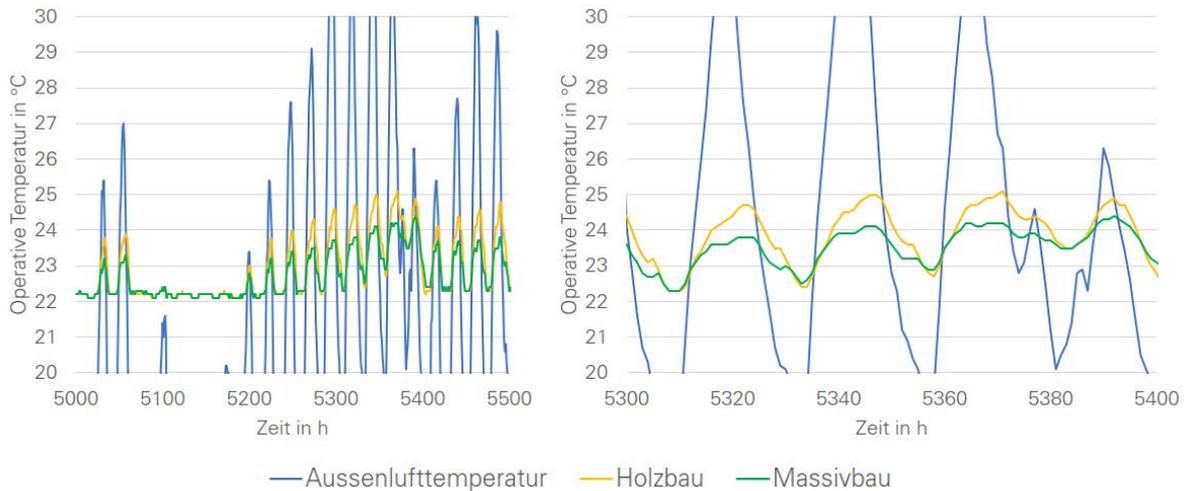


Abbildung 3: Temperaturverlauf 500h [5]

Abbildung 4: Temperaturverlauf 100h [5]

Obige Grafiken zeigen, dass der Holzbau in den Sommertagen leicht höhere, max. operative Temperaturen erreicht, diese gegenüber dem Massivbau in der Nacht aber auch schneller und tiefer wieder absinken.

Je nach architektonischem Ausdruck und Gebäudekonzept ist eine geringere Wärmespeicherfähigkeit also nicht nur nachteilig, sondern kann im Zusammenspiel mit den vorher erwähnten Parametern auch vorteilig genutzt werden.

2.3. Interne Wärmelasten

Die Nutzungsart eines Raumes übt einen sehr grossen Einfluss auf die Behaglichkeit im Sommer aus. Je nach Nutzung sind verschieden ausgeprägte interne Wärmelasten durch Personen, Beleuchtung oder Geräte im Raum vorhanden, welche in einer allfälligen Untersuchung der Behaglichkeit im Rauminnern zu berücksichtigen sind.

In einem Unterrichtsraum ist beispielsweise die Wärmeeintragsleistung von Personen um ein vielfaches höher wie in einem Wohnzimmer, wie folgender Vergleich mit Angaben gem. dem SIA-MB 2024:2015 [6] zeigt.

Wärmeeintragsleistung gem. SIA 2024:2015

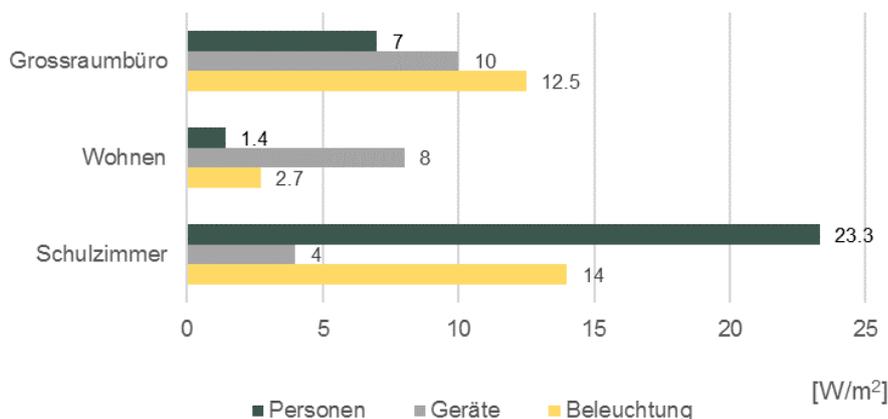


Abbildung 5: Vergleich interne Wärmelasten nach SIA 2024:2015 (eigene Darstellung)

2.4. Solare Gewinne

Solare Wärmegewinne werden primär über Verglasungen in der Gebäudehülle erzielt und können je nach Glasflächenanteil stark variieren. Hier gilt es bereits in einer sehr frühen Phase der Planung eines Gebäudes das optimale Verhältnis von möglichst viel solarem Wärmegewinn im Winter und möglichst wenig im Sommer zu finden.

Untersuchungen bei PIRMIN JUNG Schweiz AG [4] haben gezeigt, dass die Vergrößerung des Verglasungsanteil einer Fassade einen grossen Einfluss auf die Überhitzungsstunden eines Raumes haben. Die folgende Grafik zeigt unter anderem diesen Unterschied auf.

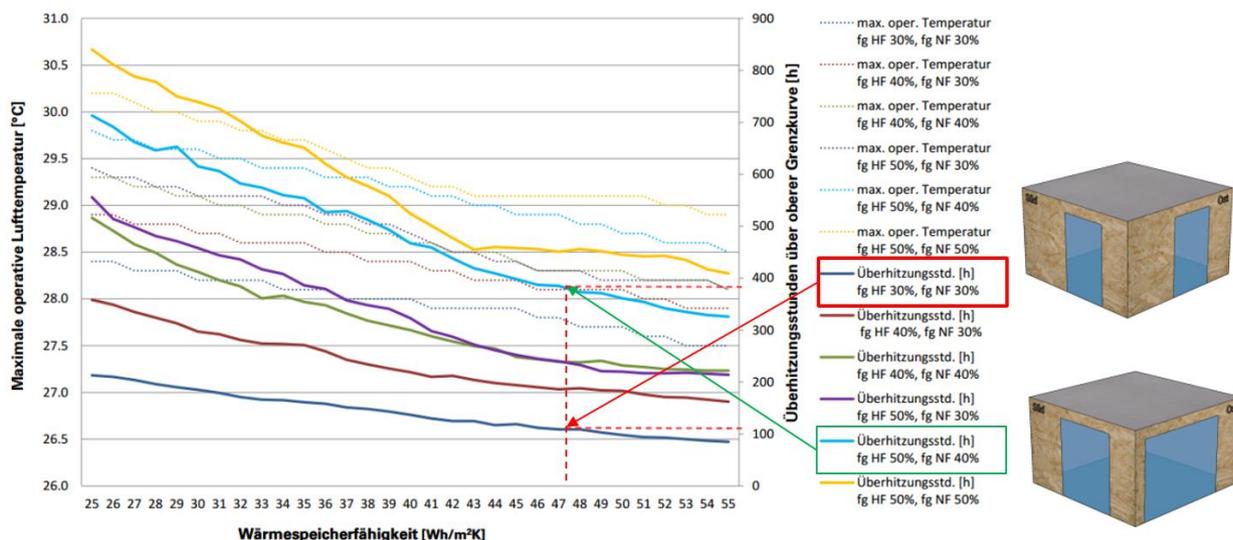


Abbildung 6: Parameterstudie bez. Einfluss Überhitzungsstunden [4]

Im Weiteren ist der solare Wärmegewinn nicht nur über Verglasungsanteile, sondern in gewissem Masse auch über die Verglasung selbst (g-Wert des Glases), z.B. mit einem Sonnenschutzglas, beeinflussbar.

2.5. Beschattung

Als weiterer wichtiger Einflussfaktor sind Beschattungen in Form von baulichen Verschattungen, wie z.B. Vordächer und Balkone, sowie bewegliche Beschattungselemente wie Markisen, Storen oder Fensterläden mit einzubeziehen.

Auch hier gilt es architektonische und energetische Ansprüche in Einklang zu bringen. So ist beispielsweise die Minimierung des solaren Wärmeeintrags durch ein flexibles ausenliegendes Beschattungssystem oder durch auskragende Balkone und die Ansprüche an das Tageslicht im Rauminnern oder den solaren Wärmegewinn im Winter aufeinander abzustimmen. In der Planung bedarf es deshalb bereits in einer frühen Projektphase diesen Umständen Rechnung zu tragen und aufeinander abzustimmen.



Abbildung 7: Beschattung durch Vordach und Stoffmarkise (Fotografie: PIRMIN JUNG Schweiz AG)



Abbildung 8: Beschattung durch Bauliche Massnahmen wie Balkone / Loggias / Terrassen (Fotografie: PIRMIN JUNG Schweiz AG)

2.6. Lüftung, Nachtauskühlung

Die durch den Tag im Gebäude eingespeicherte Wärme muss zu einem gewissen Zeitpunkt wieder aus dem Gebäude abgeführt werden können. Diese Temperaturabführung erfolgt in der Regel in der Nacht, wenn die Aussenlufttemperaturen tiefer als die Raumlufttemperaturen im Gebäudeinnern sind.

Dabei gibt es unterschiedliche Konzepte, wobei eine Nachtauskühlung über offenbare Fenster und die Möglichkeit zum Querlüften des Raums zu den effizientesten Massnahmen gezählt werden kann. Je nach Gebäude können dazu manuell oder automatisch gesteuerte Fensterflügel eingesetzt werden. Auch ein Abführen der von der Gebäudesubstanz abgegebenen Wärme über eine mechanische Lüftungsanlage oder eine Kombination von Gebäudetechnik und Fensterlüftung sind möglich. Der Einsatz von mechanischen Lüftungsgeräten mit deren Energieverbrauch kann jedoch beträchtlich hoch ausfallen und ist bei der Energiebilanzierung des Gebäudes mit zu berücksichtigen.

Die Möglichkeit einer effizienten Nachtauskühlung ist bereits in der Entwurfsphase eines Gebäudes anzudenken, da die unterschiedlichen Konzepte einen grossen Einfluss auf das gesamte Gebäude haben können.

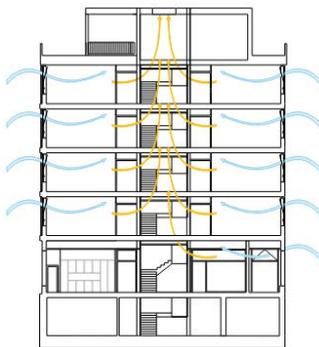


Abbildung 9: Beispiele einer effizienten Nachtauskühlung mittels Querlüftung [7]

2.7. Nutzungsverhalten

Ein wichtiger Faktor der in der Planung des sommerlichen Wärmeschutzes eines Gebäudes oftmals vergessen geht ist der Einflussfaktor Mensch und dessen Nutzungsverhalten im Gebäude. Je nach Gebäude und dessen Nutzung ist es sinnvoll, die Konzepte so auszulegen, dass diese möglichst auch ohne manuellen Einfluss der Gebäudenutzenden funktionieren können z.B. mit automatisch gesteuerten Beschattungssystemen.

Für den Fall, dass das Gebäudekonzept vollständig auf das Nutzerverhalten setzt (z.B. öffnen der Fenster, Schliessen der aussenliegenden Verschattung), empfiehlt es sich die Gebäudenutzenden über ihre Verantwortung zu informieren und ihnen allfällige Hilfestellungen zur Verfügung zu stellen.



Abbildung 10: Sommerzeit... [8]

3. Erkenntnisse

In der Praxis bedarf es bei der Planung von Gebäuden, egal ob Holzbau oder Massivbau, von Beginn weg ein gesamtheitlicher und gemeinsamer Planungsprozess aller beteiligten Fachpersonen, damit die thermische Behaglichkeit im Sommer, heute und künftig, gewährleistet werden kann.

Dabei ist nicht nur der Faktor Wärmespeicherfähigkeit wichtig, sondern weitere Einflussfaktoren ebenso, was aber in der Baubranche erfahrungsgemäss noch zu wenig verankert ist.

4. Literaturverzeichnis

- [1] NCCS, «Klimaszenarien für die Schweiz», NCCS - National Centre for Climate Services, Zürich, 2018.
- [2] A. S. u. A. M. D. Kehl, „Parameteruntersuchung des sommerlichen Raumklimas von Wohngebäuden,“ BFE, Biel, 2011.
- [3] T. Frank, „Sommerlicher Wärmeschutz von Dachräumen, Bericht-Nr. 444'383d,“ Empa, Dübendorf, 2008.
- [4] D. Müller und M. Eichenberger, „Nachweisverfahren des sommerlichen Wärmeschutzes von Holzbauten,“ BFE, Rain, 2015.
- [5] D. Müller, „Dynamische Gebäudesimulation von Holzbauten,“ Hochschule Luzern, Rotkreuz, 2013.
- [6] SIA Zürich, SIA Merkblatt 2024 - Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik, Zürich, 2015.
- [7] Minergie Schweiz, „Sommerlicher Wärmeschutz - Klimakomfort im Minergie-Gebäude,“ Minergie Schweiz, Basel, 2022.
- [8] M. Hütter, „DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung - Arbeiten bei Hitze,“ 07 2016. [Online]. Available: <https://www.dguv-lug.de/berufsbildende-schulen/gesundheitschutz/arbeiten-bei-hitze/>. [Zugriff am 03 2022].

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien
Behaglichkeit und Wohngesundheit

Behaglichkeit – Wechselwirkung oder Zusammenspiel bauphysikalischer Phänomene?

Schew-Ram Mehra
Institut für Akustik und Bauphysik
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland



Behaglichkeit – Wechselwirkung oder Zusammenspiel bauphysikalischer Phänomene?

1. Einleitung

Der Mensch verbringt fast 90% seiner Lebenszeit in Räumen und steht mit ihnen ständig im wechselseitigen Spannungsfeld. «Zuerst prägt der Mensch den Raum, dann prägt der Raum den Menschen», sagte Winston Churchill einst [7]. Der Mensch formt und gestaltet den Raum, um seine Bedürfnisse zu erfüllen, seine Werte sowie Gewohnheiten zu realisieren und die gesellschaftlichen soziokulturellen Bestimmungen zu verwirklichen. Der Raum bietet den Menschen Aufenthalts- sowie Lebensbedingungen und nimmt auf ihn durch seine Auswirkungen Einfluss. Dieser Einfluss muss zudem aus dem Blickwinkel der Nutzung, Art und Dauer der Nutzung, Lebensphasen und Emissionen im Raum betrachtet werden.

Es wird immer deutlich, dass die zunehmenden «modernen» Bauweisen, der Einsatz neuer und zum Teil für das lokale Klima und die jeweilige Kultur ungeeigneter Werkstoffe und Konstruktionen, der hohe Ressourcenverbrauch, die steigende und unvermeidbare Technisierung der Räume und die damit verbundenen Emissionen erhebliche Negativfolgen für das menschliche Wohlbefinden, das Umfeld und die Umwelt mit sich gebracht haben. Die Behaglichkeit im Räumen wird wesentlich durch die Zusammen- bzw. Wechselwirkung bauphysikalischer Phänomene dort bestimmt.

2. Behaglichkeit

Die Behaglichkeit ist ein komplexer Begriff, hinter dem viele Zusammenhänge und Empfindungen verborgen sind. 1896 führte der Ernährungsphysiologe Max Rubner für die Wahrnehmung der thermischen Atmosphäre des Raumes erstmalig den Begriff «Behaglichkeitsempfindung» ein [23]. Nicht selten wird die Behaglichkeit mit Phänomenen, wie das Wohlbefinden, wie es aus der Hygiene bekannt ist, und der ästhetischen Wirkung des Raumes bzw. der Wahrnehmung von Sicherheitsmerkmalen im Raum verwechselt [15].

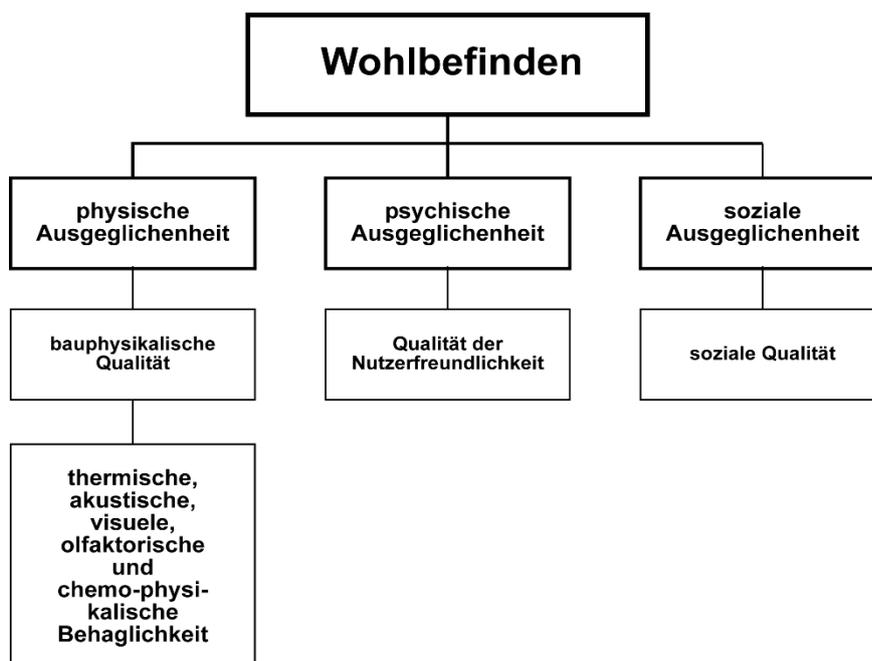


Bild 1: Komponente des menschlichen Wohlbefindens im Raum mit Angabe der Behaglichkeit unter Einfluss bauphysikalischer Einflussgrößen, nach [16].

Das Wohlbefinden bringt, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt, die physische, psychische und soziale Ausgeglichenheit eines gesunden Menschen mit seinem Umfeld – und damit auch mit dem Raum zum Ausdruck. Die physische Ausgeglichenheit (Behaglichkeit) wird von der bauphysikalischen Qualität des Raumes bestimmt. Obwohl die physischen Auswirkungen häufig nicht direkt wahrgenommen werden, sind ihre gesundheitlichen Folgen dennoch gravierend, z. B. Herzkreislaufstörungen durch zu hohen Schallpegel oder Atemwegbeschwerden durch zu trockene Luft. Dagegen werden die psychischen Auswirkungen deutlich bemerkbar, z. B. die Unzufriedenheit mit der Raumgröße, Raumbeleuchtung oder der Farbe der Umschließungsflächen. Die sozialen Folgen beinhalten Aspekte wie das Isolations- und Abgeschlossenheitsgefühl aufgrund der Lage und Qualität des Raumes.

Gekennzeichnet wird die Behaglichkeit durch die Abwesenheit von Impulsen, die den unterschiedlichen Rezeptoren am menschlichen Körper zur Veränderung der Situation oder der Umgebungsbedingungen veranlassen. Folglich spiegelt die Behaglichkeit die subjektive Bewertung eines Zustandes, hier des Klimas im Raum, wieder. Mit Raumklima wird dabei das thermische, hygrische, akustische, visuelle und olfaktorische Verhalten des Raumes sowie die Raumluftqualität und elektromagnetische Belastung im Raum zusammengefasst. Entsprechend kann gemäß Bild 2 von der thermischen, hygrischen, akustischen, visuellen und olfaktorischen Behaglichkeit gesprochen werden.

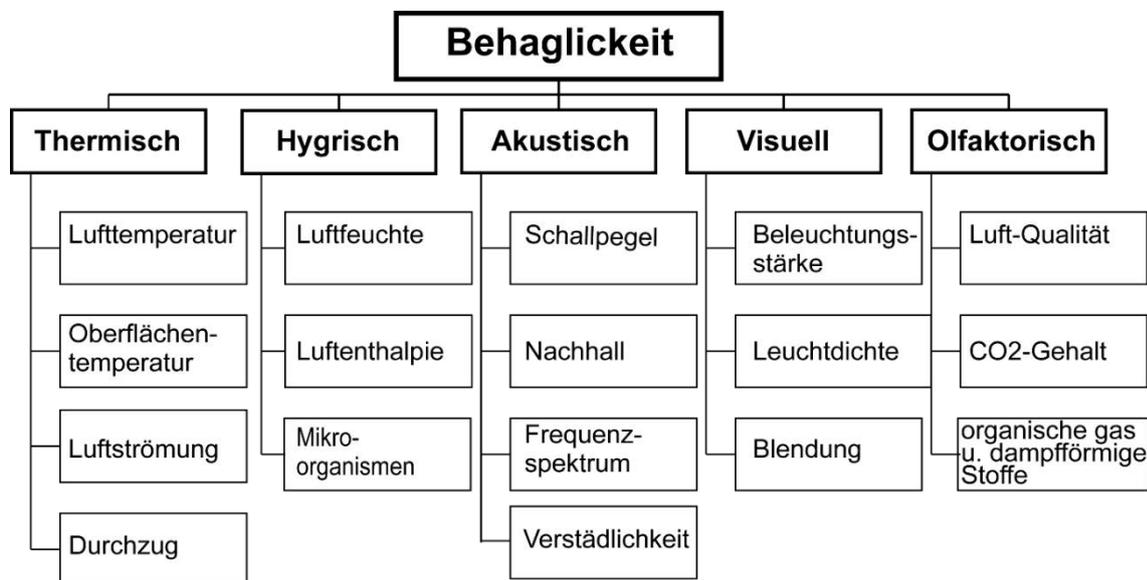


Bild 2: Übersicht über die Komponenten der Behaglichkeit im Raum mit Angabe von Wirkungen, die dazu beitragen.

Da die bauphysikalischen Phänomene, Wärme, Feuchte, Schall, Licht, Gerüche und andere Emissionen im Raum nicht getrennt, sondern alle oder zum Teil zusammen auftreten, bestimmen sie in ihrer Kombination das Raumklima und damit die Behaglichkeit im Raum, Bild 3. Es ist auffallend, dass in der Forschung kaum oder nur wenige Untersuchungen, z.B. [11], vorliegen, die sich ganzheitlich mit der Behaglichkeit befassen. Die notwendige ganzheitliche Erforschung der Behaglichkeit ist aufwendig und anspruchsvoll. Die meisten wissenschaftlichen Arbeiten beziehen sich auf die thermische Behaglichkeit. Nur Einzelarbeiten, z. B. [1, 3, 9, 11, 20], setzen sich mit der Auswirkung von ausgewählten Einflussparametern in Kombination auseinander. Beispielsweise haben die Arbeiten [3, 8, 11] das Wechsel- und Zusammenwirken von Wärme und Schall oder [1, 11] Schall und Licht bzw. [11] Wärme und Licht zum Inhalt. Bei den durchgeführten Untersuchungen sind häufig die zugrunde gelegten Randbedingungen sehr unterschiedlich, sodass die Ergebnisse nicht vergleichbar und nicht selten sogar widersprüchlich sind.

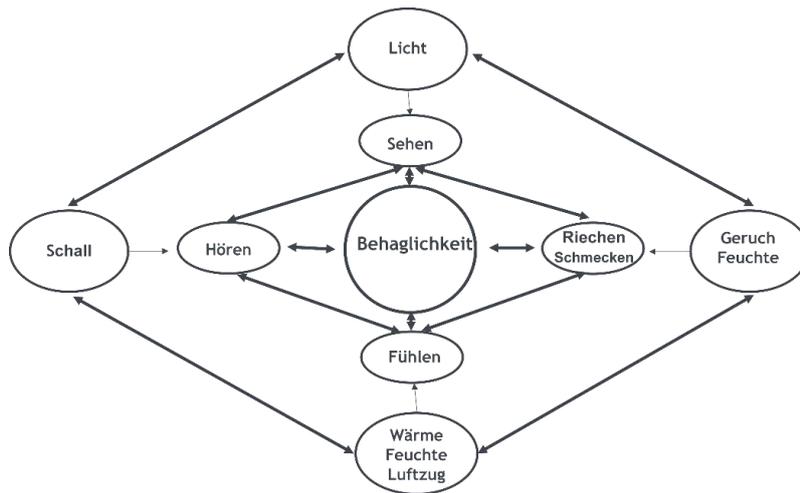


Bild 3: Schematische Darstellung der Wechselwirkungen bauphysikalischer Raumparameter und ihrer Einwirkung auf die Behaglichkeit.

2.1. Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit beschreibt das Zusammenspiel der lokalen thermischen Bedingungen im Raum und der menschlichen Wahrnehmung [10]. Sie ist seit mehr als hundert Jahren Gegenstand der Forschung. Zum Beginn des 20-sten Jahrhunderts wurde die thermische Belastung von Bergarbeitern in Großbritannien untersucht [6]. Definitionsgemäß ist die thermische Behaglichkeit der Zustand, in dem die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung im Raum vorliegt. Physikalisch kennzeichnet sie gemäß [22] die Erfüllung der Gesamtwärmebilanz des menschlichen Körpers, bei geringsten thermoregulatorischen Anstrengungen des

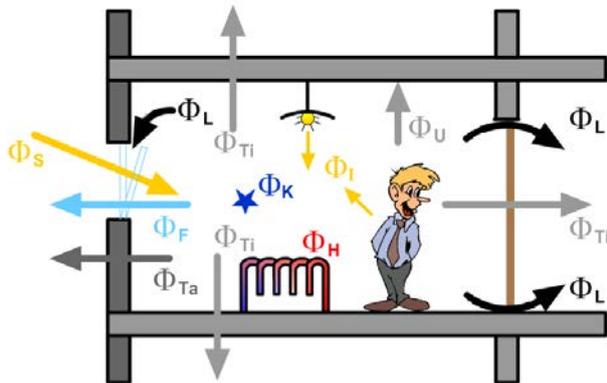


Bild 4: Schematische Darstellung der Wärmeströme, mit denen der Mensch im Raum in Wechselwirkung steht.

Organismus,

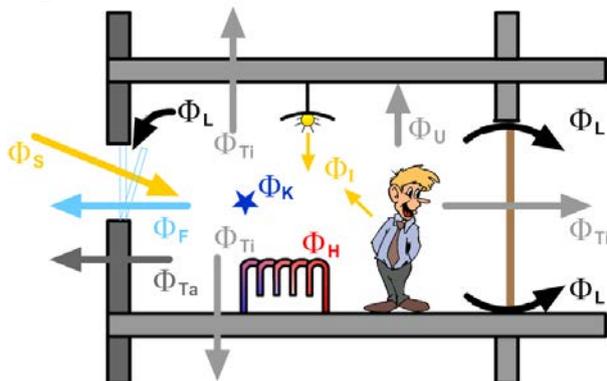


Bild 4. Dazu müssen sich die Wärmeproduktion des Körpers und die Wärmeabgabe an die Umgebung ausgleichen. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung wird zusätzlich von der Bekleidung beeinflusst. Sie wirkt wie eine Wärmedämmschicht, deren Wirkung vom Grad

der Bedeckung der Körperfläche und der Dicke der Kleidung abhängig ist. Die interne Wärmeproduktion erfolgt dabei durch den Stoffwechsel und die äußere Arbeit, z.B. infolge erhöhter Aktivität, die mit metabolischer Rate gekennzeichnet wird. Welche physikalischen, intermediären und physiologischen Bedingungen die thermische Behaglichkeit beeinflussen, zeigt Bild 5.

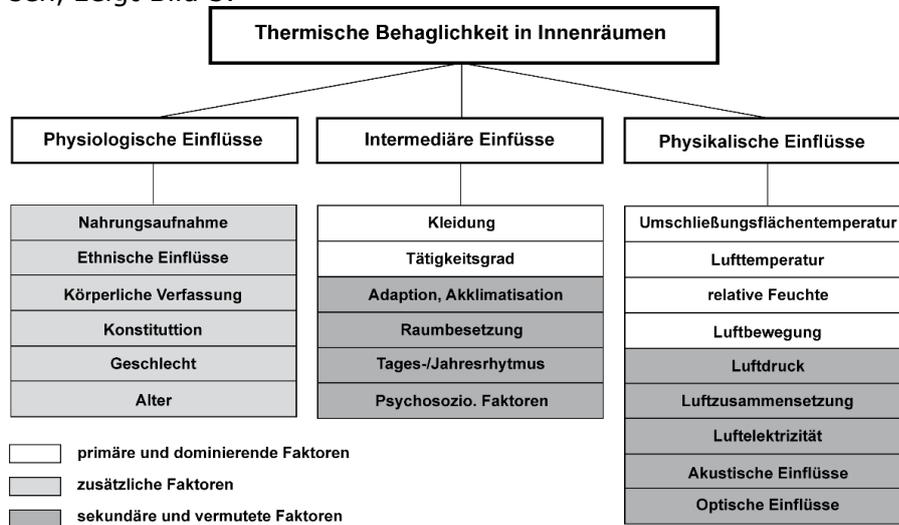


Bild 5: Zusammenstellung von Einflüssen auf die thermische Behaglichkeit in Innenräumen.

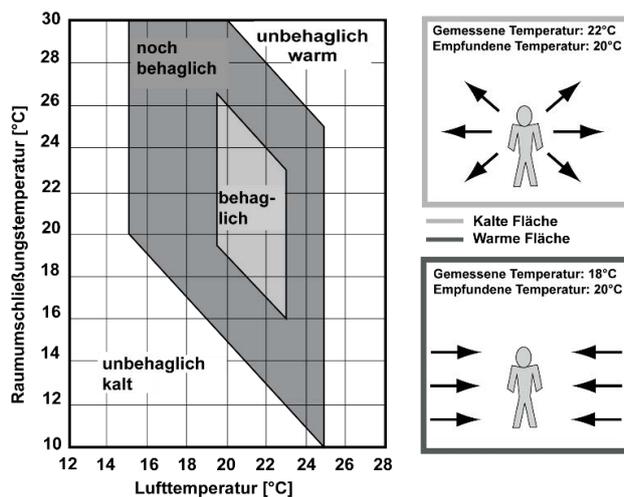
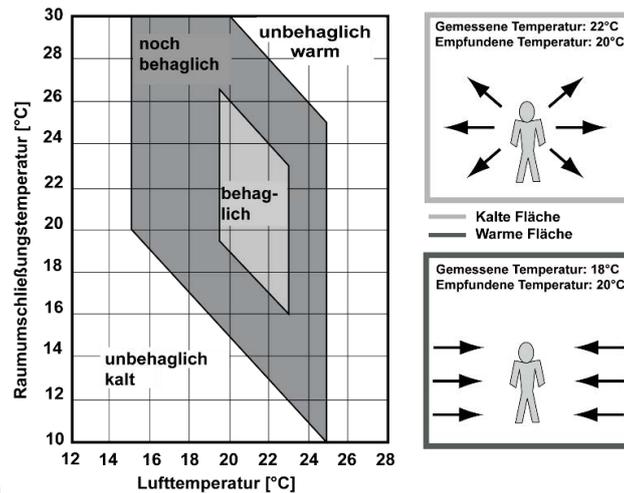


Bild 6 (rechts) zeigt schematisch die Richtung des Wärmeaustausches zwischen dem Menschen und seiner Umgebung unter Angabe der gemessenen und empfundenen Temperatur. Demnach wird ein Raum mit geringer Lufttemperatur (18 °C), aufgrund der Strahlungswärmezufuhr über warme Umschließungsflächen, thermisch identisch empfunden wie ein Raum mit hoher Lufttemperatur (22 °C) und kalten Umschließungsflächen, die dem Körper



Strahlungswärme entziehen. Links in

Bild 6 ist die thermische Behaglichkeit in geschlossenen Räumen in Abhängigkeit von der Luft- und Umschließungstemperatur dargestellt. Es gibt Bereiche an, bei welchen Kombinationen von Umschließungs- und Raumlufttemperaturen das Raumklima als behaglich, noch behaglich oder nicht behaglich empfunden wird.

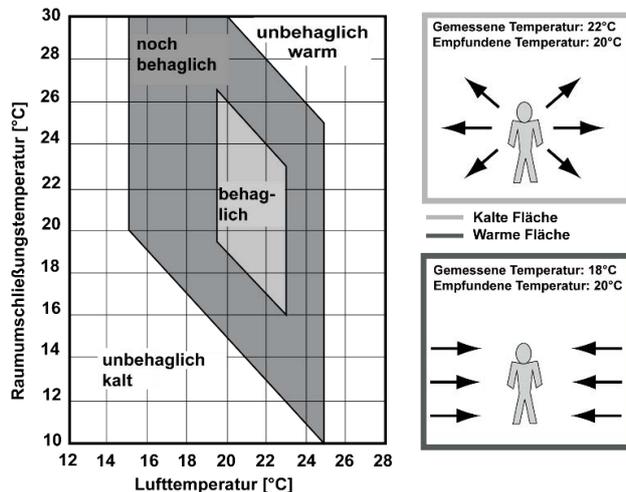


Bild 6: Das Diagramm der thermischen Behaglichkeit in geschlossenen Räumen unter Kombination der Raumumschließungs- und Raumlufttemperatur, nach [26].

Thermische, hygrische, akustische, visuelle und olfaktorische Raumparameter haben einen interagierenden Einfluss auf die Bewertung der Gesamtbhaglichkeit, siehe Ziffer 0, 0, 2.4 und 0. Nach [5] stellt die thermische Komponente des Raumes den dominierenden Faktor für die Behaglichkeit dar. Der Einfluss von Akustik, Licht, olfaktorischen Güte, Luftqualität und Temperaturschwankungen auf die thermische Behaglichkeit wird in [11] untersucht. Nach [8] kann die subjektive Bewertung des thermischen Komforts durch die akustische Umgebung beeinflusst werden, aber die subjektive Bewertung von Bürogeräuschen nicht von der thermischen Umgebung. Im Rahmen von [18] wird die kombinierte Wirkung von Temperatur und Lärm näher betrachtet und feststellt, dass der Raum als unbehaglich eingestuft wird, sobald eine Raumrandbedingung als unbehaglich empfunden wird. Der Einfluss des als negativ empfundenen Faktors auf die Gesamtzufriedenheit ist immer größer als der eines positiv empfundenen Faktors [12].

2.2. Hygrische Behaglichkeit

Der Mensch verfügt über keinen Feuchtesinn zur Wahrnehmung der Luftfeuchte. Sein Behaglichkeitsempfinden wird jedoch vom Feuchtegehalt der Luft beeinflusst, der von der Wärmeabgabe über die Verdunstung des Wassers auf der Haut (Schweiß) abhängt und durch Lüftung, Alltagsaktivitäten des Menschen sowie Pflanzen dem Raum zusätzlich zugefügt wird. Die menschliche Reaktion auf die Luftfeuchte erfolgt erst bei extremen Situation, wie Schwüle oder Trockenheit der Schleimhäute und der Haut. Hohe relative

Luftfeuchte wird als unbehaglich, feucht und stickig empfunden. Zu geringe Luftfeuchte trocknet die Schleimhäute aus und die Luft wirkt staubig.

Beeinflusst werden vom Feuchtegehalt der Luft sowohl die Temperaturempfindung als auch die Wahrnehmung der Luftqualität, siehe Ziffer 2.5. Bild 7 stellt die Behaglichkeit bei verschiedenen Kombinationen der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur in geschlossenen Räumen dar. Es gibt, ähnlich wie im Bild 6 Bereiche an, bei welchen Kombinationen von Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte das Raumklima als behaglich, noch behaglich oder nicht behaglich empfunden wird.

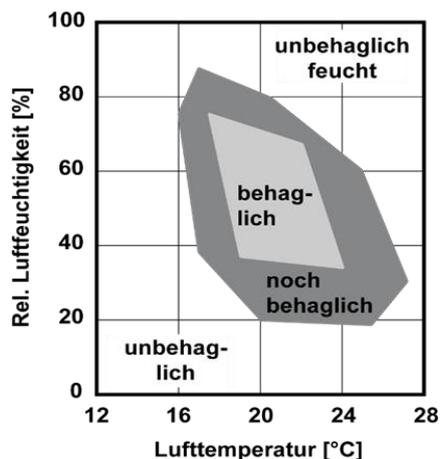


Bild 7: Das Diagramm der hygrothermischen Behaglichkeit in geschlossenen Räumen unter Kombination von relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur, nach [26].

Die Auswirkung der relativen Luftfeuchte auf die thermische Behaglichkeit ist bei den üblichen Verhältnissen im Raum (40% bis 60%), wie

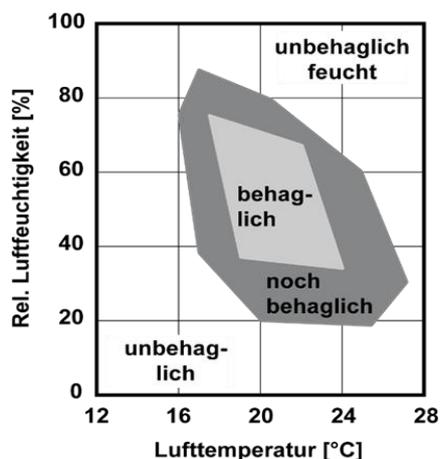


Bild 7 zeigt, nicht sehr groß.

2.3. Akustische Behaglichkeit

Der Mensch ist im Alltag zahlreichen Schallereignissen, z. B. Sprache, Geräuschen oder Klängen, ausgesetzt, Bild 8. Sie entstehen im Raum oder gelangen von benachbarten Räumen (innen und außen) dort hinein und bilden das akustische Raumklima. Die Zufriedenheit mit den akustischen Umgebungsbedingungen gewährleistet die akustische Behaglichkeit und hängt, wie Bild 9 zeigt, von physikalischen, physiologischen und sonstigen Einflüssen ab.

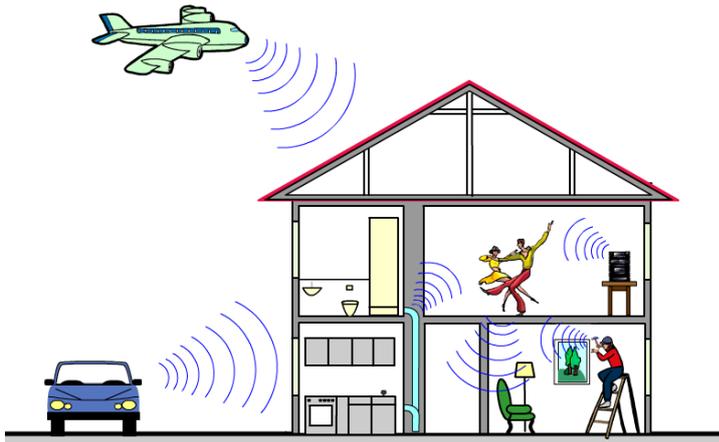


Bild 8: Schematische Darstellung der internen und externen akustischen Einwirkungen auf Gebäude und in Räumen.

Zu den physikalischen Einflüssen gehören z. B. der Schallpegel, die Nachhallzeit, die Sprachverständlichkeit und die Schalldämmung der Umschließungsbauteile. Optische und thermische Einflüsse gehören zu den sonstigen physikalischen Parametern. Im Zusammenhang mit der akustischen Behaglichkeit in Räumen kommt auch der akustischen Privatheit eine besondere Bedeutung zu. Dies ist insbesondere für die Nutzer von Großraumbüros, in Arztpraxen und anderen Räumen, in denen vertrauliche Gespräche stattfinden, relevant [8].

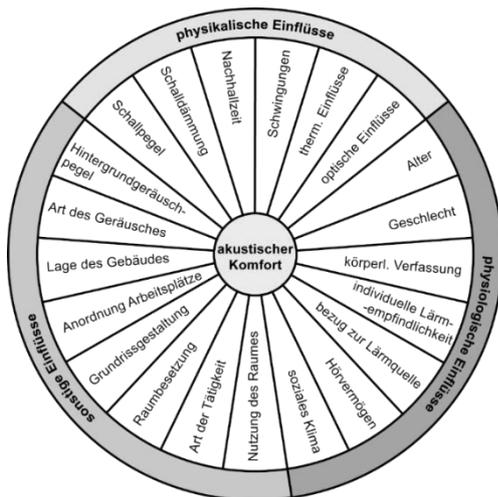


Bild 9: Physikalischen, physiologischen und sonstigen Einflüsse, die die akustische Behaglichkeit in Räumen beeinflussen, nach [8].

Kein oder zu wenig Schall im Raum führt nicht nur zum Unbehagen, sondern kann auch erhebliche gesundheitliche und psychische wie auch soziale Folgen haben, z. B. das Gefühl, eingesperrt und isoliert zu sein. Auch Orientierungslosigkeit, Verwirrtheit und das psychische Ungleichgewicht können Folgen totaler Ruhe und Stille im Raum sein. Beim zu geringen Grundgeräuschpegel im Raum können beispielsweise unerwünschte Nachbarschaftsgeräusche dominieren und zur Lärmbelästigung der Rauminssassen führen.

Im Rahmen von [11] wird festgestellt, dass zwischen der thermischen Behaglichkeit (unbehaglich – behaglich) und störenden Geräuschen (viele – wenige störende Geräusche) ein Zusammenhang besteht. Danach fühlen sich die Rauminssassen sehr warm oder unbehaglich warm, wenn eine niedrige akustische Güte im Raum vorliegt. Nach [17, 18] wird festgestellt, dass die akustische Behaglichkeit bei höheren Temperaturen von 27°C bis 39°C vornehmlich vom Schalldruckpegel und nachgeordnet von der Temperatur beeinflusst wird. Es wird dabei auch gezeigt, dass sie sehr stark auch von der Interaktion beider Parameter bestimmt wird. Mit zunehmender Operativtemperatur (Kombination aus der Raumluft- und der Strahlungstemperatur der Rumumschließungsflächen) und abnehmendem Schallpegel nimmt die Behaglichkeit im Raum zu, wie es Bild 10 nach [8] zeigt. Dargestellt sind im Bild Kurven gleicher Behaglichkeit (links) bzw. Unbehaglichkeit (rechts), jeweils in Prozent, in

Abhängigkeit von der Operativtemperatur und des Schalldruckpegels.

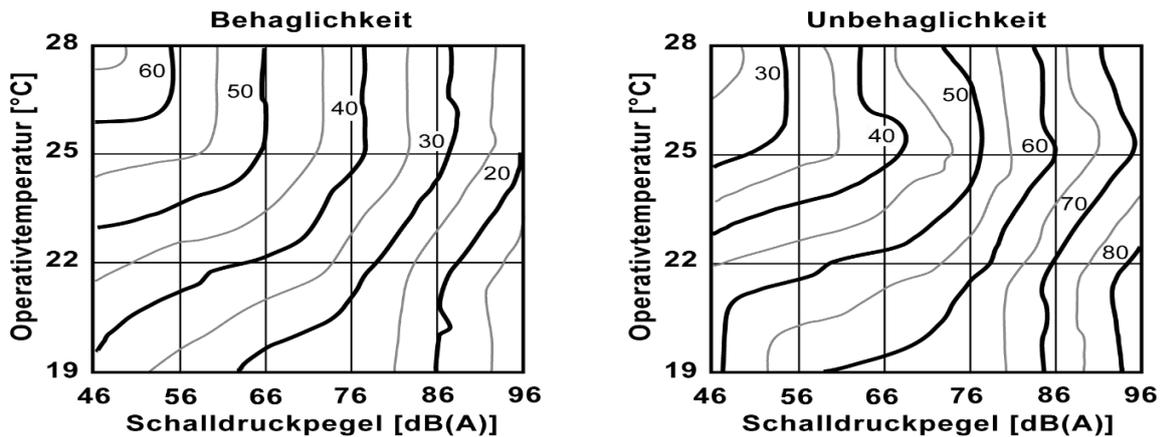


Bild 10: Linien gleicher Behaglichkeit (links) bzw. Unbehaglichkeit (rechts) in Abhängigkeit von der Operativtemperatur und dem Schalldruckpegel [18].

Es ist die Tendenz festzustellen, dass mit zunehmendem Schalldruckpegel um 30 bis 50 dB die thermische Umgebung als unbehaglicher eingestuft wird [8]. Ein Temperaturanstieg von 26 °C auf 30 °C hat den gleichen Effekt auf die Gesamtbehaglichkeit, wie der Anstieg des Schalldruckpegels von 40 dB auf 70 dB [2]. In warmer und lärmreicher Umgebung wird ein Absinken der Gesamtakzeptanz festgestellt [8].

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Behaglichkeit in Büroräumen befasst sich die Arbeit [8] mit der Zusammenwirkung von raumakustischen und thermischen Randbedingungen dort und entwickelt ein raumakustisch-thermisches Behaglichkeitsmodell (RTBM). Entwickelt wurde das Modell anhand von raumakustischen Messungen, Probandenbefragungen und einer Strukturgleichungsanalyse. Aufbauend darauf werden Prognosegleichungen (1) und (2) zur Bestimmung der Behaglichkeit in Büros entwickelt. Schematisch ist das entwickelte Modell in Bild 11 wiedergegeben.

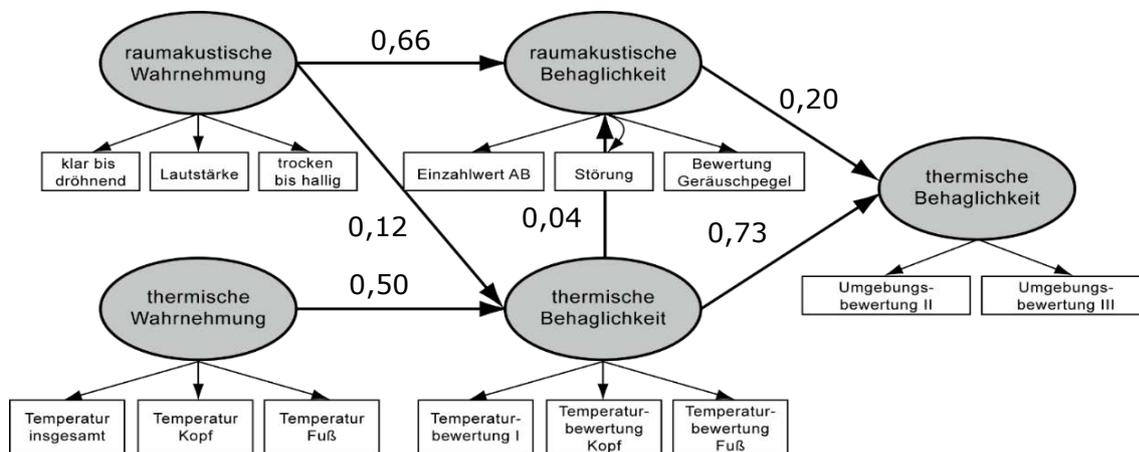


Bild 11: Schematische Darstellung des Strukturgleichungsmodells RTBM mit Angabe der Pfadkoeffizienten, nach [8].

$$B_{allg} = -0,05 * t_g + 2,257 - 0,054 * T - 26,752 \quad [1]$$

$$B_g = -0,046 * t_g^2 + 2,257 * t_g - 0,054 * T + 0,072 * g - 26,931 \quad [2]$$

T Nachhallzeit
 t_g Globetemperatur
 g Emissionsart

Als Eingangsparameter gehen die Globetemperatur und die Nachhallzeit im Raum in die Gleichungen ein. Gleichung (2) berücksichtigt auch die Art des Geräusches, Sprache, Telefon, Tastatur und Drucker, als Einflussparameter. Damit ist ein Vergleich der sich

einstellenden Behaglichkeit über ein breites Spektrum an raumakustischen und thermischen Randbedingungen möglich. Bei der Verwendung anderer Randbedingungen, Probandenstruktur und einer größeren Anzahl von Probanden, als in [8] zu Grunde gelegt, sind Abweichungen möglich.

2.4. Visuelle Behaglichkeit

Das Licht ist für die Wahrnehmung des Raumes, die Orientierung und das Sicherheitsgefühl im Raum von besonderer Bedeutung. Das visuelle Raumklima umfasst all die Lichtanteile, die im Raum entstehen, von Raumumschließungsflächen reflektiert werden oder von außen dort hineingelangen, Bild 12. Visuelle Behaglichkeit

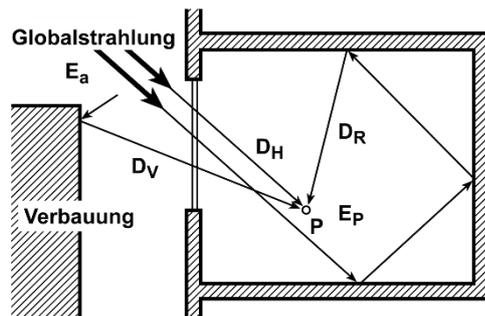


Bild 12: Schematische Darstellung eines Raumes mit Angabe der direkten und reflektierten kurzwelligen Strahlungsanteile (Tageslicht).

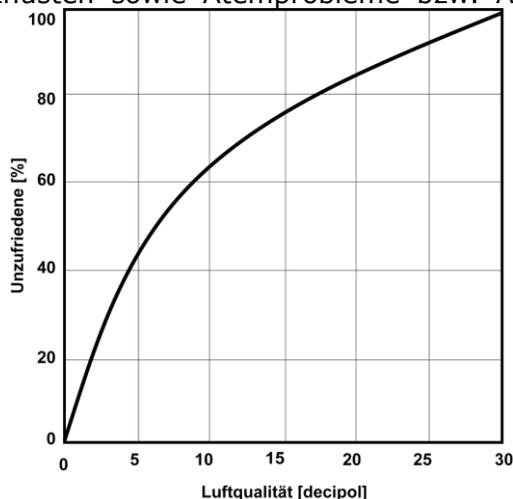
wird unabhängig von der Art der Beleuchtung (Tages- oder Kunstlicht) durch ausgeglichene Beleuchtung des Raumes (ohne störende Blendung), der Raumnutzung und Tätigkeit der Rauminsassen angepasstes Beleuchtungsniveau gewährleistet. Die Blendfreiheit und Angenehmheit sind zwei wesentliche Aspekte der Raumbeleuchtung bezüglich des visuellen Komforts [21]. Zusätzlich ist auch die Lichtverteilung im Raum dabei von Bedeutung, sie wirkt orientierend und vermittelt das Sicherheitsgefühl. Während eine blendungsfreie Beleuchtung und dem Zweck angepasste Beleuchtungsstärke das menschliche Sehvermögen unterstützen, wirkt das blendende Licht desorientierend [4]. Über 90 % der Büroangestellten würde lieber bei Tageslicht arbeiten als unter Kunstlicht [24]. Die Nutzung von Tageslicht ist anregend und gesundheits- sowie Leistungsfördernd und führt zur Reduzierung des Energieverbrauchs.

Ein Zusammenhang zwischen der thermischen Behaglichkeit und Licht (blendendes – arbeitsgerechtes Licht) wird in [11] festgestellt. Danach wird unabhängig von der Art der Belüftung eine Umgebung als kalt oder unbehaglich kalt empfunden, wenn die Lichtverhältnisse dort schlecht sind und eine als schwankend empfundene Temperatur vorliegt. D. h. schlechte bis mittlere Lichtverhältnisse reduzieren eine Sehr-Warm-Empfindung im Raum. In mechanisch belüfteten Gebäuden fühlen sich die Menschen thermisch unbehaglich, bezeichnen den Luftzustand als verbraucht sowie trocken und fühlen sich durch Blendungseffekte unbehaglicher.

2.5. Olfaktorische Behaglichkeit

Olfaktorische Behaglichkeit betrifft die Wahrnehmung und Bewertung von Gerüchen im Raum. Wahrgenommen werde die Gerüche erst dann, wenn ihre Moleküle durch Luftfeuchte an die Raumluft abgegeben werden. Über die Atemluft gelangen sie an die Rezeptorzellen an der Nasenschleimhaut. Ihre Verarbeitung erfolgt im limbischen System, das als physiologisches Zentrum emotionaler Reizverarbeitung gilt [19]. Bei der Rückmeldungen auf Geruchsstimuli scheint es, dass die meisten Reaktionen erlernt sind [13]. Raumgerüche sind in der Regel flüchtige Empfindung, die nur kurz wahrgenommen werden, aber entscheidend dazu beitragen, ob der Raum als angenehm oder unangenehm empfunden wird. Insbesondere ist die Hygiene für die Qualität der Raumluft entscheidend. Auch der Schimmel, die Transpiration, die Speisen und verwendeten Baumaterialien können Gerüche verursachen. Bei fenstergelüfteten Räumen spielt nach [11] die olfaktorische Güte bei der thermischen Behaglichkeit eine Rolle. Eine niedrige olfaktorische Güte erhöht das Sehr-Warm-Empfinden um das Doppelte.

Die Luftqualität im Raum wird neben den Gerüchen insbesondere durch die Luftschadstoffe, die die natürliche Zusammensetzung der Luft verändern, beeinträchtigt. Verbrauchte und modrige Raumluft wirkt sich negativ auf die Behaglichkeit und damit auf die Gesundheit. Müdigkeit, Konzentrationsstörung, Reizhusten sowie Atemprobleme bzw. Atemwegser-



krankungen können die Folge sein [24].

Bild 13 gibt den Anteil der Unzufriedenen im Raum in Abhängigkeit von der Luftqualität graphisch wieder. Nach [11] besteht auch ein Zusammenhang zwischen der thermischen Behaglichkeit (unbehaglich – behaglich) und der Luftqualität (verbrauchte – frische Luft). Es wird festgestellt, dass Menschen sich in mechanisch belüfteten Gebäuden thermisch unbehaglich fühlen und den Luftzustand als verbraucht und trocken bezeichnen.

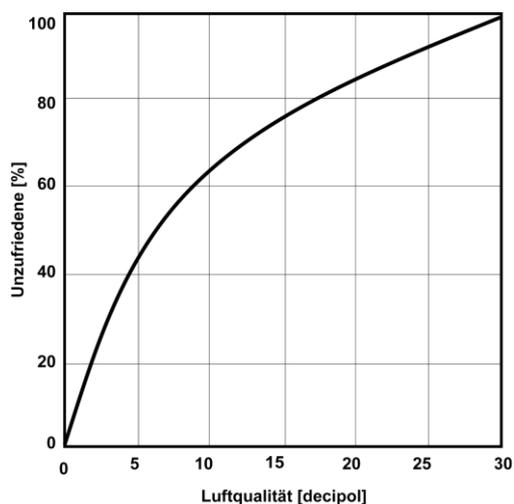


Bild 13: Anteil unzufriedener Personen im Raum in Abhängigkeit von der empfundenen Luftqualität, nach [14].

Die Qualität der Luft ist nicht nur für die Behaglichkeit im Raum maßgebend, sondern auch für die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit der Raumnutzer. Die Gesundheitsschäden, die durch Luftschadstoffeinwirkungen verursacht werden können, umfassen ein breites Spektrum. Die wesentliche Komponente der Luftverunreinigung in Räumen ist das Kohlendioxid. Es ist fast geruchsneutral und ungiftig, hat erst ab einer bestimmten Konzentration direkte physiologische Wirkung auf den Körper [25]. Der Arzt Max von Pettenkofer (1818 – 1901) stellte 1858 fest, dass «jede Luft als schlecht und für einen beständigen Aufenthalt als ungeeignet zu erklären [ist], welche in Folge der Respiration und Perspiration der Menschen mehr als 1 pro mille Kohlensäure enthält.»[25].

3. Zusammenfassung

Die Behaglichkeit ist ein einfacher Begriff, der komplexe Zusammenhänge hinter sich verbirgt. Sie ist seit fast einem Jahrhundert Gegenstand der Forschung aber dennoch nicht vollständig erforscht. In Räumen bringt die Behaglichkeit die Bewertung des Wahrgenom-

menen Raumklimas zum Ausdruck. Dazu liegen zahlreiche Untersuchungen und Vorhersagemodelle vor, die sich aber hauptsächlich mit der thermischen Behaglichkeit befassen. Zur Wechselwirkung bzw. zum Zusammenspiel sämtlicher Parameter des Raumklimas, Wärme, Feuchte, Schall, Licht und Gerüche inklusive Raumluftqualität liegen kaum fundierte Ergebnisse vor. Einzel Untersuchungen, die im Rahmen des Beitrags präsentiert werden, befassen sich mit ausgewählten Phänomenen. Ihre Ergebnisse sind vor allem von wenig einheitlichen Versuchsrandbedingungen geprägt und sind teilweise widersprüchlich. Um Aussagen zur Behaglichkeit infolge der komplexen bauphysikalischen Einflüsse treffen zu können, sind ganzheitliche Ansätze erforderlich, die ihre Wechsel- bzw. Zusammenwirkung differenzierter betrachten.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Abou-Elleal, E. R. E.: Raumakustik - Interaktion visueller und auditiver Wahrnehmungen. Dissertation, RWTH Aachen (2003).
- [2] Alm, O., Witterseh, Thomas, et al.: The impact of human perception of simultaneous exposure to thermal load, low-frequency ventilation noise and indoor air pollution. Proc. of 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Edinburgh, United Kingdom (1999), S. 270–275.
- [3] Balazova, I., Clausen, Geo, et al.: Open-plan Office Environments: A Laboratory Experiment to Examine the Effect of Office Noise and Temperature on Human Perception, Comfort and Office Work Performance.
- [4] Bierbaum, H., Donat, M., et al.: Österreichischer Leitfaden; Außenbeleuchtung, Licht, das mehr nützt als stört Friedrich Druck & Medien GmbH (2018), 1. Auflage.
- [5] Candas, V., Dufour, A.: Thermal comfort: multisensory interactions? Journal of physiological anthropology and applied human science 24 (2005), 1, S. 33–36.
- [6] Cheng, V. and Ng, E.: Thermal Comfort in Urban Open Spaces for Hong Kong. Architectural Science Review 49 (2006), No. 3, S. 236–242.
- [7] Demmelhuber, S.: Architektur und Psychologie: Wie Räume auf Menschen wirken. BR24.
- [8] Dworok, P.-M.: Raumakustisch-thermisches Behaglichkeitsmodell für Büroräume. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [9] Dworok, P.-M., Mehra, S. R.: Behaglichkeit - Wechselwirkungen bauphysikalischer Einflüsse. Bauphysik 40 (2018), H. 1, S. 9–18.
- [10] Goshayeshi, D., Shahidan, M. F., Khafi, F. et. al.: A review of researches about human thermal comfort in semi-outdoor spaces. European Online Journal of Natural and Social Sciences 2 (2013), No. 2, S. 516–523.
- [11] Hellwig, R.: Thermische Behaglichkeit; Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht.
- [12] Kim, J., Dear, R. de: Nonlinear relationships between individual IEQ factors and overall work-space satisfaction. Building and Environment 49 (2012), S. 33–40.
- [13] Majchrzak, D.: Die Rolle des limbischen systems in der Sinneswahrnehmung. ResearchGate.
- [14] Mayer, E. und Schwab, R.: Geruchsbeurteilung in Gebäuden nach unterschiedlichen Methoden. IBP-Mitteilung 22 (1995), Fraunhofer-Institut für Bauphysik Stuttgartnr.276.
- [15] Mehra, S.R. und Gertis, K.: Wohlbefinden.; Abschlußbericht der DFG-Forscherguppe «Ingenieur-bauten – Wege zu einer ganzheitlichen Betrachtung» FOGIB, an der Universität Stuttgart, Stuttgart (1997).
- [16] Mehra, S.R. und Veres, E.: Menschliches Wohlbefinden und Brückenbauwerke. Ges.-Ing. 121H. 5, S. S. 241–251.

- [17] Nagano, K., Horikoshi, T.: New index of combined effect of temperature and noise on human comfort: summer experiments on hot ambient temperature and traffic noise. *Archives of Complex Environmental Studies*, 3-4 (2001). *Archives of Complex Environmental Studies*, 3-4 (2001).
- [18] Nagano, K., Horikoshi, T.: New comfort index during combined conditions of moderate low ambient temperature and traffic noise. *Energy and Buildings* 37 (2005), 3, S. 287–294.
- [19] o.V.: Raumgeruch kann Stress verursachen. *Planungshilfe, Arbeitsfeld Wohnen + Unterstützungssettings*.
- [20] Püttmann, H.: Bioklimatische Bewertung von Bebauungsstrukturen - am Beispiel zweier Wohngebiete in Halle / S.
- [21] Raynham, P. J.: *Public Lighting in Cities*. The Bartlett School of Graduate Studies, University College London.
- [22] Richter, W.: *Handbuch der thermischen Behaglichkeit*, Dortmund (2007),
- [23] Rubner, M.: Zur Bilanz unserer Wärmeökonomie. . 27, S.69 (1896). *Arch. Hyg* 27 (1896, S. S. 69).
- [24] Schakib-Ekbatan, K.: Bürogebäude auf dem Prüfstand: Zur Zufriedenheit mit Raumklima und Raum am Arbeitsplatz unter Einbindung der NutzerInnenperspektive in die Nachhaltigkeitsbewertung. Diss., Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2015),
- [25] Sedlbauer K., Holm, A. und Hellwig, R.: *Raumklima und Schülerleistung*.
- [26] Sedlbauer, K., Holm, A., Künzle, H.M. et. al.: *Raumklima und Innovation; Eine Aufgabe der Bauphysik*. *WKSB* 51 (2006), H. 57, S. 9–16.

Tageslichtplanung Motivation / Chancen / Kosten

Mathias Wambsganß
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland

3ipi – lichtplaner und beratende ingenieure
partnerschaftsgesellschaft mbh
seidt, wambsganß, zach
münchen, deutschland



Tageslichtplanung

Motivation / Chancen / Kosten

1. «Tageslicht ist wichtig!»

Diesem Satz wird in aller Regel nicht widersprochen. Trotzdem wird in vielen Projekten keine explizite, an Zielen orientierte Tageslichtplanung durchgeführt und nicht wenige Projekte weisen - mal auf den ersten Blick, mal erst bei genauerem Hinsehen erkennbar - Defizite im Umgang mit Tageslicht auf. Warum ist das so? Dafür gibt es mehr als einen Grund und teils kann über diese Gründe auch nur spekuliert werden.

Liegt es an den eher geringen ordnungsrechtlichen Vorgaben für das Tageslichtangebot im Innenraum, trotz Arbeitsstättenrichtlinien, Landesbauordnungen, Zertifizierungssystemen oder der seit 2019 verfügbaren DIN EN 17037 «Tageslicht in Gebäuden»?

Sind es Defizite bei der Ausbildung von Architekten, die meist ein gutes, implizites aber eher selten ein explizites Wissen von Tageslicht und den Planungsgrundlagen haben?

Werden energetisch relevante bauphysikalische Fragen des sommerlichen und winterlichen Wärmeschutzes einseitig behandelt und das Tageslichtangebot im Innenraum ist dann schlicht das, was am Ende dieses Prozesses «übrig bleibt»?

Fehlt eine Leistungsbeschreibung «Tageslichtplanung» aus der sich Aufgabenstellungen ableiten und Aufwände abschätzen lassen?

2. Motivation und Vorgehen bei Tageslichtplanungen

2.1. Motivation

Die Auseinandersetzung mit Tageslicht beginnt frühzeitig im Planungsprozess mit einer Analyse der geografischen Lage und der umliegenden Verbauung. Das Verständnis der Dynamik der Tageslichtverhältnisse ist essenziell für die Planung von Kubatur und Öffnungen sowie der Anordnung der Räume. «Dynamik» bezieht sich in diesem Fall sowohl auf die im Tagesgang variable Lichtmenge und deren spektrale Zusammensetzung als auch auf die Art der Lichtverteilung. Man kann dazu zwischen der «Lichtquelle Sonne» mit direkter Strahlung, der dazu gehörenden Strahlung aus der «blauen Himmelshalbkugel» und der Strahlungssituation des «bedeckten Himmels» unterscheiden. Die daraus resultierenden Anforderungen an eine Fassade könnten unterschiedlicher nicht sein.

Im Planungsprozess wird gerne von «Tageslichtoptimierung» gesprochen. Es stellt sich aber die Frage nach welchen Kriterien wird letztendlich optimiert?

- Visuellen Fragestellungen: Tageslichtversorgung, Tageslichtautonomie, Aussicht, Blendung, Ergonomie, ...
- Nicht-visuelle Fragestellungen: Besonnung, melanopische Tageslichtautonomie, ...
- Energetische Fragestellungen: Reduktion Strombedarf Kunstlicht, sommerlicher Wärmeschutz, winterliche solare Gewinne, ...
- Ästhetische Fragestellungen: Fassadengestaltung, Sonnenlauf, Schattenwurf, ...

2.2. Vorgehen

Um sich dem Thema zu nähern ist die Kenntnis einschlägiger Regelwerke hilfreich. Dies sind beispielhaft:

- Bauordnungen der Länder
- Normen wie DIN 5034 / DIN EN 17037 / DIN EN 5031-100 / DIN EN 12464-1 / ...
- Arbeitsstättenrichtlinien
- Zertifizierungssysteme wie DGNB / BNB / LEED / BREEAM / WELL-Certification, ...

Im weiteren Ablauf bieten sich folgenden Schritte an:

- Optimierungsziele festlegen
- Abstraktion auf Modellebene als Basis für Simulationen erzeugen
- Potentialstudien zur Identifikation wesentlicher «Stellschrauben» durchführen
- Regelmäßige Abstimmung mit der Objektplanung
- Ebenso Abstimmung mit der Bauphysik zu thermischen und energetischen Fragen
- Rekursion ggfs. auch mehrfach relevanter Schritte

3. Analyse von realen Tageslichtprojekten

Im Rahmen des Vortrages werden einzelne Projekte kurz vorgestellt, nach einheitlichen Kriterien sortiert und der dafür angesetzte Aufwand auf Basis der Angebotskalkulation genannt. In diesem begleitenden Schriftstück wird nur auf die tabellarische Zusammenfassung eingegangen.

Projekt	Geometrie					Varianten			Auswertungen						Bericht			Aufwand				
	Räume einfach	Räume mäßig komplex	Räume komplex	Umgebung einfach	Umgebung komplex	Ist-Zustand	1 - 2 Rekursionen	3-4 Rekursionen	Besonnung	TQ-Werte / Verlauf	Beleuchtungsstärke	Leuchtdichte	Autonomie visuell	Autonomie melanopisch	Strombedarf KL	LEED einfach	LEED komplex	Workshop	kurz erläutern	ausführlich	Fördergeber	Menschtage
V01	x			x		x				x									x			1,1
V02	x				X	x			x										x			3,4
V03																		x				3,5
V04	x			x		x	x			x			x	x					x			3,9
V05		x		x		x		x		x			x	x					x			4,4
V06	x			x		x					x				x				x			4,4
V07			X		X	x	x				x		x	x					x			5,9
V08	x			x		x							x			x			x			9,0
V09			X		X	x		x			x		x	x						x		18,0
S01	x			x		x	x			x	x								x			1,8
S02			X		X	x		x		x	x		x	x						x		18,8
P01		x		x		x	x						x	x	x				x			2,6
P02			X	x		x		x	x	x		x	x	x							x	13,4
Ö01		x		x	X	x				x									x			2,7
H01			X	x	X				x											x		10,7

Abbildung 1: Markierung der Projekte mit besonderer Komplexität der Geometrie und damit des Modells

Projekt	Geometrie				Varianten			Auswertungen						Bericht			Aufwand Menschstage					
	Räume einfach	Räume mäßig komplex	Räume komplex	Umgebung einfach	Umgebung komplex	Ist-Zustand	1 - 2 Rekursionen	3-4 Rekursionen	Besonnung	TQ-Werte / Verlauf	Beleuchtungsstärke	Leuchtdichte	Autonomie visuell	Autonomie melanopisch	Strombedarf KL	LEED einfach		LEED komplex	Workshop	kurz erläuternd	ausführlich	Fördergeber
V01	x			x		x				x									x			1,1
V02	x				x	x			x										x			3,4
V03																		x				3,5
V04	x			x		x	x			x			x	x					x			3,9
V05		x		x		x		x		x			x	x					x			4,4
V06	x			x		x					x				x				x			4,4
V07			x		x	x					x		x	x					x			5,9
V08	x			x		x							x			x			x			9,0
V09			x		x	x		x			x		x	x						x		18,0
S01	x			x		x	x			x	x								x			1,8
S02			x		x	x		x		x	x		x	x						x		18,8
P01		x		x		x	x						x	x	x				x			2,6
P02			x	x		x		x	x		x	x	x								x	13,4
Ö01		x		x	x	x				x									x			2,7
H01			x	x	x				x											x		10,7

Abbildung 2: Markierung der Projekte mit melanopischen Fragestellungen

Projekt	Geometrie				Varianten			Auswertungen						Bericht			Aufwand Menschstage					
	Räume einfach	Räume mäßig komplex	Räume komplex	Umgebung einfach	Umgebung komplex	Ist-Zustand	1 - 2 Rekursionen	3-4 Rekursionen	Besonnung	TQ-Werte / Verlauf	Beleuchtungsstärke	Leuchtdichte	Autonomie visuell	Autonomie melanopisch	Strombedarf KL	LEED einfach		LEED komplex	Workshop	kurz erläuternd	ausführlich	Fördergeber
V01	x			x		x				x									x			1,1
V02	x				x	x			x										x			3,4
V03																		x				3,5
V04	x			x		x	x			x			x	x					x			3,9
V05		x		x		x		x		x			x	x					x			4,4
V06	x			x		x					x				x				x			4,4
V07			x		x	x					x		x	x					x			5,9
V08	x			x		x							x			x			x			9,0
V09			x		x	x		x			x		x	x						x		18,0
S01	x			x		x	x			x	x								x			1,8
S02			x		x	x		x		x	x		x	x						x		18,8
P01		x		x		x	x						x	x	x				x			2,6
P02			x	x		x		x	x		x	x	x								x	13,4
Ö01		x		x	x	x				x									x			2,7
H01			x	x	x				x											x		10,7

Abbildung 3: Markierung der Projekte mit umfangreichem Berichtswesen

Die Tabellen in Abbildung 1 und 2 zeigen keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Komplexität der Geometrie bzw. den noch neuen Fragen nach der melanopischen Lichtwirkung und dem kalkulierten Projektaufwand. Am ehesten lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem vom Auftraggeber geforderten Berichtswesen und dem zeitlichen Aufwand herstellen. Insgesamt zeigt die Übersicht aber einen großen Bereich an möglichen Leistungen und dem damit verbundenen Aufwand. Eher einfache Fragestellungen sind nur mit etwas mehr als einem «Menschtag» kalkuliert, während aus komplexeren Aufgabenstellungen einen Aufwand von bis zu zwanzig «Menschtagen» resultiert.

4. Leistungsbilder Lichtplanung der LiTG

Die Deutsche Lichttechnische Gesellschaft hat im Jahr 2019 die Schrift Nr. 38 Leistungsbilder Lichtplanung Teil 1 «Tages- und Kunstlicht» veröffentlicht. Dabei wurden, angelehnt an die bestehenden Leistungsbilder der HOAI, die «Grundleistungen» mit lichttechnischem Vokabular präzisiert und die «Besonderen Leistungen» umfangreich ergänzt.

Nur derart aufgeklärte Auftraggeber*innen können sachgerecht entscheiden, ob und inwieweit Tageslicht und Kunstlicht von ausgewiesenen Spezialist*innen bedarfsgerecht bearbeitet wird, oder ob das »Lebensmittel Licht« von anderen Objekt- und Fachplaner*innen «nebenbei» mitgeplant werden soll. Nur in ganz wenigen Fällen genügt eine eher schlichte «handwerkliche» Lichtlösung, um der tatsächlichen Bedeutung des Lichts für den Menschen und den Ansprüchen von Auftraggeber*innen und Nutzer*innen gerecht zu werden, was immer wieder zu Schäden und Streitfällen bei der Planung und Ausführung führt.



Abbildung 4: Leistungsbilder Lichtplanung Teil 1 «Tages- und Kunstlicht»

5. Zusammenfassung

Die Analyse der abgewickelten Projekte und die Bearbeitung der Leistungsbilder Lichtplanung der LiTG führen zu folgenden Schlüssen.

- Es gibt nur wenige konkrete Vorgaben, die zwingend eingehalten werden müssen.
- Diesen steht eine Vielzahl von Möglichkeiten/Zielen gegenüber, die mit dem Auftraggeber vereinbart werden können und die mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Beitrag zu einem »besseren Gebäude« leisten.
- Die Leistungsbilder der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V. (LiTG) sind dazu ein sehr guter Ausgangspunkt und eine gute Diskussionsgrundlage.
- Eine möglichst frühe Beauftragung in Phase 0 oder 1 ist für einen umfassenden Erfolg einer Tageslichtplanung essenziell.
- Die Kosten für die Durchführung von Untersuchungen sind nach der Analyse von realen Projekten überschaubar.
- Entsprechende Planungswerkzeuge stehen zur Verfügung.
- **Tageslicht braucht und verdient eine stärkere Lobby.**

Raumluftqualität – Stand der Mess- und Sensorüberwachung

Karl-Heinz Weinisch
Geschäftsführer, Bausachverständiger
IQUH GmbH
Institut für Qualitätsmanagement und Umfeldhygiene,
Weikersheim, Deutschland



Raumlufthqualität – Stand der Mess- und Sensorüberwachung

Eine gute Raumlufthqualität ist ein Garant für unsere Gesunderhaltung. In neu gebauten oder renovierten Gebäuden können extreme, nicht normgerechte Raumklimabedingungen die Schadstoff-Kontrollmesswerte verfälschen. Wenn deshalb vertraglich vereinbarte Grenzwerte nicht eingehalten werden können, folgen unverschuldete Abnahme- oder Rechtsprobleme. Besonders nachhaltige Baustoffe wie Holz, Holzwerkstoffe, Hanf, Flachs, Zellulose oder Stroh geben natürlicherweise Gerüche/Emissionen ab, für die es ebenfalls hygienebezogene behördliche Leit- und Richtwerte gibt. Bei Raumlufthanalysen, die mit normgerechten Messraumvorbereitungen und sensorüberwachten Raumklimabedingungen durchgeführt werden, sind erfahrungsgemäß keine Grenzwertüberschreitungen zu erwarten. Anders sieht es aus, wenn beispielsweise wegen fehlender Beschattung die Grenzwerte durch hohe Raumtemperaturen nicht eingehalten werden.

Die Einschätzung von gesundheitsrelevanten Klimafaktoren, Gasen und Partikeln in Gebäuden mit Hilfe von Sensor Handgeräten oder mit Innenraumlufth-Analysetechniken sorgt für eine normgemäße Überwachung der Atemlufthqualität. Eine möglichst schadstoffarme Raumlufth spielt für unsere Gesundheit eine große Rolle, da wir durchschnittlich ca. 10-15 kg Atemlufth zu uns nehmen – das sind ca. 20.000 Atemzüge jeden Tag.

Personen, die in geschlossenen Räumen arbeiten, verbringen im Winter möglicherweise zwischen 8 und 20 Stunden täglich in einer «künstlichen» Gebäudeatmosphäre. Schlechte Raumlufthqualität beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden, sondern sie kann auch dazu führen, dass die Personen anfälliger für Atemwegserkrankungen werden, oder dass bestehende Atemwegserkrankungen oder Allergien sich verschlimmern. Zwangsläufig wird schlechte Raumlufth sich infolgedessen auch negativ auf die Arbeitsleistung auswirken.

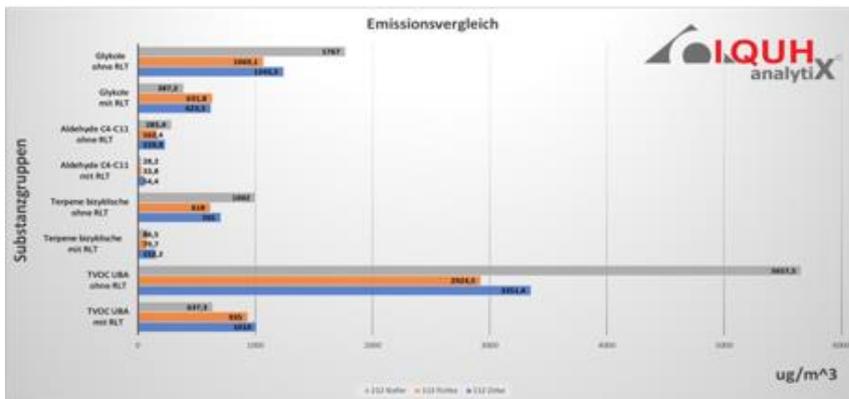


Abbildung 1: Binder-Praxisstudie in 3 Räumen mit unterschiedlichen Holzarten – Fichte, Kiefer, Zirbe. Ergebnisse ohne und mit laufender RLT Anlage.

1. Raumlufthqualität

Die Raumlufthqualität in Gebäuden wird beeinflusst durch:

- Staub
- Sporen
- Rauch
- Organische Verbindungen und Gerüche
- Ansammlung von Peroxiden, Gas und/oder Gasemissionen
- Außenlufthqualität
- Luftfeuchtigkeit und Temperatur
- Unzureichende Belüftung

1.1. Raumlufte/Raumklima-Sensormessungen

Mit PID¹ oder anderen elektro-chemischen Sensor-Analysegeräten (Analog/Kabel oder Bluetooth/Kabellos) kann orientierend das Niveau der Luftqualität abgeschätzt werden.

Die Überwachung folgender Parameter hat gesundheitliche, aber auch behaglichkeitsrelevante Vorteile:

- Partikel (PM 0,3/1/2,5/10) und Radon.
- Flüchtige organische Verbindungen (VOC), Formaldehyd (CH₂O).
- Anorganische Gase wie Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO), Schwefelverbindungen (HS etc.), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃) etc..
- Temperatur, Relative/absolute Luftfeuchtigkeit, Luftzirkulation/Turbulenzgrad und Luftzug.

Qualitative Sensormessungen sind Schätzverfahren bei den organischen Luftanteilen (VOC)² mit geringerer Messgenauigkeit und bei den anorganischen Verbindungen (CO₂) mit höherer Messgenauigkeit.



Abbildung 2: Kontrolle der Feinstaubreinigung (PM 1/2,5) vor VOC Luftmessung.



Abbildung 3: Klima Kontrollmessung Luftfeuchte und Temperatur vor VOC Luftmessung.



Abbildung 4: Lüftungsnachweis über CO₂/VOC Sensorwert vor VOC Luftmessung.

¹ PID - PhotoIonisationsDektoren

² Der VOC Sensormesswert ist ein orientierender Schätzwert. Er ist ungenau und hat eine hohe Querempfindlichkeit und ist mit den «normgerecht ermittelten» VOC Werten bei Luftprobenahmen nicht vergleichbar.

1.2. Baustoff-Grundlagen

Emissionsquellen in Gebäuden können Dämm-, Innenausbau- und Ausstattungsmaterialien, Wand- und Deckenbekleidungen, Fußbodenbeläge, Lacke, Farben, Dichtstoffe oder externe bzw. arbeiter- und nutzerbezogene Quellen wie Zigarettenrauchen, Verkehrs- oder Maschinenabgase von außen oder Reinigungsmaterial sein.

Emissionen die nicht aus Baustoffen sondern von außen kommen (Immissionen) können Messergebnisse verfälschen und sind deshalb auszuschließen. Verarbeitungsfehler müssen unbedingt vermieden werden, da sie zu Emissionsproblemen führen können.

Es wird empfohlen emissionsgeprüfte Baustoffe auszuwählen:

- Baustoffe mit Prüfsertifikaten Blauer Engel, natureplus, ec1plus, e1plus, Kammerprüfung gem. EN 16516
- Emissionsfreie bzw. emissionsbindende mineralische Baustoffe
- Anfangsemissionen/Gerüche durch organische Baustoffe gut ablüften
- Technische Merkblätter, Sicherheitsdatenblätter, EPD³ zu Produkten archivieren

2. Raumklima Sensormessungen

Das Raumklima setzt sich aus verschiedenen Parametern zusammen. Bei orientierenden Klimamessungen kommen Handmessgeräte mit einzelnen Sensoren oder Standmessgeräte (Bluetooth, WLAN unterstützt) mit mehreren unterschiedlichen Sensoren zum Einsatz.⁴

Eine norm- und rechtssichere VOC Raumluftmessung muss zwingend zusammen mit einer Raumklima Sensormessung erfolgen. Die Überprüfung der Dichtigkeit einer Gebäudehülle durch Unterdruckverfahren (BlowerDoor) oder CO₂ Tracergasmessung ist sinnvoll, nicht nur um undichte Stellen zu finden, sondern auch um die unkontrollierte Frischluftzufuhr und den Energieverlust bestimmen zu können.

Falls extreme Klimawerte während Raumluftmessungen herrschen, steigen VOC Werte an. Diese Richtwertüberschreitungen führen dann zu teuren und zeitaufwändigen Nachmessungen. Daher ist die Durchführung einer Raumluftmessung nur dann ratsam, wenn die Klima- und Messnormbedingungen schon Tage vor der Messung innerhalb der Norm liegen, da sonst die VOC Messergebnisse folgendermaßen verfälscht oder nicht anerkannt werden:

Klimasensoren	Norm-Wertebereich	Extrem-Wertebereich
CO ₂ Wert/Lüftungskontrolle	geringer ppm Wert	hoher ppm Wert
Luftwechselzahl	hoch	niedrig
Partikelzahl	Geringe Partikelzahl	Hohe Partikelzahl
Luftfeuchte	ca. 30-60 %	>60%
Materialfeuchte	trocken	feucht
Beschattung	vorhanden	nicht vorhanden
Temperatur außen	niedrig	hoch
Temperatur innen	niedrig	hoch
VOC Wert	niedrig	hoch

Kohlendioxid (CO₂)

Der CO₂ Wert ist ein Indiz für eine ausreichende Frischluftzufuhr. CO₂ gehört zu den natürlichen Bestandteilen der Luft. Zu hohe Kohlendioxid-Konzentrationen im Innenraum führen zu geringerer Leistungsfähigkeit und zu Müdigkeit. Der Anteil des Kohlendioxids beträgt heutzutage ca. 415 ppm in der Außenluft. Bei nicht ausreichender Lüftung kommt es in Innenräumen durch Ausatemluft und Verbrennungsprozesse (z.B. Kerzen, Öfen, Zigarettenrauch) schnell zu ansteigenden Werten. In nicht gelüfteten Schlafzimmern, voll

³ EPD – EnvironmentalProductDeclaration beinhaltet Hinweise zu Emissionsprüfsertifikaten, Inhaltsstoffen und möglichen Emissionsquellen im Produkt.

⁴ Klima- und Behaglichkeit Messsensoren: www.testo.com, www.air-q.com, www.airthings.com, www.decentlab.com.

besetzten Klassen- oder Meetingräumen können schnell bis zu 5.000 ppm gemessen werden. Das Umweltbundesamt empfiehlt bei der Überschreitung eines Wertes von 1.000 ppm CO₂, frische Luft von draußen in den Raum hineinzulüften. Die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) wird mit 5.000 ppm angegeben. CO₂ Konzentrationen von über 1.000 ppm führen erwiesenermaßen zu nachlassender Konzentration. Über 2.000 ppm zeigen sich deutliche Konzentrationsschwächen und Müdigkeit. Ab 5.000 ppm kommt es zu einem deutlichen Nachlassen der Leistungsfähigkeit und starken Kopfschmerzen.

Die Messung von Kohlendioxid geschieht mittels eines optischen Sensors. Dieser funktioniert auf dem Prinzip der Infrarotabsorption.

Sauerstoff (O₂)

Sauerstoff (O₂) ist ein farb- und geruchloses Gas und ist in der Außenluft und in gut gelüfteten Innenräumen zu ca. 21 %, in der ausgeatmeten Luft des Menschen noch zu ca. 16 % enthalten.

Für Sauerstoff gibt es keine gesetzlichen Grenzwerte in Deutschland. Sauerstoff wird mit einem auf optischer Fluoreszenz basierendem Sensor gemessen.

Flüchtige Organische Verbindungen (VOC)

Die Abkürzung VOC (Volatile Organic Compounds, Flüchtige Organische Verbindungen) bezeichnet Kohlenstoff-haltige Stoffe, die schon bei niedrigen Temperaturen beginnen zu verdampfen oder bereits im gasförmigen Zustand auftreten.

Es gibt zwei weitere Untergruppen:

VVOCs (Very Volatile Organic Compounds) beschreiben sehr flüchtige und oft geruchsintensive Stoffe.

SVOCs (Semivolatile Organic Compounds) bezeichnen mittel- bis schwerflüchtige organische Verbindungen.

Die Gesamtheit dieser Stoffe wird als TVOCs (Total Volatile Organic Compounds) bezeichnet und kommt in einem Siedebereich zwischen 50 °C und 250 °C vor. Bekannte VOCs sind z.B. Formaldehyd, Benzol, Toluol, Styrol. Bei der Entstehung von VOCs wird zwischen natürlichen (mikrobielle Stoffwechselprodukte, Fäulnis, biologische Zerfallsprozesse, Reaktionen natürlicher Materialien,) und synthetischen Quellen (Baumaterialien, Lacke, Farben, Teppiche, Dämmstoffe, Lösemittel- und Reinigungsprodukte, Kosmetik, Tabakrauch) unterschieden.

In Deutschland gibt es Grenzwerte für beispielsweise Benzol bisher nur für produktions-technisch besonders belastete Arbeitsplätze.

Das Umweltbundesamt hat mittlerweile Empfehlungen für das Vorkommen von VOCs ausgesprochen. Die TVOC Leitwerte sind in Stufen gegliedert:

hygienisch (noch) unbedenklich (unter 1 mg/m³)

hygienisch auffällig (zwischen 1 bis 3 mg/m³)

hygienisch inakzeptabel (über 10 mg/m³)

Zusätzlich wurden Richtwerte für einzelne Stoffe der VOC-Gruppe festgelegt. (siehe aktuelle Richtwerttabellen unter www.uba.de)

VOCs werden mittels eines resistiven Sensors gemessen. Moleküle verursachen eine Änderung des elektrischen Widerstandes im Sensor. Eine Querempfindlichkeit zu anderen Stoffen besteht.

Die Symptome durch hohe VOC Werte sind auch als Sick-Building-Syndrom bekannt und beschreiben eine akute Belastung. Diese können sich in Geruch- und Geschmackswahrnehmung oder auch einer Reizung von Haut, Augen bzw. Schleimhäuten äußern.

Stickstoffdioxid

Stickstoffdioxid entsteht bei der Verbrennung fossiler Energieträger. In Innenräumen wird es beispielsweise durch Kerzen, offene Feuerstellen und Tabakrauch freigesetzt.

In Innenräumen gilt der Einstunden-Richtwert von 80 µg/m³ (Vorsorgewert). Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte empfiehlt allerdings, den Wert auf 40 µg/m³ herunterzusetzen.

Der kurzfristige Gefahrenwert liegt bei $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Als Arbeitsplatzgrenzwert wurden $950 \mu\text{g}/\text{m}^3$ festgelegt. Für Stickstoffdioxid ist in der EU eine Alarmschwelle von $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ festgelegt. 2021 hat die WHO ihre Luftgüte-Richtlinie nach unten hin angepasst. Die neue Empfehlung bei Stickstoffdioxid liegt bei $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im 24-Stunden-Mittel.

Stickstoffdioxid verengt die Bronchien, es kommt zu Schwindel und Kopfschmerzen, bei höheren Konzentrationen zu Atemnot und Lungenschädigungen.

Stickstoffdioxid wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen.

Kohlenmonoxid (CO)

Kohlenmonoxid ist ein farb-, geruchs- und geschmacksneutrales Gas. Das starke Atemgift ist leichter als Luft. Es entsteht durch die unvollständige Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Stoffen z.B. im Straßenverkehr, und im Haus durch mangelhafte Ablüftung von Kaminöfen oder durch Öl- und Gasheizungen.

Die normale Konzentration in der Luft beträgt ca. $0,6$ bis $6 \text{ mg}/\text{m}^3$. Der 8-Stunden-Mittelwert von $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ (8 ppm) sollte laut Umweltbundesamt nicht überschritten werden. Die maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) beträgt $35 \text{ g}/\text{m}^3$ (28 ppm).

CO wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Folgen von zu hoher Konzentration sind Schwindel, Ermüdung, Übelkeit bis hin zum Tod.

Formaldehyd

Formaldehyd ist ein farbloser, stechend riechender, gut wasserlöslicher und bei Raumtemperatur gasförmiger Stoff. Es kommt natürlicherweise in geringen Mengen auch im menschlichen Körper, in Früchten und in Holz vor. Es entsteht außerdem bei Verbrennungen und anderen Oxidationsprozessen sowie beim Rauchen.

In der Atmosphäre kommt Formaldehyd mit einer Konzentration ca. 1 ppb vor.

In der Industrie wird Formaldehyd als Ausgangsstoff für viele chemische Verbindungen, wie z.B. Klebstoffe und Kunststoffe verwendet und kam früher bei vielen Holzprodukten zum Einsatz.

Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte legte 2016 einen Richtwert für die Innenraumluft von $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ fest. 2015 wurde die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration auf $0,37 \text{ mg}/\text{m}^3$ festgelegt.

Rechtsverbindlich ist Formaldehyd seit dem 1. April 2015 im Anhang VI der Verordnung 2008/1272/EG in der Kategorie 1B eingestuft: «wahrscheinlich karzinogen beim Menschen». Es können Allergien, Atemwegs- oder Augenreizungen sowie Konzentrations- und Schlafstörungen hervorgerufen werden.

Formaldehyd wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Sensorwerte sind gegenüber Labormessungen ungenau und können lediglich als Indiz bewertet werden.

Ozon

Ozon ist ein wichtiges Spurengas in der Atmosphäre und bildet die natürliche Ozonschicht in 20 - 30 km Höhe. Es ist ein farbloses bis leicht blaues Gas, das stechend-scharf bis chlorähnlich riecht. Ozon ist sehr reaktionsfreudig, brandfördernd, schwerer als Luft und wirkt auf den Menschen giftig. In Innenräumen kann Ozon durch elektrische Geräte wie z.B. Drucker unter Einwirkung von UV-Strahlung entstehen.

Ozon zerfällt normalerweise innerhalb kurzer Zeit. Erreicht die Ozonkonzentration im Freien einen Wert von 120 ppb ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$), wird eine Ozonwarnung ausgesprochen.

Der bisherige MAK-Wert von 100 ppb ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wurde bislang noch nicht durch einen verbindlichen Arbeitsplatzgrenzwert ersetzt.

Bei einem hohen Ozongehalt in der Luft sinkt die Leistungsfähigkeit ab. Es kann zu Reizungen der Augen und Schleimhäute kommen. Ozon wirkt sich nachteilig auf die Lungenfunktion aus und steht im Verdacht, krebserregend zu sein.

Ozon wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Zu hohe Ozonkonzentrationen aber auch andere Peroxide verfälschen die VOC Raumluftmesswerte.

Radon

Radon ist ein farb-, geruch- und geschmackloses radioaktives Gas. Es entsteht im Gestein und im Erdreich durch den Zerfall von Uran und Thorium, steigt von dort zur Erdoberfläche auf und entweicht in die Atmosphäre, in das Grundwasser, in Höhlen und Bergwerke und auch in Keller und Rohrleitungsschächten. Die Radonbelastung schwankt regional stark.

Es gibt im deutschen Strahlenschutzgesetz verbindlich festgelegte Referenzwerte. Danach müssen in Arbeits- und Aufenthaltsräumen bei einer Radonkonzentration ab 300 Bq/m³ (300 Zerfälle pro Sekunde pro m³ Luft) Maßnahmen zur Reduzierung getroffen werden.

Bei Verkauf oder Vermietung von Wohnungen muss dieser Wert auch auf Verlangen vom Mieter oder Käufer attestiert werden. Eingreifrichtwert: 400 Bq/m³ gilt für Gebäude, die vor 1996 gebaut wurden. Planungsrichtwert: 200 Bq/m³ gilt für Gebäude, die nach 1996 gebaut wurden. Die deutsche Strahlenschutzkommission und die WHO empfehlen, den Wert dauerhaft unter 100 Bq/m³ zu halten, unter Umständen durch Lüftungsanlagen. Langzeitmessungen sind sinnvoll.

Radon erhöht das Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken. Rechtssichere Langzeitmessungen werden mit passiven Exposimetern durchgeführt, die im Labor ausgewertet werden. Orientierende Messungen werden mit Sensorgeräten durchgeführt.

Schwefeldioxid

Schwefeldioxid ist ein farbloses, stechend riechendes und sauer schmeckendes Reizgas. Es ist nicht brennbar, leicht wasserlöslich und schwerer als Luft. Schwefeldioxid entsteht bei der Verbrennung schwefelhaltiger fossiler Brennstoffe und wird von Vulkanen und beim Abbrand in Gebäudeheizanlagen freigesetzt. Außerdem wird es durch verschiedene Verkehrsmittel, industrielle Energie- und Wärmegewinnungsanlagen, bei der Produktion von Zement und Zellstoff sowie bei der Verarbeitung von Erzen und Erdöl freigesetzt.

Der Arbeitsplatzgrenzwert liegt laut deutscher Gefahrstoffverordnung bei 2,5 mg/m³ (1ppm), der Wert für die Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) beträgt 2,7 mg/m³. Schwefeldioxid ist ein starkes Atemgift und kann schon in geringen Konzentrationen zu Hustenreiz, Atemnot sowie Reizungen von Augen und Schleimhäuten führen.

Schwefeldioxid wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen und kann durch die Lüftungsanlage ins Gebäudeinnere gelangen.

Schwefelwasserstoff

Schwefelwasserstoff ist ein farbloses, hochgiftiges Gas, das brennbar und leicht entzündlich ist. Man nimmt es bereits in geringen Mengen an dem typischen Geruch nach faulen Eiern wahr. Schwefelwasserstoff entsteht durch die Zersetzung von Proteinen durch Fäulnis- und Schwefelbakterien. Es ist schwerer als Luft und sammelt sich daher am Boden. Schwefelwasserstoff kommt in vielen Rohstoffen vor wie z.B. in Erdöl und Erdgas vor und entsteht bei jeglicher Form des Biomasseabbaus (z.B. in Klärwerken, Landwirtschaft/Gülle, Kanalisation etc.)

Der Arbeitsplatzgrenzwert liegt bei 5 ppm und die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) bei 10 ppm. Dieser Wert darf zu keiner Zeit auch nur kurzzeitig überschritten werden. Die Geruchsschwelle liegt schon bei 0,13 ppm.

Bereits bei geringen Konzentrationen über einen längeren Zeitraum kann es zu Müdigkeit, Kopfschmerzen, Konzentrationsschwäche kommen. Höhere Konzentrationen können zu starken Schleimhautreizungen, Augenschädigungen und Wassereinlagerungen in der Lunge führen. Schwefelwasserstoff wirkt auch toxisch auf Nervensystem und Herz. Schwefelwasserstoff wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen.

Feinstaub (PM₁ – PM₁₀)

Feinstaub ist ein Teil des Schwebstaubs «Particulate Matter-PM». Er besteht aus festen und flüssigen Teilchen, die nicht gleich zu Boden sinken, sondern eine gewisse Zeit in der Raumluft verweilen.

Als häufige Feinstaub-Quellen gelten Emissionen aus der Natur, Industrie, Kraftwerken Kleinf Feueranlagen, Straßenverkehr, Landwirtschaftliche Tierhaltung, Tabakrauch, Kerzen, Haushalts- und Bürogeräten (z.B. Drucker, Kopierer), Kaminöfen, Kochen und Braten

sowie biogene Partikel (z.B. Viren, Sporen von Pilzen und Bakterien, Pollenflug, Ausscheidungen von Hausstaub-Milben). Hinzu kommen Abriebstäube und chemische Ausdünstungen durch Teppiche, Möbel, Fußböden und Wandoberflächen. Feinstaub verfügt über ein hohes Adsorptionspotenzial für gasförmige Verbindungen und wird dadurch mit mittel- bis schwerflüchtigen Schadstoffen (z.B. Pestizide, Flammschutzmittel, Weichmacher) angereichert.

Mit Partikelmessgeräten werden vor der VOC Raumluftmessung die Partikelgrößen (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_{10}) gemessen, um die Qualität einer Feinreinigung nachzuweisen.

Für Feinstaub PM_{10} (Partikel $< 10 \mu m$) setzt das Umweltbundesamt für die Außenluft einen Tagesgrenzwert von $50 \mu g/m^3$ und einen Jahresmittelwert von $40 \mu g/m^3$. Der Tagesgrenzwert darf lediglich an 35 Tagen im Jahr überschritten werden. Für Feinstaub $PM_{2,5}$ (Partikel $< 2,5 \mu m$) gilt seit 2015 der als Beurteilungswert von der WHO festgelegte Jahresgrenzwert von $25 \mu g/m^3$ in der Außenluft und in Wohnräumen.

Feinstaub wird mittels optischer Streuung gemessen. Eine Infrarot-LED und ein Detektor sind räumlich durch eine Wand getrennt und «sehen» sich nie direkt. Erst wenn Feinstaubpartikel im Licht der LED auftauchen, sieht der Detektor ein Aufblitzen, zählt diese Blitze und je nachdem wie hell diese sind, kann die Partikelgröße bestimmt werden. Große Partikel (PM_{10} hell), je kleiner die Partikel ($PM_{2,5}$, PM_1) um so dunkler.

Die Partikel reizen die Schleimhäute von Augen, Nase und Rachenraum und die Atemwege und können zu entzündlichen Veränderungen führen. Je nach Zusammensetzung besteht die Möglichkeit, dass die darin gebundenen chemischen und biologischen Schadstoffe allergische Reaktionen hervorrufen. Kleinste Partikel gelangen auch über die Lungenbläschen in den Blutkreislauf und beeinträchtigen somit das Herz-Kreislauf-System. Zu hohe Partikelwerte verfälschen und erhöhen je nach Partikelzusammensetzung die VOC Raumluftmesswerte.

Lufttemperatur

Die Lufttemperatur beeinflusst den Stoffwechselprozess des Menschen. Die subjektiv wahrgenommene Raumtemperatur kann von der gemessenen Lufttemperatur abweichen, da sie durch viele Faktoren beeinflusst wird. Dazu gehören neben der tatsächlichen Lufttemperatur die Strahlungstemperatur der Raumbooberflächen, die Körpertemperatur der im Raum anwesenden Menschen sowie individuelle Eigenschaften der Haut, Verdunstung über die Haut, Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung.

Das Umweltbundesamt empfiehlt für Wohnbereiche 21 bis 23°C, für Kinder- und Badezimmer 23°C, für Küchen 18 – 19°C, für Schlafzimmer 16 – 18 °C und für Büroräume 21 – 22 °C.

Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflussen maßgeblich das individuelle Wohlbefinden in Innenräumen. Bei zu niedrigen Temperaturen versucht der Körper, durch Zittern, die Körpertemperatur zu erhöhen, bei zu hohen Temperaturen durch Schwitzen und Erweiterung der Blutgefäße diese zu senken. Menschen mit Kreislaufproblemen können stark auf Temperaturschwankungen reagieren. Sowohl zu niedrige als auch zu hohe Temperaturen können zu Unwohlsein führen und die Leistungsfähigkeit einschränken.

Die Temperatur kann mit einem Sensor mit sehr hoher Genauigkeit gemessen werden. Zu hohe Raumtemperaturen verfälschen die VOC Raumluftmesswerte und lassen sie ansteigen.

Relative Luftfeuchtigkeit

Luftfeuchtigkeit beschreibt den Wasserdampfgehalt in der Luft. Relative Luftfeuchtigkeit beschreibt das Verhältnis zwischen der absoluten und der maximalen Luftfeuchtigkeit und wird in Prozent angegeben. In Innenräumen entsteht Luftfeuchte durch trocknende Baustoffe oder Atmen von Menschen und Tieren, Kochen, Duschen, Baden, Trocknen von Wäsche usw. Von außen kann durch undichte Fenster und Türen Wasser eindringen, das zu Wasserdampf verdunstet.

In geschlossenen Räumen wird eine relative Luftfeuchtigkeit von 40 bis 60 % empfohlen. Bei zu geringer Luftfeuchtigkeit wird die Atemleistung vermindert. Durch die Austrocknung

der Schleimhäute steigt das Infektionsrisiko. Zu hohe Luftfeuchtigkeit kann die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen und den Kreislauf belasten. Bei Luftfeuchtigkeit von über 60 % kommt es zu einer verstärkten Vermehrung von Pilzen, Bakterien, Hausstaubmilben.

Die relative Luftfeuchtigkeit kann mit einem Sensor mit sehr hoher Genauigkeit gemessen werden. Zu hohe Werte verfälschen und erhöhen die VOC Raumlufmesswerte.

Absolute Luftfeuchtigkeit

Die absolute Luftfeuchtigkeit gibt die Wasserdampfdichte an, d.h. jene Masse an Wasserdampf, die in einem festgelegten Luftvolumen enthalten ist. Sie wird in g/m^3 angegeben. Sie bewegt sich zwischen 0 und dem maximalen Wasserdampfgehalt, den die Luft mit einem festgelegten Volumen bei einer bestimmten Temperatur erreichen kann. Wie viel Wasserdampf die Luft aufnehmen kann, ist stark von der Lufttemperatur abhängig.

Als allgemeine Empfehlung für Innenräume gilt ein Mindestwert von ca. $6,9 \text{ g}/\text{m}^3$ und ein Höchstwert von ca. $10,4 \text{ g}/\text{m}^3$. Wenn im Winter kalte Luft, die nur wenig Wasserdampf aufnehmen kann, hineingelüftet wird, erwärmt sich diese im Innenraum, was dazu führt, dass die relative Luftfeuchte bei gleichbleibender absoluter Luftfeuchte abnimmt. Dadurch entsteht das Problem von zu trockener Luft im Winter. Die größte Gefahr einer länger andauernden zu hohen relativen Luftfeuchtigkeit liegt in der Schimmelbildung, die wiederum durch die Temperaturunterschiede an kalten Außenwänden durch die Unterschreitung des Taupunktes noch begünstigt wird.

Aus dem gemessenen Wert der relativen Luftfeuchtigkeit wird der Wert der absoluten Luftfeuchtigkeit abgeleitet. Zu hohe Werte verfälschen die VOC Raumlufmesswerte.

Luftdruck (p)

Als Luftdruck wird die Kompression, also die Verdichtung der Luft bezeichnet. Sie entsteht durch die kontinuierliche Bewegung der Luftmassen in der Atmosphäre. Diese Bewegungen werden durch die Erdanziehung, Sonneneinstrahlung und Hoch- und Tiefdruckgebiete beeinflusst. Der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe über dem Meeresspiegel deutlich ab. Auf Höhe des Meeresspiegels wird der mittlere Luftdruck mit einem Wert von 101.325 Pa (Pascal), oder dem Normwert 1 bar angegeben. Die Messung des Luftdrucks ist für die Umrechnung im Labor bzgl. VOC Raumlufmessungen relevant.

Die Druckkammersensoren messen die Deformation einer Membran. Luftdruckwerte benötigt das Prüflabor zur Funktionskontrolle eines regelgerechten Messablaufs.

3. Messtechnik durch Luftprobenahmen

Konstruktion und Ausstattung der Gebäude (Private, Schulen, Büros) haben sich in den letzten Jahren verändert und sie sind aufgrund des Wärmeschutzes auch luftdichter geworden. Deshalb wird schon bei der Planung moderner Lüftungskonzepte der Einsatz von Raumklima-Sensorsystemen (Kohlendioxid, Luftfeuchte, Temperatur) während der Nutzungsphase empfohlen.

Nach Abschluss der Bauarbeiten und vor der Bauabnahme wird zunehmend die Messung von flüchtigen organischen Stoffen (VOC: engl. Volatile Organic Compounds, dt. leichtflüchtige organische Verbindungen) im Werkvertrag gefordert. Im Folgenden werden die rechtlichen Anforderungen an eine normgerechte Klima- und Messraumvorbereitung insbesondere mit der Probenahmetechnik und den Empfehlungen zur Auswertung und Bewertung der Messergebnisse beschrieben.

3.1. Allgemeine Grundlagen zur VOC Raumlufprobenahme

Die VOC Raumlufmessung stellt eine Kurzzeitprobenahme dar. Klimakontrollmessungen und Messraumvorbereitungen müssen im dazugehörigen Messprotokoll folgendermaßen beschrieben werden:

- Alle Klima- u. Raumparameter werden messtechnisch erfasst und schriftlich dokumentiert.
- Das Mess- und Analyseverfahren führt zu nachvollziehbaren bzw. zu nachträglich kontrollierbaren Ergebnissen.

- Alle vorgegebenen und zum Messzeitpunkt herrschenden klimatischen Einflussparameter wie Außentemperatur, Innenraumtemperatur, Außen- und Innenraumluftfeuchte und Lüftungsverhältnisse, der VOC/Sensorwert, der Formaldehyd/Sensorwert, der Partikel/Sensorwert, der CO₂/Sensorwert aber auch auffällige Gerüche werden erfasst und protokolliert.
- Die Vorgehensweise wird fototechnisch festgehalten.
- Die Bewertung der Messergebnisse erfolgt im Abgleich mit den aktuellen behördlichen Grenz-, Richt-, Leitwerten und den Vorgaben im Werkvertrag.

Diese Luftprobenahmen sind auf Formaldehyd und VOC ausgerichtet. Sie beziehen sich auf die existierenden Normen und sonstige Vorschriften und auf neue praxiserprobte Erkenntnisse. Dadurch wird die Vergleichbarkeit von Messergebnissen in Holzgebäuden verbessert.

Die Anwendung ist vorgesehen für Gebäude zum Zeitpunkt der Bauabnahme, d.h. im schlüsselfertigen (bezugsfertigen) Zustand, jedoch unmöbliert. Räume mit Einbaumöbeln sollten nicht mitgemessen werden. Ansonsten, wenn sie in den Leistungsbereich des Gebäudeherstellers zählen, sind Sonderregelungen erforderlich. Innentüren müssen gebrauchsfertig eingebaut sein. Für schon bezogene und möblierte Gebäude muss eine Sonderregelung getroffen werden.

3.2. Klimafaktoren und Baustoffemissionen

Generell müssen schon mindestens 2 Wochen vor Messtermin die vorgegebenen Raumklimaparameter eingestellt werden. Neben einem hohen Luftwechsel muss auf die Temperatur und die Material- und Baufeuchte geachtet werden, da sie einen direkten Einfluss auf das Abklingverhalten von Baustoffemissionen haben.

Das Raumklima hängt ab von Faktoren wie jahreszeitliches Außenklima, Standort, Heizungsart, Materialfeuchteverhalten. Auch Winddruck oder Unwetter können die VOC Emissionen unerwartet fördern.

3.3. Lüftungsplanung

Gebäude ohne technische Lüftungsanlagen müssen rechtzeitig über Fensterlüftung querlüftet werden. Die normativ vorgegebenen Verschlusszeiten (8h) müssen eingehalten werden. Wir empfehlen eine zusätzliche Kontrollmessung unter Nutzungsbedingungen, was einem regelgerechten hygienisch geforderten Lüftungsvorgang je Zeitintervall entsprechen würde.

Gebäude mit RLT-Anlagen (dezentral und zentral mit Wärme- und/oder Feuchterückgewinnung) dürfen während der Messung unter nutzungsbezogenen Voreinstellungen angeschaltet bleiben.



Abbildung 5: Test mit 3 unterschiedlich großen dezentralen Lüftungsanlagen im gleichen Klassenraum. Von links – Sensormessgeräte für Partikel, CO₂, Feuchte/Temperatur, VOC Raumluftanalyse/Pumpenausrüstung.

Zu untersuchende Gebäude müssen normgerechte und möglichst nutzerangepasste Raumklimawerte aufweisen.

Es wird bei den Klimaanforderungen unterschieden zwischen Gebäuden

- ohne RLT Anlagen (Frischluftezufuhr über Undichtigkeiten oftmals ca. 0,1-0,3 Luftwechsel/h – Nachweis durch BlowerDoor Prüfverfahren 10-50 Pascal Unterdruck).
- ohne RLT Anlagen aber mit undefinierten und selbstregulierenden Lüftungselementen an Fenstern und Türen – Funktionsnachweis über CO₂ Messgerät.
- mit RLT Anlagen (Zentrale Lüftungsgeräte oder Einzellüfter mit Feuchte- und/oder Wärmerückgewinnung) – Funktionsnachweis über CO₂ Messgerät. Ein 4 stufiges Gerät funktioniert 1. nach dem Prinzip Minimalstufe zum Feuchteschutz und 2. Mindestanforderung mit reduzierter Lüftung und 3. Nennlüftung/def. Nutzerbezogen und 4. Intensivlüftung/max. nutzungsbezogen.

3.4. Messvorbereitung

Für eine reibungslose Messplanung ist es erforderlich, dass sich der Messingenieur schon Wochen vor der Messung im ständigen Austausch mit der Bauleitung oder der Bauherrschaft befindet. Da solche Raumlufmessungen kurz vor Übergabe des Gebäudes stattfinden, ist zudem mit erhöhten Emissionen durch abtrocknende und aushärtende Baumaterialien zu rechnen, die rechtzeitig und weitreichend abgelüftet werden müssen. Um solche Messwertverfälschungen zu minimieren sind folgende Maßnahmen einzuhalten:

- Messvorbereitung 1: Das zu untersuchende Gebäude sollte schon mindestens 14 Tage vor Beginn der Messungen unter Beobachtung stehen. Emissionsträchtige Arbeiten wie Lackierarbeiten vor Ort (z.B. Treppengeländer) mit lösemittelhaltigen Inhaltsstoffen sollte in den letzten 2 Wochen vermieden werden.
- Messvorbereitung 2 (Beginn 1 Woche vor Messtermin): Ständiges Lüften mit LWZ > 2, wobei hier das aktuelle Außenklima zu beachten ist. Wenn RLT- Anlagen vorhanden sind, sollten diese nun durchgängig auf höchster Stufe laufen.
- Messvorbereitung 3 (Beginn 24h vor Messtermin): Raumklimazielwerte 21°C und ca. 50% rLF sind einzustellen. Feinreinigung der Messräume. Je nach verbauter RLT-Anlage, sollten die Zuluftleitungen auf Verschmutzungen untersucht und ggf. gereinigt werden (ohne chem. Reinigungsmittel!). Die Filter der RLT Anlagen sind zu erneuern. Gelüftet wird im Überdruckverfahren durch Einblasen (Gebläse mit HEPA Filter - min. H13) von Frischluft über die Fenster bei geschlossenen Türen, solange bis der CO₂ Wert des Innenraums in etwa dem der Außenluft entspricht.
- Können die Raumklimaparameter wie Raumlufttemperatur 19-25 °C, Raumluftfeuchte < 65 % rel. LF, CO₂ < 1000 ppm und Beschattung nicht eingehalten werden, ist eine Verschiebung des Messtermins empfohlen.
- Die Messbereiche sind für andere Personen vor und während der Messung verschlossen zu halten. Der ausführende Messtechniker sowie alle anderen Personen, die den Messraum betreten, müssen frei von Duftstoffen (Parfüm, Haarpflegemittel, Rasierwasser) und Rauchgeruch sein. Motorunterstützte Außenarbeiten um das Gebäude sind zum Messtermin zu unterlassen.
- Mehrere Messräume möglichst zeitlich parallel messen.
- Der Prüfenieur muss während der Messung unter Nutzungsbedingungen normative Vorgaben exakt einhalten und protokollieren.
- Die Anzahl zu prüfender Messräume richtet sich nach den Vorgaben im Werkvertrag.

3.5. VOC Messvorgang

Falls eine RLT Anlage vorhanden ist, wird diese gemäß Lüftungsplanung unter Nutzungsbedingungen vor und während der VOC Messung zugeschaltet.

Die Messbereiche sind für andere Personen vor und während der Messung verschlossen zu halten. Der ausführende Messtechniker sowie alle anderen Personen, die den Messraum betreten, müssen frei von Fremdgerüchen wie Markierstifte, Parfüm oder Zigarettengeruch sein. Der Messtechniker muss den Messraumzustand und die Klima-Sensormesswerte abnehmen und protokollieren.

Für Luftprobenahmen gelten die Vorgaben von EN ISO 16000-1 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie. Für die VOC Raumluftüberwachung sind die in der Norm vorgeschriebenen Prüfröhrchen zu verwenden und die in der Norm vorgesehene Probenahmetechnik ist anzuwenden. Die Laborvorgaben bei der Probenahme sind zu beachten. Bei der Überprüfung zur Einhaltung eines Richtwertes oder wenn Aussagen über das Verhältnis von Innen- und Außenluftkonzentration erzielt werden sollen, sind die Randbedingungen wie der letzte Lüftungszeitpunkt (evtl. mit Luftwechselrate), die Raumtemperatur, die relative Feuchte und die Nutzungsbedingungen vor bzw. während der Messung zu dokumentieren. Weitere Sensorparameter wie VOC/Geruch, CO₂, NO₂, CO, HS, O₃ und Innen- und Außenklimaparameter wie Luftdruck, Feuchte, Temperatur und Luftzug sollten protokolliert werden.

So sollen bei der Auswahl des Raumes die Nutzungsdauer und die Nutzungsart, die Lage im Gebäude, die Art der Lüftung und mögliche Emissionsquellen (grobe Baustoffauswahl) im Raum beschrieben werden. Als geeignete Stelle im Raum wird im Allgemeinen die Mitte des Raumes angesehen, der Wandabstand muss mindestens 1 m betragen. Nach ISO 16000-1 ist die Probenahme 1,5 m über dem Fußboden durchzuführen und im Protokoll zu vermerken.

3.6. Interpretation von VOC Messergebnissen

Empfohlene Richtwerte:

- Die Einzelstoff-Richtwerte II (ERW II) der beim Vertragsabschluss aktuelle AIR/UBA Richtwerttabelle sind mindestens einzuhalten.
- Der TVOC-Wert in Höhe von 1.500 µg/m³ ist mindestens einzuhalten.
- Der Richtwert für Formaldehyd in Höhe von 100 µg/m³ ist mindestens einzuhalten.
- Andere Zielwerte können vom Auftraggeber festgelegt werden, daher sind Werkverträge auf strengere Richtwerte hin zu überprüfen.

Interpretations- und Handlungsempfehlungen bei Vorliegen der VOC Messergebnisse:

- Werden die ERW II oder der vorgegebene TVOC-Wert unterschritten, wird die Nutzung freigegeben.
- Werden die ERW II eingehalten und liegt der TVOC-Wert über 1.500 µg/m³, dann muss der Auftragnehmer (AN) eine weitere Kontrollmessung nach Absprache mit dem Auftraggeber durchführen, um die Abklingraten der Emissionen zu dokumentieren.
- Werden die ERW II und der TVOC-Wert von 1.500 µg/m³ überschritten, muss der AN emissionsreduzierende Maßnahmen und kurzfristig eine Nachmessung nach Absprache mit dem Auftraggeber durchführen.

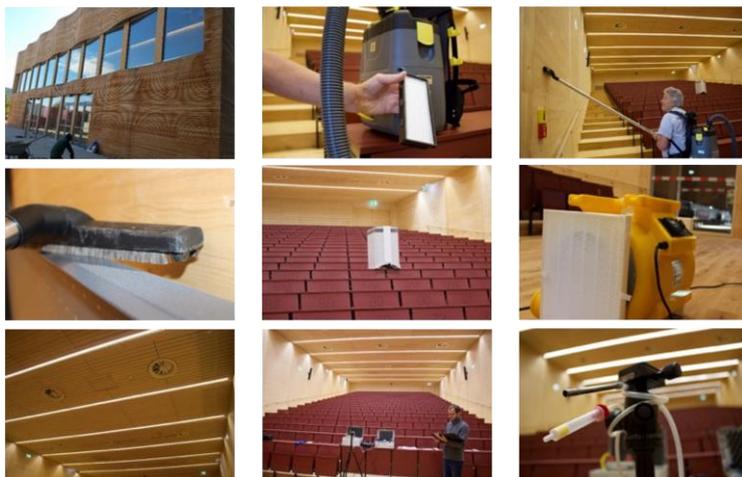


Abbildung 6: Hörsaal, innen komplett aus Holz und Lüftungsanlage. Feinreinigung und VOC Messung.

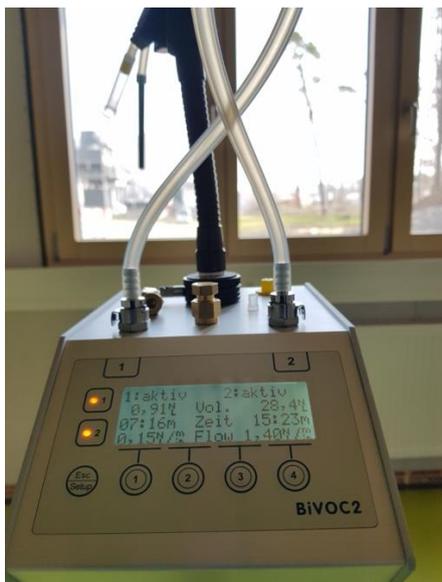


Abbildung 7: BIVOC-Elektronisch gesteuerte Pumpe für VOC Messung.

Leitwert (mg/m ³)	Hörsaal II Garching	Hygienische Bewertung
<=0,3	0,0847	Hygienisch unbedenklich
>0,3 - 1		Hygienisch noch unbedenklich, sofern keine Richtwertüberschreitungen für Einzelstoffe bzw. Stoffgruppen vorliegen
>1 - 3		Hygienisch auffällig
>3 - 10		Hygienisch bedenklich
>10	10	Hygienisch inakzeptabel

Tabelle 2: Leitwerte für TVOC in der Innenraumluft. Quelle: Umweltbundesamt.

Abbildung 8: Vorbildlich gute VOC Werte nach korrekter Klimaeinstellung und Messraumvorbereitung.

4. Zusammenfassung und Aussichten

Wurden im Werkvertrag Zielwerte für die Raumluftqualität vereinbart, sind diese durch Kontrollmessungen nachzuweisen. Daher ist es ratsam auf Produkte umzustellen, die nach der aktuellen Prüfnorm DIN EN 16516 zertifiziert wurden. Empfehlenswert sind Raumlufttechnische Anlagen mit Sensorsteuerung hinsichtlich Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte und Kohlendioxid (CO₂).

Hohe Temperatur- oder Feuchtwerte, Gerüche durch Trocknungsprozesse oder zu geringe Beheizung oder Belüftung sind erfahrungsgemäß die am häufigsten auftretenden Klimaextreme, die bei VOC Messungen wertverfälschend wirken.

Neueste toxikologische bzw. tier- und zellenbasierte Studien zeigen, dass vor allem die durch Holz und Holzwerkstoffe verursachten Terpenkonzentrationen keine schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit haben.⁵ Weitere Studien weisen sogar darauf hin, dass Terpene gesundheitsfördernd sein können.⁶

⁵ Infos/Quellen unter <https://baustoffe.fnr.de/projekte/emissionen/>

⁶ Infos/Quellen unter <http://www.holz-und-raumluft.de/forschung>



Abbildung 9: Seniorenwohnanlage Waldmünchen - Geplante Messstudie 2022 (Raumklima und VOC) in 11 Holzgebäuden mit unterschiedlicher Bauweise. Bauphysikalische Sensormessungen – TU München Lehrstuhl Winter. Raumklimatische und raumluftanalytische Messungen – IQUH.

5. Anlagen

5.1. Grundlagen zur VOC Ergebnisbewertung

Kommission Innenraumlufthygiene + Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden, VOC Richtwerte für die Innenraumluft

Herausgeber: Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes. Link: [UBA](https://www.umweltbundesamt.de/themen/innenraumlufthygiene)

5.2. Literatur, Normen

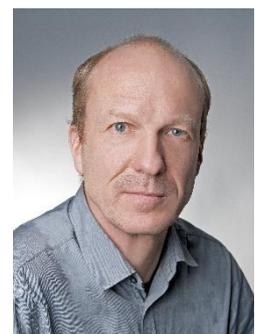
DIN 1946	DIN 1946-1-6 befasst sich mit dem Anwendungsbereich und jenen Neuerungen der Norm, die ventilatorgestützte Systeme betreffen.
DIN EN 16798 Teil 1	DIN 1946-6 «Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/ Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung».
EN 16516	Lüftungs- und Behaglichkeitsnorm (Früher: DIN EN 15251, EN 13779)
EN ISO 7730	Bauprodukteprüfung
VOB/C ATV DIN 18379-3	Thermische Behaglichkeit
DIN EN ISO 16000-1 (2006)	Grundlage für die Planung und Auslegung von Lüftungs- und Klimaanlage in Nichtwohngebäuden, die für den Aufenthalt von Menschen bestimmt sind.
DIN EN ISO 16000-2 (2006)	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie
DIN ISO 16000-3 (2013)	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 2: Probenahmestrategie für Formaldehyd
DIN EN ISO 16000-5 (2007)	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen – Probenahme mit einer Pumpe - Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie
DIN ISO 16000-6 (2012)	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 5: Probenahmestrategie für flüchtige Verbindungen (VOC)
DIN ISO 16000-8 (2008):	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern, Probenahme auf Tenax TA, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID
	Innenraumluftverunreinigungen - Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen

EPILOG

Bauen Morgen – woran wir denken sollten

Ganzheitliche und kostenoptimierte Gebäudekonzepte – Die Evolution als Optimierungswerkzeug

Alexander Schröter
Müller-BBM GmbH
Planegg bei München, Deutschland



Ganzheitliche und kostenoptimierte Gebäudekonzepte – Die Evolution als Optimierungswerkzeug



1. Ausgangspunkt

Ein wirksamer Klimaschutz erfordert nachhaltige Lösungen und stellt hohe Anforderungen an moderne Gebäudekonzepte. Einerseits werden die Anforderungen an die Nachhaltigkeit der Gebäude weiter zunehmen, andererseits müssen zukunftsfähige Gebäude weiterhin bezahlbar bleiben. Architekten und Planer stehen nun vor der Herausforderung diese gegenläufigen Anforderungen in Einklang zu bringen. Tragfähige Gebäudekonzepte sind schließlich als ganzheitliche Lösungen im Spannungsfeld zwischen Komfort, Klimaschutz und Wirtschaftlichkeit zu entwickeln. Die Sicherstellung allein der Funktion eines Gebäudes ist heutzutage in einer Welt zunehmender Komplexität nicht mehr ausreichend.

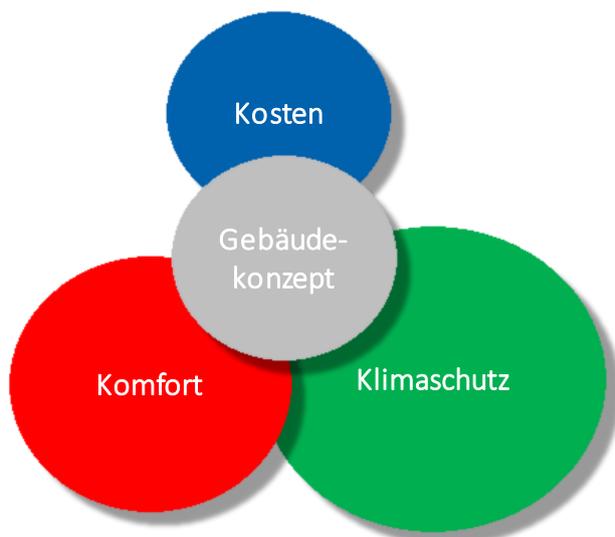


Abbildung 1: Ganzheitliche Gebäudekonzepte sind im Spannungsfeld zwischen Komfort, Klimaschutz und Kosten zu entwickeln.

2. Der ganzheitliche Ansatz und die Maschine

Gebäude stellen komplexe dynamische Systeme dar und sind zugleich Prototypen. Das Zusammenspiel von Gebäudehülle, Raumklimatetechnik und Energieerzeugung legt maßgeblich die Gebäudeperformance mit ihren Teilaspekten wie z. B. Komfort, Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit fest und ist optimal aufeinander abzustimmen. Als wesentliche Bausteine sind dabei passive Maßnahmen (z. B. Nutzung von Gebäudespeichermassen) und die Nutzung natürlicher Ressourcen (z. B. natürliche Lüftung, Tagesbelichtung) einzubeziehen.



Abbildung 2: Das Zusammenspiel von Gebäudehülle, Klimatechnik und Energieerzeugung bestimmt maßgeblich die Gebäudeperformance.

Ganzheitliche Gebäudekonzepte müssen die vergleichsweise komplexen und dynamischen Wechselwirkungen innerhalb eines Gebäudes ausreichend berücksichtigen. Bisher werden diese Wechselwirkungen im Planungsprozess noch zu wenig beachtet. Dies ist unter anderem auf die strikte Gewerketrennung im Bausektor und die zunehmende Spezialisierung der einzelnen Fachdisziplinen zurückzuführen. Die Gebäudesimulation kann diese Lücke ideal schließen und die Wechselwirkungen zwischen Architektur, technischer Gebäudeplanung, Fassadenplanung und Bauphysik auflösen.

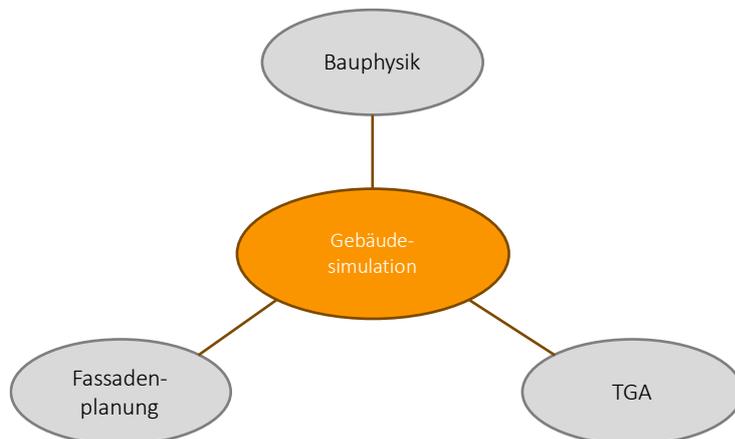


Abbildung 3: Die Gebäudesimulation als Bindeglied im Planungsprozess.

Nur wenn die einzelnen Wechselwirkungen in ihrer Dynamik berücksichtigt werden, können optimale Konzepte gefunden werden. Einzelne Maßnahmen für sich isoliert und losgelöst von ihren Auswirkungen zu betrachten, wird dem komplexen System Gebäude nicht gerecht.

Folgendes Beispiel verdeutlicht diesen Ansatz. Bei einem Verwaltungsgebäude war die Vorgabe, die Bürofassaden vollflächig zu verglasen. Bei den vorliegenden Rahmenbedingungen war ein Außensonnenschutz unter gestalterischen Gesichtspunkten nicht möglich. Als ersten Lösungsansatz hatten die Architekten einen in der Verglasung integrierten Sonnenschutz vorgesehen. Unter bauphysikalischen Gesichtspunkten stellt dies eine sehr hochwertige Lösung dar. Nachteilig sind allerdings die vergleichsweise hohen Investitionskosten sowie ein erhöhter Wartungsaufwand. Im Rahmen einer Untersuchung wurden mehrere

Alternativen zur Fassadenausbildung (siehe Abbildung 4) betrachtet. Eine Variante baut auf der Ausgangsvariante auf und reduziert die sommerlichen Strahlungslasten weiter durch eine zusätzliche Sonnenschutzbeschichtung. Dies führt zu geringeren Kühllasten und reduziert die erforderliche Technikausstattung für die Gebäudekühlung. Nachteilig sind die nochmals höheren Kosten für die Fassade und ein geringerer Tageslichteintrag gegenüber der Ausgangsvariante. Als dritte Fassadenvariante wurde eine ausgeprägte Sonnenschutzverglasung mit einem innenliegenden Sonnenschutz betrachtet. Diese Variante führt zu deutlichen Einsparungen bei den Fassadenkosten. Dieser Vorteil wird aber mit höheren solaren Lasten im Sommer, einem höheren Technikaufwand zur Raumkühlung sowie einem geringeren Tageslichteintrag erkauft.

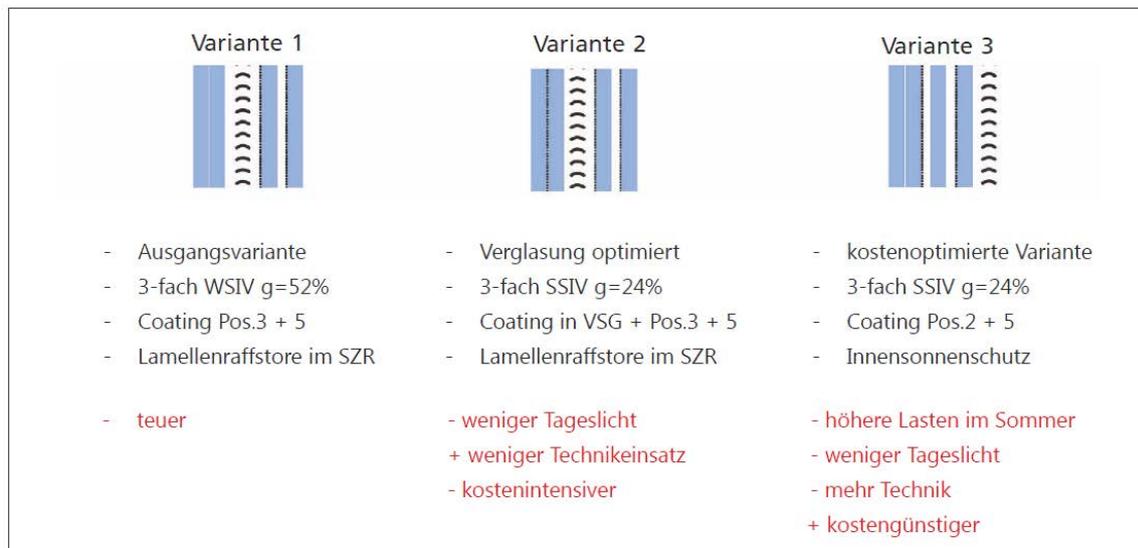


Abbildung 4: Fassadenvarianten und ihre Wechselwirkungen.

Welche dieser drei Fassadenvarianten bei den vorliegenden Rahmenbedingungen letztendlich die optimale Lösung darstellt, lässt sich ohne Simulation nicht beantworten. Hierzu sind die teilweise gegenläufigen Auswirkungen auf die solaren Warmgewinne im Winter, die sommerlichen Kühllasten und den Tageslichteintrag im Jahresverlauf zu berücksichtigen. Dies hat maßgebliche Auswirkungen auf den Energiebedarf und die Energiekosten. Auch die Investitionskosten sind im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einzubeziehen. Die ganzheitliche Untersuchung führte zu dem Ergebnis, dass die technisch hochwertigste Fassadenlösung im vorliegenden Fall nicht die optimale Lösung darstellt.

3. Die Evolution im Entscheidungsfindungsprozess

Das vorhergehende Beispiel zeigt, dass ein belastbarer Vergleich unterschiedlicher Lösungsansätze aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen und ihrer dynamischen Abläufe häufig nur mit Simulationen möglich ist. Die vergleichende Betrachtung einiger weniger, handverlesener Varianten wird aber nur in seltenen Fällen zur Findung einer optimalen Lösung führen. Hierzu liegen in der Baurealität üblicherweise zu viele freie Parameter vor. Das menschliche Gehirn vermag bei derart komplexen Fragestellungen niemals die aussichtsreichsten Varianten herauszufiltern. Die optimale Lösung kann häufig nur bei Betrachtung sehr vieler Varianten gefunden werden. Das verdeutlicht das nächste Beispiel.

Eine praxisrelevante Fragestellung könnte z. B. lauten: Wie muss die optimale Gebäudehülle beschaffen sein? Angestrebt werden ein möglichst hoher thermischer Komfort, niedrige CO₂-Emissionen sowie geringe Investitions- und Energiekosten bzw. eine hohe Wirtschaftlichkeit. Wesentliche bauphysikalische Parameter, die die Qualität der Gebäudehülle definieren sind z. B. der U-Wert der Fenster, der Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster, die Wärmedämmung der opaken Bauteile sowie der Sonnenschutz. Im Idealfall wird mit den Qualitäten auch auf die unterschiedlichen Fassadenausrichtungen reagiert: die Nordfassade eines Gebäudes ist idealerweise anders beschaffen als die Südfassade. Das führt (unter Berücksichtigung von Dach und Bodenplatte) bereits zu 18 freien Parametern.

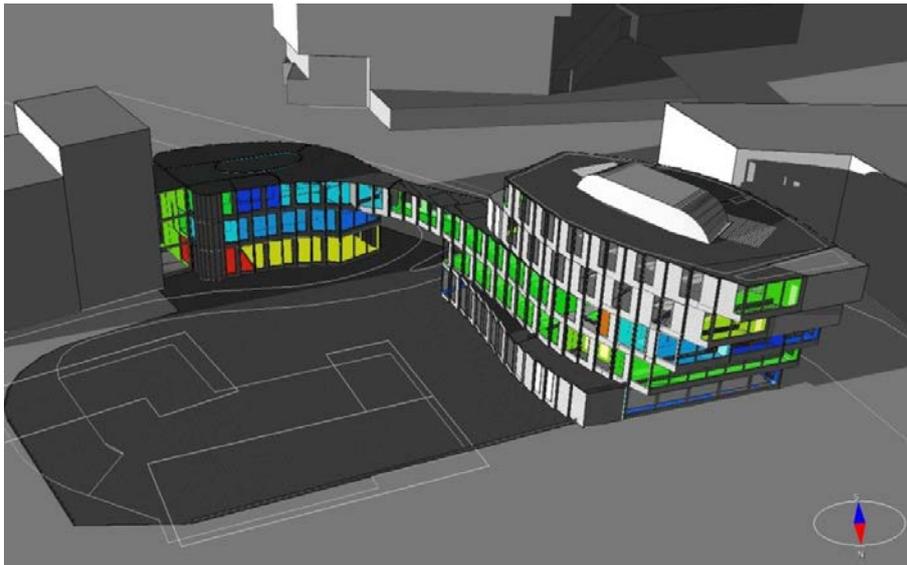


Abbildung 5: Simulationsmodell zur Ermittlung der optimalen Gebäudehülle.

Bei der vorliegenden Fragestellung handelt es sich im Prinzip um eine klassische mathematische Optimierungsaufgabe bei der die optimalen Werte für die einzelnen Parameter im Hinblick auf die angestrebten Zielgrößen zu suchen sind.

Die Lösung der Optimierungsaufgabe ist aber nicht trivial, da es schon aus Kostengründen nicht zielführend ist, für jeden Parameter die maximale Qualität vorzusehen. Zudem gibt es Parameter, die gegenläufige Wechselwirkungen haben wie z. B. der Gesamtdurchlassgrad (g -Wert) der Verglasungen: ein niedriger g -Wert (Sonnenschutzverglasung) führt zwar zu niedrigeren Kühlleistungen im Sommer aber im Gegenzug auch zu geringeren solaren Wärmegewinnen im Winter. In der Simulation ist auch zu berücksichtigen, dass zum Beispiel die Änderung der Fensterqualitäten auch Auswirkungen auf die Raumklimatechnik (Größe der Heizkörper und Kühlflächen) und der Erzeugerseite (Größe Heizkessel und Kältemaschine) hat.

Die 18 freien Parameter führen zudem bereits zu einer astronomisch hohen Zahl an kombinatorisch möglichen Varianten. Vor dem Hintergrund, dass für die vergleichende Bewertung der Varianten die Gebäudesimulation für jede Variante für ein gesamtes Jahr durchgeführt und anschließend im Hinblick auf die Zielgrößen ausgewertet werden muss, führt dies zu immensen Rechenzeiten, die die Planungsphase bei weitem übersteigen würden. Hier kommt die Evolution ins Spiel: evolutionäre Lösungsstrategien ermöglichen es die optimalen Lösungen bereits bei Betrachtung einer deutlich geringeren Variantenzahl zu ermitteln (bei typischen Fragestellungen im Bauwesen mehrere tausend Varianten). Dabei generiert der Computer selbständig die zu untersuchenden Konzeptvarianten. Die Ergebnisse der Optimierungsaufgabe sind in Abbildung 6 dargestellt (hier exemplarisch Lebenszykluskosten über Investitionskosten, die anderen Zielgrößen können analog dargestellt werden).

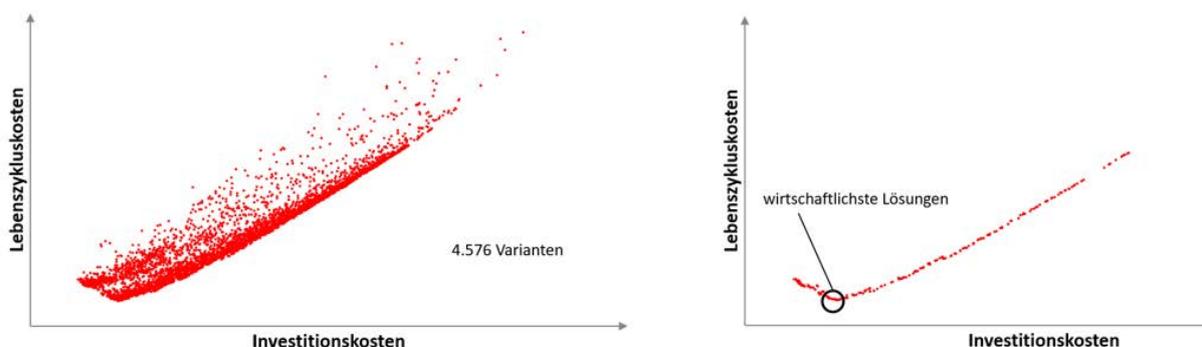


Abbildung 6: Ergebnisse der Optimierungsaufgabe Gebäudehülle
links: alle berechneten Varianten, jeder Punkt repräsentiert eine Variante
rechts: Schar aller optimalen Lösungen (Paretokurve).

Da in unserem Fall nicht nur eine Zielgröße, sondern mehrere gegenläufige Zielgrößen vorliegen, gibt es auch nicht die eine optimale Lösung. Vielmehr ist das Ergebnis eine Schar von Lösungen, die die gegenläufigen Zielgrößen bestmöglich erfüllen (Paretokurve).

Die Ergebnisse liefern dem Bauherrn eine transparente Entscheidungsgrundlage. Unter den gefundenen optimalen Lösungen kann er sich für die Lösung entscheiden, die seinen Zielvorstellungen am besten entspricht (z.B. kostengünstigste, wirtschaftlichste, nachhaltigste oder die zu einer gegebenen Investitionssumme wirtschaftlichste, nachhaltigste Lösung usw.).

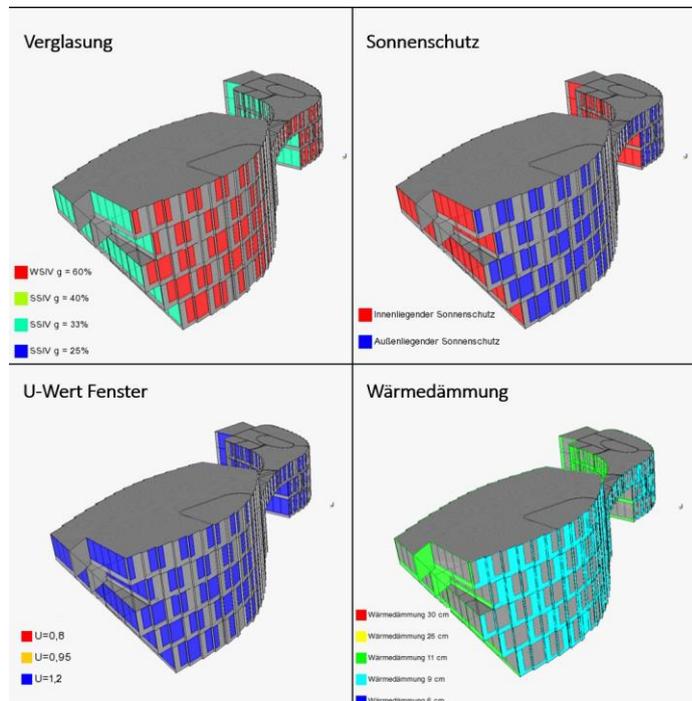


Abbildung 7: Die optimale Gebäudehülle: Ergebnis für die wirtschaftlichste Lösung.

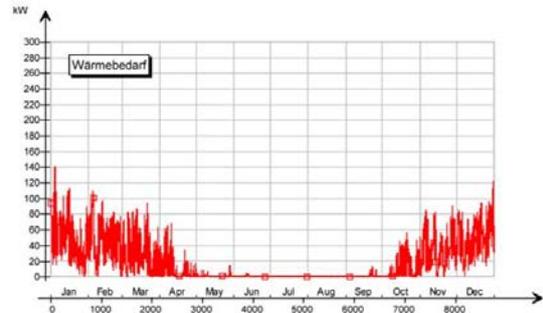
4. Beispiele

4.1. Das vom Rechner entwickelte Energiekonzept

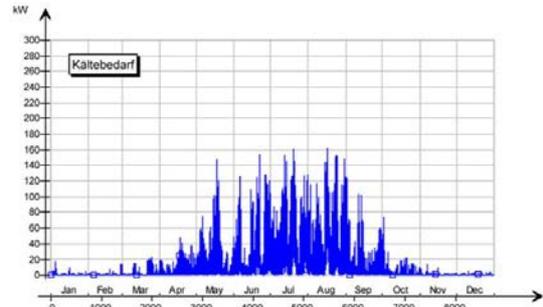
Die zuvor vorgestellte rechnergestützte, parametrisierte Optimierung kann u. a. auch ziel führend für die Entwicklung von Energiekonzepten eingesetzt werden. Hierbei werden die zuvor im Rahmen einer Gebäudesimulation ermittelten Lastgänge (Wärme-, Kälte- und Strombedarf) des Gebäudes in eine automatisierte Anlagensimulation eingespeist. Der Rechner soll nun das auf den individuellen Lastgang des Gebäudes optimal abgestimmte Energiekonzept finden. Hierzu werden im Vorfeld alle am Standort zur Verfügung stehenden Energiequellen (z. B. Fernwärme, Geothermie etc.) ermittelt und in der Simulation die korrespondierenden Erzeugerkomponenten (z. B. Gaskessel, Wärmepumpe, BHKW, Erdsondenfeld, Photovoltaik, Solarkollektoren, Eisspeicher etc.) als zulässige Parameter freigeschaltet. Dabei werden für die unterschiedlichen Erzeugerkomponenten auch unterschiedliche Produkt- und Systemvarianten mit unterschiedlichen Wirkungsgraden (z. B. BHKW mit unterschiedlichen thermischen und elektrischen Wirkungsgraden oder Vakuumröhrenkollektoren versus Flachkollektoren etc.) in die Betrachtung einbezogen. Schließlich wird der Rechner noch mit den Preisen der unterschiedlichen Erzeugerkomponenten sowie mit den standortspezifischen Energiepreisen gefüttert. Auf dieser Grundlage variiert der Rechner nun selbstständig anhand der evolutionären Lösungsstrategie das Energiekonzept und betrachtet dabei unterschiedliche Kombinationen und Größen von Erzeugerkomponenten.



Richter Musikowski Architekten, Berlin



Wärmebedarf Gebäude, kW



Kältebedarf, kW

Abbildung 8: Lastgänge des Gebäudes im Jahresverlauf als Eingangsgrößen für das Energiekonzept.

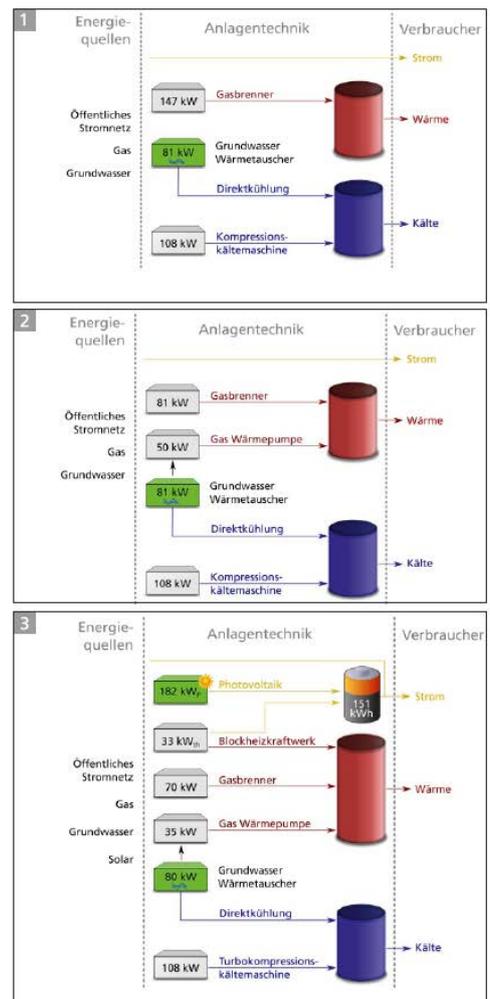
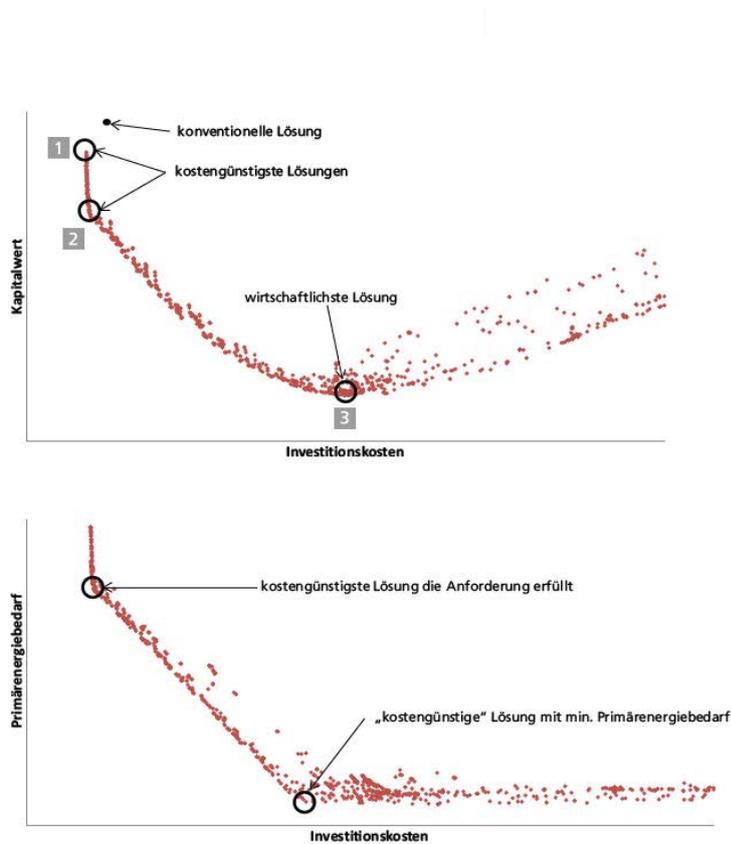


Abbildung 9: Das optimale Energiekonzept: Ergebnisse der parametrisierten Optimierung.

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der parametrisierten Optimierung aufgetragen. Dargestellt sind nur die optimalen Ergebnisse (Paretokurve), die die gegenläufigen Zielanforderungen optimal erfüllen. Für das Ergebnis wurden insgesamt ca. 14.000 Varianten betrachtet. Exemplarisch sind für einige ausgewiesene Ergebnisse die korrespondierenden Energiekonzepte dargestellt. Die rechnergestützte Optimierung führt dazu, dass bei multivalenten Konzepten die Größe der einzelnen Erzeugerkomponenten optimal aufeinander abgestimmt ist. Der Bauherr kann nun aus einer breiten Lösungsschar das für ihn optimale Konzept herausgreifen.

Hinweis: Als Beispiel wurde das von Richter Musikowski Architekten entworfene Futurium in Berlin herangezogen. Vor dem Hintergrund, dass das Werkzeug der parametrisierten Optimierung seinerzeit noch nicht im Planungsprozess zur Verfügung stand, wurden in dem Beispiel nur die Gebäudelastgänge des realen Projektes als Eingangsdaten verwendet. Die vorgestellte Entwicklung des Energiekonzeptes wurde später im Rahmen einer Fallstudie vollständig losgelöst vom realen Projekt durchgeführt.

4.2. Optimierung der Betriebsweise einer Vollklimaanlage

Als Ersatz für das im Jahr 2009 eingestürzte Archivgebäude der Stadt Köln wurde 2021 der nach Entwürfen von Waechter & Waechter Architekten errichtete Neubau am Eifelwall in Köln eröffnet. Im Ausstellungsbereich im Mantelbau finden Wechselausstellungen mit hochwertigen Exponaten und hohem Publikumsverkehr statt. Hier bestehen zum Schutz der kostbaren Exponate hohe Anforderungen an das Raumklima (Raumlufthemperaturen und Raumluftheuchte). Zur Sicherstellung eines geeigneten Raumklimas wird der Ausstellungsbereich über eine Vollklimaanlage mit konditionierter Luft versorgt. Die Frage, ob die vorgegebenen Klimaanforderungen bei der vorliegenden Nutzung tatsächlich eingehalten werden, wurde im Rahmen der Planung anhand von Simulationen überprüft. Insbesondere bei Vollklimaanlagen, die mehrere unterschiedliche Räume versorgen, liegen vergleichsweise komplexe Verhältnisse vor. Hier ist insbesondere eine geeignete Regelungsstrategie erforderlich.



©Brigida González, Stuttgart

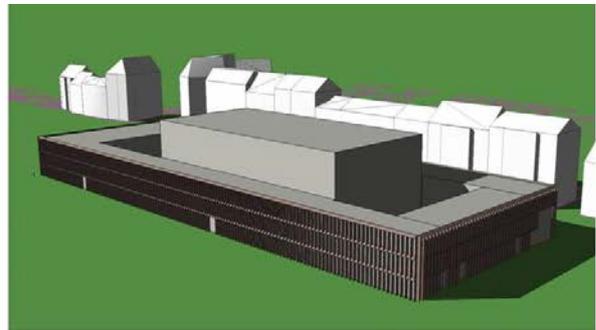


Abbildung 10: Historisches Archiv der Stadt Köln (Waechter & Waechter Architekten, rechts Simulationsmodell).

Nachdem die Simulation zu dem Ergebnis führte, dass die Klimaanforderungen mit der geplanten Klimaanlage nicht auf Anhieb erfüllt werden können, wurde die Klimaanlage nicht vergrößert, sondern ihre Betriebsweise optimiert. Dies ist auch im Hinblick auf die Betriebskosten von Vorteil, da die Zuluftaufbereitung in Vollklimaanlagen sehr energieintensiv ausfällt. Hierzu erfolgte eine rechnergestützte Optimierung. Dabei führte der Computer auf Basis evolutionärer Lösungsstrategien selbständig eine Parametervariation durch. Es wurden 22 Parameter variiert und u. a. der Verlauf der Sollwertkurven und die Regelungsstrategie optimiert. Insgesamt wurden 11.000 Varianten simuliert.

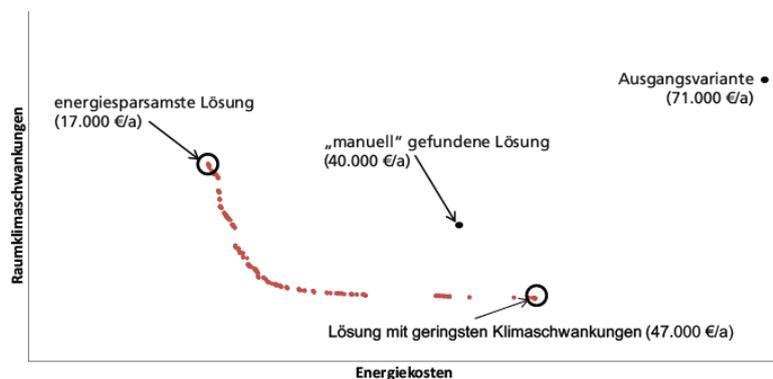


Abbildung 11: Ergebnisse zur Optimierung der Betriebsweise einer Vollklimaanlage.

In Abbildung 11 sind alle Lösungen dargestellt, die die Klimaanforderungen vollumfänglich erfüllen und gleichzeitig den Gegensatz Energiekosten vs. Raumklimaqualität optimal auflösen. Jeder dargestellte Punkt repräsentiert dabei eine Lösung mit einem vollständigen Parametersatz, der die Betriebsweise der Vollklimaanlage definiert. Die energiesparsamste Variante stellt die gesuchte Lösung dar. Gegenüber der Ausgangsvariante konnten nicht nur die Klimaverhältnisse drastisch verbessert, sondern zugleich auch die jährlichen Energiekosten um ca. 76 % gesenkt werden. In dem Diagramm ist auch ein Lösungspunkt eingetragen, der durch mehrere manuell vom «Menschen» durchgeführte Simulationen erarbeitet wurde. Wie man unschwer erkennen kann, kommt dieser Lösungspunkt nicht annähernd an die Qualität der durch den Rechner selbstständig erarbeiteten Lösungen heran.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass das mögliche Optimierungspotenzial bei derart komplexen Fragestellungen niemals mit herkömmlichen Planungsmethoden, sondern nur mithilfe einer rechnergestützten Optimierung voll ausgeschöpft werden kann.

4.3. Optimierung von Stadtquartieren

Im Hinblick auf den Klimaschutz rückt die Energieeffizienz und Klimaneutralität von Quartieren sowohl für Neubau- als auch Bestandssiedlungen zunehmend in den Vordergrund. Gerade bei älteren Bestandssiedlungen besteht ein hoher Nachholbedarf. Hierzu hat die KfW beispielsweise ein neues Förderprogramm aufgelegt (Energetische Stadtsanierung KfW-Förderprogramm 432). Bei den hohen Investitionssummen, sowohl für den Neubau als auch bei der Bestandssanierung, ist es absolut sinnvoll sich im Vorfeld intensiv Gedanken darüber zu machen, in welche Maßnahmen am besten investiert wird, um einen möglichst hohen Nutzen zu erzielen. Der Komplexitätsgrad nimmt bei Stadtquartieren gegenüber einzelnen Gebäuden nochmals deutlich zu. Bei dem Gesamtsystem Quartier interagieren drei Teilsysteme bestehend aus Gebäude, Wärmenetz und Energieerzeuger miteinander.

Anhand ganzheitlicher Quartierssimulationen können diese drei Teilsysteme optimal aufeinander abgestimmt werden. Es stellt sich zum Beispiel die Frage welcher Gebäudestandard am geeignetsten ist, mit welchem Wärmenetzsystem (zum Beispiel klassisches Hochtemperaturnetz, Niedertemperaturnetz oder Kaltnetz etc.) die Gebäude versorgt werden und schließlich welche Energiequellen am sinnvollsten Einsatz finden. Zur Klärung dieser Fragen und für eine bedarfsgerechte Dimensionierung bieten sich wieder rechnergestützte, parametrisierte Optimierungsverfahren an. In Anbetracht der bei Quartieren vorliegenden Größenordnung leuchtet ein, dass durch den Einsatz moderner Planungswerkzeuge nicht nur Planungssicherheit, sondern auch ein erhebliches Einsparpotenzial generiert werden kann.



Abbildung 12: Simulationsmodell eines Wohnquartiers einschließlich Wärmenetz.

Müller-BBM führt aktuell zu einem Neubauprojekt Quartierssimulationen (vgl. Abbildung 12) durch und setzt dabei eine parametrisierte Optimierung ein. Die Untersuchungen sind derzeit allerdings noch nicht abgeschlossen. Nachstehend zwei Beispiele für bereits durchgeführte Untersuchungen.

Abbildung 13 zeigt Ergebnisse einer parametrisierten Optimierung hinsichtlich der isolierten Fragestellung nach einem sinnvollen Gebäudestandard und dem Zusammenhang zwischen dem sich aus dem jeweiligen Gebäudestandard ergebenden Heizwärmebedarf und der resultierenden spezifischen Investitionskosten. Aus dieser Betrachtung ergeben sich beispielsweise die optimalen Wärmedämmstoffqualitäten für die einzelnen Bauteile unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Aus dem Ergebnis lassen sich auch die nötigen Investitionskosten für die Gebäudehülle je nach angestrebtem Gebäudestandard ableiten. Im Hinblick auf Fördergelder kann zum Beispiel die Frage beantwortet werden welche Investition für die Gebäudehülle mindestens erforderlich wird um einen bestimmten Energiestandard (hier GEG, EH55 und EH40) zu erreichen. Aus Abbildung 13 ist ersichtlich, dass es ab einem bestimmten Niveau, zur weiteren Senkung des Heizwärmebedarfs lohnender ist eine kontrollierte Wohnraumlüftung vorzusehen als den Wärmedämmstandard weiter anzuheben.

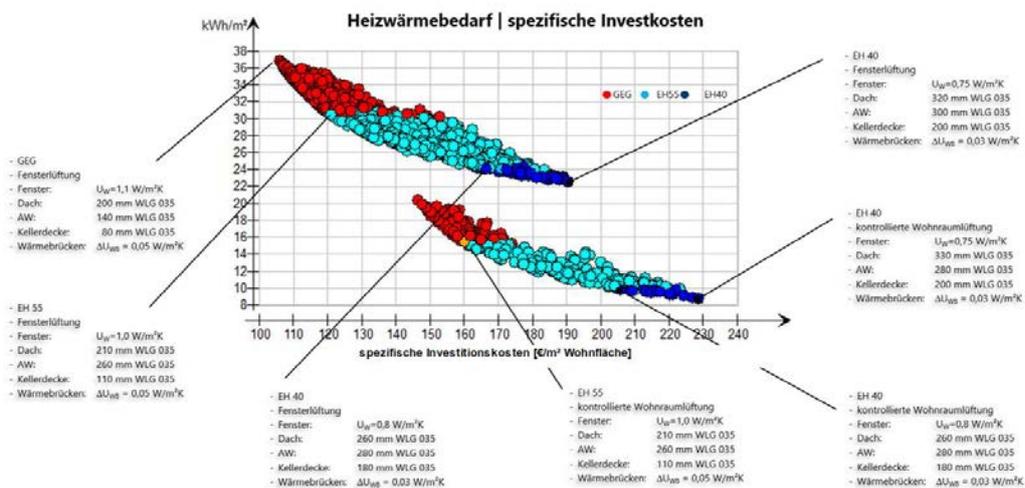


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und spezifischen Investitionskosten für unterschiedliche Gebäudestandards.

Bei Quartieren können die Leistungsspitzen bei der Heizwärmeversorgung durch eine gezielte Nutzung der thermischen Gebäudespeichermassen in erheblichen Umfang reduziert werden, was zu erheblichen Einsparungen bei der Wärmeerzeugung führt (vgl. Abbildung 14). Insbesondere wenn es sich bei den Wärmeerzeugern um vergleichsweise kostenintensive regenerative Systeme handelt.

Diese beiden Beispiele können einen ersten Eindruck hinsichtlich des breiten Einsatzspektrums von Simulationen und insbesondere automatisierter Optimierung auf Quartiersebene vermitteln.

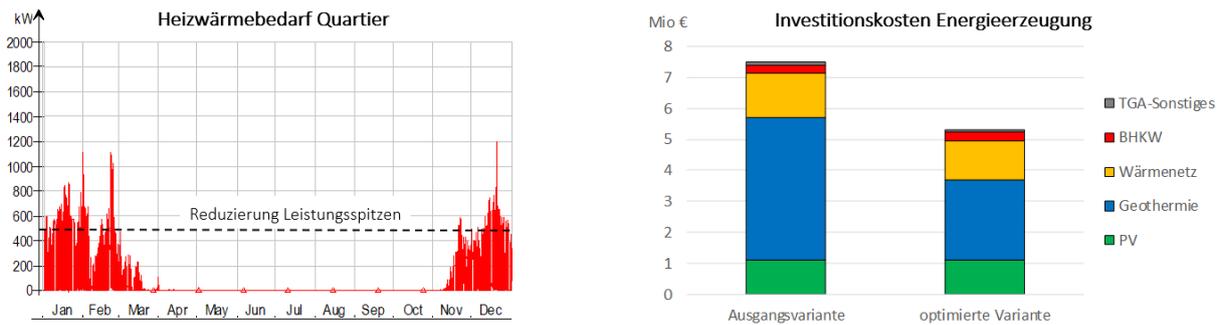


Abbildung 14: Einsparung bei den Investitionskosten der Energieerzeugung durch gezielte Nutzung der Gebäudespeichermassen und Reduzierung der Leistungsspitzen der Wärmeerzeugung.

5. Fazit

Insbesondere die im Hinblick auf den Klimaschutz weiter steigenden Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Gebäuden (Stichwort Klimaneutralität) wird zu einem Kostendruck im Baugewerbe führen. Ganz im Sinne der Nachhaltigkeit wird zukünftig im Bauprozess genauer hingeschaut werden müssen wo die Ressourcen, auch die monetären, im Einzelnen am besten eingesetzt werden, um einen maximalen Effekt zu erzielen. Aufgrund der Komplexität des Systems Gebäude sind bei der Entwicklung optimaler und effizienter Lösungen die herkömmlichen Planungswerkzeuge nicht mehr ausreichend. Um Potentiale voll ausschöpfen zu können, werden rechnergestützte parametrisierte Optimierungsverfahren erforderlich.

Die gute Nachricht ist, dass die benötigten Werkzeuge bereits zur Verfügung stehen und der damit einhergehende erhöhte Planungsaufwand durch den Nutzen mehr als wettgemacht wird. Nicht nur ermöglicht der Einsatz dieser Werkzeuge aufgrund der holistischen Betrachtungsweise überhaupt erst die Findung optimaler und kostenoptimierter Konzepte, ganz nebenbei führen derartig genaue Werkzeuge zu einer bedarfsgerechten Dimensionierung der haustechnischen Anlagen und somit auch zu erheblichen Einsparungen bereits bei den Investitionskosten. Diese Einsparungen übersteigen die höheren Planungskosten üblicherweise bei weitem.

Circular Economy – Prinzipien für ressourcen- und klimagerechte Architektur

Jörg Finkbeiner
Partner und Partner Architekten
Berlin, Deutschland



Circular Economy – Prinzipien für ressourcen- und klimagerechte Architektur

1. Einführung

1.1. Der Status Quo

Die Welt befindet sich in der größten Transformation der Menschheitsgeschichte: Ressourcenverknappung, Klimawandel und Bevölkerungswachstum mit einhergehender Urbanisierung, die Dynamisierung der Wirtschafts- und Lebensmodelle, Digitalisierung etc. sind hinlänglich bekannt und stellen die Bauindustrie vor immense Herausforderungen. Mit der Frage nach zukunftsfähigen Bauweisen rücken innovative Konzepte, die sowohl der zunehmenden Rohstoffverknappung, der notwendigen Energieeffizienz, als auch dem Flächenverbrauch gerecht werden, immer mehr in den Fokus gesellschaftlichen Interesses. Durch einen notwendigen Paradigmenwechsel in Stadtplanung und Architektur, muss der Gebäudesektor seiner gesellschaftlichen Verantwortung gerecht werden. Der Gebäudesektor bei diesen Fragen eine wesentliche Rolle spielt ist unstrittig, die Frage, ob zirkuläres Bauen dabei lediglich einen Trend darstellt, der bestenfalls eine Nische besetzen wird, erübrigt sich bei der genauen Betrachtung der Fakten:

Die Erde ist ein stofflich geschlossenes System. Gleichzeitig werden in den kommenden Jahren und Jahrzehnten weltweit neue Mega-Metropolregionen in einem Umfang entstehen, die in etwa der Weltbevölkerung des Jahres 1930 entsprechen. Der zusätzliche Ressourcenbedarf ist enorm und wird bei global vernetzten Rohstoffmärkten zu Verteilungsfragen und Preissteigerungen führen. Auch die europäischen Städte werden weiterwachsen, im Wesentlichen aber umgebaut und angepasst werden müssen. Wie gehen wir mit den dort jetzt schon gebundenen Ressourcen um? Ein Übergang vom derzeitigen linearen Wirtschaften zu einem zirkulären System der Wieder- und Weiterverwertung wird unvermeidlich sein.

Allerdings ist es notwendig genau hinzuschauen: Die bereits verbauten Rohstoffe, die sich teilweise als «Urban Mining» wiedergewinnen lassen, eignen sich nur sehr eingeschränkt für eine echte Weiterverwendung im Sinne des zirkulären Bauens. Sie wurden nicht für eine spätere Wiederverwendung erzeugt und verbaut. Dies gilt vor allem für die Bauten der Nachkriegszeit. Viele Baustoffe lassen sich nicht sortenrein voneinander trennen, sind oftmals schadstoffbelastet oder enthalten unbekannte Inhaltsstoffe. Upcycling aus diesen Rohstoffen wird deshalb das Problem der Ressourcenknappheit lediglich verzögern können. Früher oder später erreichen diese Baustoffe ihr End-of-Life und werden Abfall im klassischen Sinne sein. In der Regel ist schon die erste Wiederverwendung ein «Downcycling-Prozess», da die Baustoffe in ihrem «zweiten Leben» nicht auf demselben Qualitätsniveau wiederverwendet werden können. Deshalb wird eine multiperspektivische Strategie notwendig sein, um Lösungen für diese Zukunftsfragen entwickeln zu können.

1.2. Strategien für zirkuläres Bauen

Die Handlungsanforderungen für eine zirkuläre Zukunft liegen auf der Hand: Gebäude und Städte müssen zu Rohstofflagern transformiert werden, in denen sich alle Baustoffe in gleichbleibender Qualität in Kreisläufen führen lassen. Zudem wird den nachwachsenden Baustoffen eine wesentlich höhere Bedeutung zukommen, um die zusätzlichen Bedarfe umweltverträglich bereitstellen zu können. Unsere Energieversorgung muss zudem zu hundert Prozent regenerativ organisiert sein.

Um das zu erreichen brauchen wir aber auch eine andere Planungskultur und müssen das Verhältnis aller am Bau- und Planungsprozess beteiligter Akteure zueinander neu justieren. Das kann zum Beispiel in integralen Planungsprozessen gelingen. Dabei sollte eine partnerschaftliche und offene Arbeitskultur entstehen, damit die Chancen und Potentiale des «neuen» Bauens frühzeitig herausgearbeitet und in eine ganzheitliche Betrachtung integriert werden können.

Die Planung, der Bau und der Betrieb (inklusive des Rückbaus) sollte sich der Frage widmen, wie ganzheitlich zirkuläres Bauen heute möglich ist und wie im Idealfall «ressourcenpositiv» gebaut werden kann. Dazu gehört die größtmögliche Flexibilität der primären Gebäudestruktur, sowie eine Konstruktionsweise die einen zerstörungsfreien Rückbau aller Gebäudekomponenten ermöglicht, ohne der Minderung der statischen und konstruktiven Eigenschaften. Dies begünstigt eine Wieder- und Weiterverwendung: Bauteile sollen an Ihrem «End of Life» wieder in die jeweiligen Kreisläufe rückführbar sein. Zudem müssen Fassaden- und Dachflächen auf Ihre Potentiale zur Energiegewinnung überprüft und aktiviert werden. Natürliche Potenziale und passive Maßnahmen, können zudem zu einer schlankeren haustechnischen Ausstattung beitragen und die Resilienz im Betrieb erhöhen.

Davon sind wir heute oftmals weit entfernt. Der überwiegende Teil der aktuell in Planung und Bau befindlichen Gebäude wird diesen Anforderungen nicht gerecht und schafft stattdessen «nicht-kreislauffähige Fakten» für mehrere Jahrzehnte.

1.3. Eine kreislauffähige Zukunft

Damit Architektur den oben beschriebenen Anforderungen gerecht werden kann, sind im Wesentlichen drei Voraussetzungen zu erfüllen:

– Abfall wird zu einer Ressource

Alle verwendeten stofflichen Ressourcen lassen sich entweder in den biologischen Kreislauf (Biosphäre) oder den technologischen Kreislauf (Technosphäre) zurückführen und auf gleichbleibendem Qualitätsniveau recyceln. Um dies zu gewährleisten, müssen rückbaubare Konstruktionen Grundlage jeder Planung werden. Verbundwerkstoffe sind zu vermeiden. Informationen zu Inhaltsstoffen der einzelnen Baustoffe müssen transparent verfügbar sein.

– Regenerative Energien nutzen

Die Energieversorgung muss zu 100% aus erneuerbaren Energien stammen. Die Verwendung von fossilen Energieträgern ist zu vermeiden. Da dies aus unterschiedlichen Gründen derzeit noch nicht immer möglich ist, sollte das Gebäude schon bei der Planung des Energiekonzeptes in Form einer «Roadmap», zukünftige Optimierungen berücksichtigen, damit sich diese später im laufenden Betrieb des Gebäudes einfach integrieren lassen. Dies ist vor dem Hintergrund relevant, dass wir es mit einer sehr schnellen technischen Entwicklung zu tun haben, sich aufgrund klimapolitischer Anpassungen in der Gesetzgebung, Förder- und Besteuerungsmodelle kurzfristig ändern werden und natürlich Aufgrund der Tatsache, dass der Lebenszyklus haustechnischer Komponenten den der primären Gebäudestruktur deutlich unterschreitet.

– Diversität fördern

Gebäude sollten einen Beitrag zur Diversität leisten. Dies umfasst einerseits konzeptionelle Diversität, die sich in kontextbezogener Architektur und baukulturellen Bezügen zeigen kann. Darüber hinaus sollten Gebäude auch einen aktiven Beitrag zur Biodiversität leisten, anstatt diese durch Versiegelung und Verwendung von Baustoffen mit toxischen Inhaltsstoffen in Bauteilen zu vermindern (z.B. Fungizide in Wärmedämmverbundsystemen).

Zusätzlich ist es unerlässlich, dass wir beim Planen und Bauen lernen müssen, Effizienz- von Effektivitätsstrategien zu unterscheiden. Selbstverständlich ist es wesentlich, Flächen, Energie und stoffliche Ressourcen effizienter zu nutzen. Gleichwohl sollte uns klar sein, dass in den vergangenen Jahrzehnten alle Effizienzstrategien nicht dazu geführt haben, die Bedarfe und damit der Verbrauch real zu senken. Vielmehr wurden durch eine erhöhte Effizienz, Ressourcen verfügbar, die direkt für die Steigerung des Konsums verwendet wurden. Der Ressourcenverbrauch sank in der Summe nicht und verschob lediglich den Zeitpunkt der jeweiligen Ressourcenknappheit auf einen Zeitpunkt in der Zukunft. Wir können davon ausgehen, dass im Jahr 2050 – trotz zusätzlicher Effizienzstrategien – die Nachfrage nach Ressourcen, das vorhandene Angebot um ca. 8 Milliarden Tonnen übersteigen¹ und wird. In

¹ Accenture Analyse

einem linearen Wirtschaftsmodell, das Ressourcen lediglich verbraucht und an deren End-of-Life als Müll unbrauchbar zurücklässt und damit vernichtet, wird das Angebot kontinuierlich geringer und die Nachfrage immer weniger bedient werden können.

Es ist deshalb wesentlich zu verstehen, dass wir zusätzlich zu einer Effizienzsteigerung, effektive Maßnahmen zum Erhalt von Ressourcen brauchen werden. Dies kann über die Entwicklung kreislauffähiger Wirtschaftsstrategien erfolgen und sollte beim Planen und Bauen die Grundlage aller konzeptionellen und entwurflichen Strategien sein.

1.4. Die Ressourcenlager der Zukunft: Primäre und Sekundäre Baustoffe

Betrachten wir einerseits den prognostizierten Ressourcenbedarf bis zum Jahr 2050 und andererseits, die uns zur Verfügung stehenden Ressourcen, sind wir zwingend dazu angehalten, Strategien für ein intelligentes Stoffstrommanagement zu diskutieren, weiterzuentwickeln und in unsere Planungs- und Bauprozesse zu implementieren. Dabei stehen und grundsätzlich zwei Ressourcenlager zur Verfügung:

- **Primäre Baustoffe:** Der überwiegende Teil unsere Baustoffe beziehen wir in großem Maßstab (vor allem seit Beginn der industriellen Revolution) als primäre Baustoffe aus der «Ökosphäre». Vor allem die nichterneuerbaren Rohstofflager, sind – je nach Baustoff- dabei schon unterschiedlich stark erschlossen und ausgebeutet. In global vernetzten Stoffstrommärkten sind deshalb, bei steigender Nachfrage, Preissteigerungen zu erwarten. Bei den primären Baustoffen, werden den nachwachsenden Baustoffen deshalb eine immer größere Bedeutung zukommen. Der Baustoff Holz wird dabei eine zentrale Rolle spielen, da er sich für eine vielfältige Verwendung eignet und zudem große Potentiale in Bezug auf Vorfertigung, Transport und einer Wiederverwendung in gleichbleibender Qualität bietet. Wichtig bei Planung von Gebäuden ist es deshalb, den Baustoff im Hinblick auf die Wiederverwendung als zukünftiger Sekundärbaustoff zu verstehen. Einer entsprechenden Konzeption des Gebäudestruktur sowie der Ausbildung der Fügungsdetails, sollte deshalb entsprechende Aufmerksamkeit gewidmet werden. Sowohl im Hinblick auf Ressourcenverfügbarkeit, als auch im Zusammenhang mit der dauerhaften Speicherung von CO₂, sollten sich Holzbauteile möglichst dauerhaft wiederverwenden lassen. Erst in einem zweiten Schritt, sind Bauteile in Form einer Kaskadennutzung zu recyceln. Die thermische Verwertung (oder im Idealfall eine Kompostierung), sollte durch eine stoffliche Weiterverwendung, so lange wie möglich vermieden werden. Dadurch bleibt die Ressource lange verfügbar und entlastet die Nachfrage nach primären Baustoffen. Außerdem bleibt das im Holz gebundene CO₂ auf diese Weise langfristig der Atmosphäre entzogen.
- **Sekundäre Baustoffe** spielen bisher im Gebäudesektor noch keine signifikante Rolle. Mineralische Rezyklate, werden hauptsächlich in Downcycling-Prozessen als minderwertigere Materialien z.B. im Straßenbau verwendet. Sie eignen sich nur sehr eingeschränkt für Upcycling. Im Recyclingbeton ersetzt das Rezyklat Zuschlagstoffe wie Sand und Kies, was grundsätzlich zu begrüßen ist, da es Landverbrauch und Verknappung dieser endlichen Rohstoffe entgegenwirkt, ist aber kein Ansatz im Sinne echter Kreislaufwirtschaft. Dennoch gilt es, den Fokus auch auf Sekundäre Baustoffe aus der «Anthroposphäre» zu richten. Die Materialien, die in unseren Städten und Gebäuden «gelagert» sind, stehen uns perspektivisch zur Weiterverwendung zur Verfügung. Auch wenn sie nicht im Sinne einer Wiederverwendung erzeugt und verbaut wurden, werden uns hier enorme Kontingente zur Verfügung stehen. Allein in Deutschland, wächst das anthropogene Lager jedes Jahr um eine Menge an, die der eines Kubus² mit einer Kantenlänge von 800m entspricht². Der Zugriff auf diese Materialien stellt uns allerdings vor neue Herausforderungen: Wann und in welchem Umfang sind diese Materialien verfügbar? Wie kann die Qualität der Materialien eingeordnet werden und wie geht man mit Gewährleistungsfragen um? Wie lassen sich die Baustoffe in einen Planungsprozess integrieren?

² Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän (Umwelt Bundes Amt 03/2017)

Zur Erfassung, Qualifizierung und Quantifizierung der Rohstoffe stehen inzwischen digitale Plattformen wie Madaster (<https://madaster.de/>) und Concular (<https://concular.de/de/>) zur Verfügung. Diese digitalen Rohstoffmarktplätze ermöglichen die Einbeziehung sekundärer Materialien in aktuelle Planungsabläufe. Dabei werden die Baustoffe vorab schadstoffgeprüft und deren Qualität entsprechend abgesichert.

Es bleibt abzuwarten, wie eine aktive Wiederverwendung der Sekundärmaterialien (als Bauteile oder Baustoffe) und zirkuläre Architekturkonzepte mittelfristig auch die Gestaltung der entsprechenden Gebäude verändern und damit auch Einfluss auf unsere baukulturelle Wahrnehmung der gebauten Umwelt nehmen wird.

2. (Vor-)Bauen für die postfossile Epoche

2.1. Herausforderung in einem komplexen Umfeld

Gebäude sind komplexe «Produkte», die in der Regel in einem ebenso komplexen Umfeld entstehen. Die Hürden in der Umsetzung liegen dabei nicht an fehlenden technischen Lösungen oder Baustoffen. Problematischer ist vielmehr ein Gesamtsystem, das für eine zirkuläre Zukunft bisher nicht gedacht ist: Pfadabhängigkeiten, etablierte Planungs- und Bauprozesse und eine – wenn auch gut gemeinte – Gesetzgebung verhindern oftmals mögliche Innovationen. Neben rein konstruktiven Anforderungen, stellen sich bei der Umsetzung des Prinzips auch grundlegende Fragen an die Finanzierungssysteme, das Einpreisen von Klimafolgekosten bei der Errichtung von Gebäuden, sowie fehlgeleitete Subventionen in eine fossile Energieversorgung.

Die Transformation von einem linearen zu einem kreislaufgerechten System ist grundlegend und umfassend und stellt unsere Gesellschaft, sowie das Bauen vor große Herausforderungen. Sie betrifft PlanerInnen genauso wie Baustoffindustrie, Entsorgungsunternehmen, die Gesetzgebung, BauherrInnen und InvestorInnen. Denn neben einer kreislauffähigen Konstruktion müssen Wertstoffkreisläufe entwickelt werden, sich etablieren und in dem Zusammenhang neue Geschäftsmodelle entstehen. Erforderlich ist eine ganzheitliche Planungskultur, die integral und transdisziplinär funktioniert. Wir stehen hier erst am Anfang einer umfassenden Transformation die notwendig werden wird, wenn bauliche Entwicklungen möglich werden sollen, ohne unsere Ökosysteme und unsere Ressourcenkapazitäten zu überfordern.

2.2. Ressourcenpositives Bauen ist möglich: WOODSCRAPER, Wolfsburg

Nach einer umfassenden Lebenszyklusbetrachtung und Ökobilanzierung bei dem von der Deutschen Bundestiftung Umwelt (DBU) geförderten Projektes «WOODSCRAPER – Kreislauffähige Hochhäuser aus Holz und Stroh» kann man feststellen, dass «ressourcenpositives» Gebäude grundsätzlich möglich sind. Die WOODSCRAPER+ belegen mit ihrem ganzheitlichen Ansatz, dass Nachhaltigkeit und Design keinen Widerspruch darstellen, sondern ein Schlüssel für die Herausforderungen der Zukunft ein kann. Mittels rationalisierter und integraler Planung, der Integration von Investitions- und Lebenszykluskosten, sowie Ökobilanzanalysen in den Entwurfsprozess, konnte belegt werden, dass ressourcenpositives Bauen mit schlanker Gebäudetechnik selbst in der Typologie Hochhaus ohne Mehrkosten heute schon möglich ist. «Ressourcenpositiv» bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Gebäude über ihre Lebenszeit mehr Ressourcen erzeugen, als sie für ihre Errichtung und Instandhaltung benötigen. Es bedeutet auch, dass die eingesetzten Ressourcen sich sortenrein zurückgewinnen lassen, damit Stoffkreisläufe schließen und im besten Fall in dieser Zeit wieder komplett nachgewachsen sind.

Darüber hinaus dienen die eingesetzten, nachwachsenden Rohstoffe als Speicher für Klimagase. Schon während der Errichtung speichern die WOODSCRAPER+ mehr Klimagase in ihrer Konstruktion ein, als für ihre Errichtung benötigt wird. Das Projekt zeigt: «Vom Ende her zu denken» kann die Prämisse für den Beginn des Bauens der Zukunft sein.



Abbildung 1: Visualisierung WOODSCRAPER, Wolfsburg

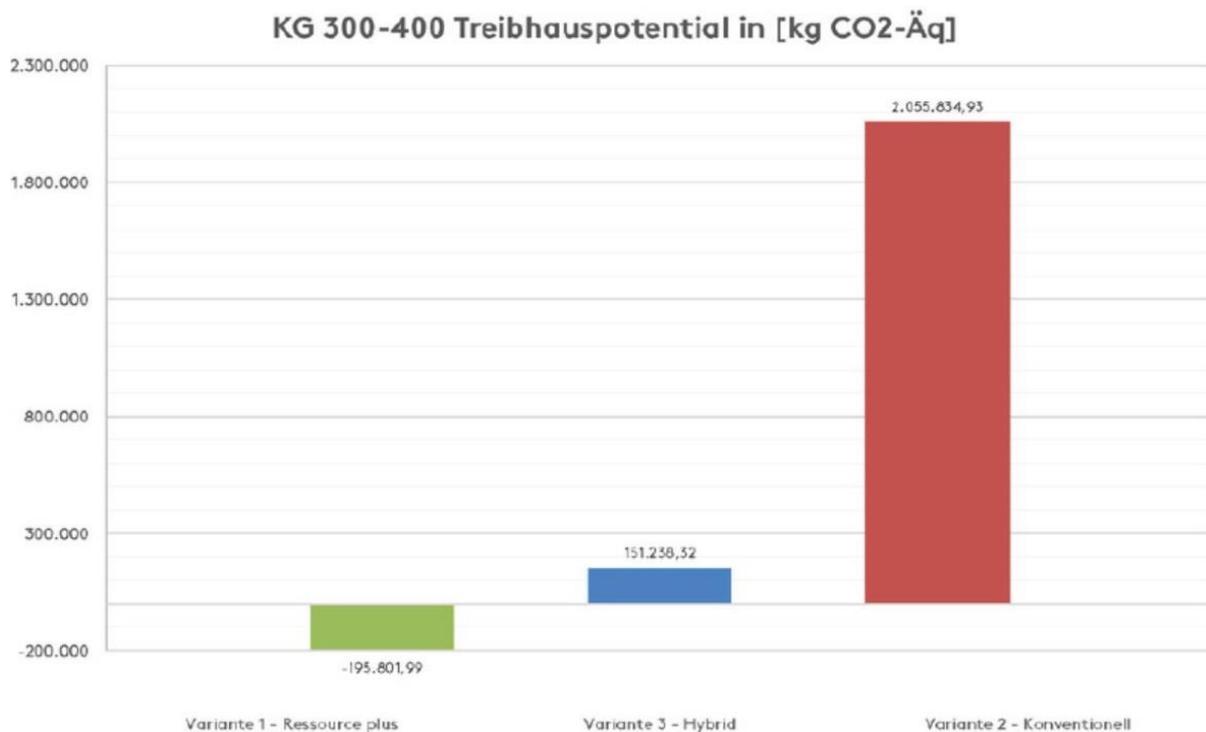


Abbildung 2: Treibhausgaspotential der WOODSCRAPER im Vergleich mit Referenzgebäude

2.3. Dynamische Gebäude: Gründerzentrum Lune Delta, Bremerhaven

Das Gründerzentrum im Lune Delta in Bremerhaven, soll der Initialbau für ein Gewerbegebiet für die «Green Economy» werden. Als Anlaufstation für zukünftige Gewerbetreibende wird das Gebäude zudem Besuchergruppen zukunftsfähige Architektur erlebbar vermitteln. Auf ca. 6000m² Nutzfläche entstehen Büro- und Arbeitsflächen für Start-Ups grüner Technologien. Aufgrund seiner Nutzung ist eine maximale Flexibilität in der Nutzung zu gewährleisten. Zukünftige Anpassungen an geänderte Mieterbedarfe sind in der Planung mit zu berücksichtigen. Das Projekt eignet sich deshalb hervorragend dazu,

zirkuläre Gebäudeprinzipien unter Einbezug des Gebäudebetriebs zu entwickeln. Das Gebäude folgt sowohl in der Errichtung, als auch im Betrieb und einem späteren Rückbau zirkulären Prinzipien. Die Baustoffe sollen sich in die jeweiligen Kreisläufe zurückführen lassen. Die Nutzer werden in die Nutzung des Gebäudes aktiv mit einbezogen. Auf eine Lüftungsanlage wird verzichtet. Vielmehr nutzt das Gebäude über das zentrale Atrium gebäudestrukturelle Vorteile für eine natürliche Querlüftung und Nachtauskühlung. Ein «Commonspace» der der gemeinschaftlichen Nutzung dient und die Kommunikation zwischen den Nutzern fördert, verbindet die vier Geschosse räumlich und visuell.

Die Primäre Gebäudestruktur besteht aus einem Skelettbau in Holzbauweise mit einer Spannweite von 8,10m. Die quadratische Grundstruktur wird, sofern keine Schallschutztechnischen Belange entgegenstehen, mit Sekundärbaustoffen ausgefacht. Dazu prüfen wir im Planungsprozess die Verfügbarkeit von regionalen Baustoffen aus anstehenden Rückbauprojekten.

Das Gebäude wird mit nur einem Brandabschnitt versehen. Dadurch entfallen sämtliche Anforderungen und Kosten an Brandabschlusswände. Die Geschosse, lassen sich (unter Berücksichtigung der Erreichbarkeit der beiden Fluchttreppenhäuser) frei aufteilen und unkompliziert an zukünftige Nutzungsanforderungen anpassen.

Die geothermische Energieversorgung erfolgt über aktivierte Fundamentpfähle und wird ergänzt durch eine Photovoltaikanlage auf dem Dach. Aufgrund des Standorts an der Küste und entsprechender Windverhältnisse, kommen zudem Kleinwindanlagen auf der Dachfläche zum Einsatz. Überschüssiger Strom, wird in Salzwasser-Akkus gespeichert und erhöht die Eigennutzung signifikant.

Das Gebäudekonzept sieht zudem vor, die Innenausstattung über ein modulares Möbelsystem in einem Leasingverfahren flexibel an die Nutzerbedarfe anzupassen. So wird gewährleistet, dass auch der relativ kurze Lebenszyklus der Möblierung im Ressourcenmanagement Berücksichtigung findet und kein Müll entsteht.

Das Gebäude wird DNBG zertifiziert und strebt den Platin-Status an.



Abbildung 3: Gründerzentrum Lune Delta, Bremerhaven

2.4. Baustoff «Upgrade»

39M – local circular upgrade

Das «39M- local circular upgrade»-Konzept fokussiert sich auf zwei wesentliche Aspekte zirkulären Bauens: Der Rückbau eines Gebäuderiegels von 1958 erfolgt mit dem Ziel, neben der Weiterverwendung von nichttragenden Bauteilen, die Primärkonstruktion (Decken, Träger, Stützen, Ausfachung) in einem Upcyclingprozess zu kreislauffähigen Bauteilen «upzugraden» und diese innerhalb derselben Baumaßnahme, vor Ort zu einem neuen Bauwerk zusammzusetzen.



Abbildung 4: 39M – Pavillon aus lokalen Sekundärbaustoffen

Die Konzeptidee ist in zweierlei Hinsicht besonders:

1. Neben den Ausstattungsmaterialien und den nichttragenden Bauteilen, erfährt die Primärkonstruktion eines Gebäudes aus den 1950er Jahren, das im Sinne einer linearen Wertschöpfung entworfen und gebaut wurde, durch geordnetes Zerteilen in transportable Bauelemente ein «Systemupgrade». Durch diese Strategie wird nicht nur ein Downcycling-Prozess vermieden. Im Gegenteil: aus einem linearen Baustoff entstehen zirkuläre Gebäudekomponenten. Die Ortbeton-Stützen und -Träger, sowie die Rippendecken, werden zu wiederverwendbaren Bauelementen.

2. Die neu gewonnenen Bauteile werden innerhalb derselben Baumaßnahme, auf demselben Grundstück, zu einem neuen Gebäude zusammengesetzt. Transporte entfallen dadurch größtenteils, der Entwurfsprozess generiert eine «andere» Art von lokaler Architektursprache, die

dem Prinzip «Form Follows Resource» folgt. Das Upcycling-Gebäude steht damit nicht nur für eine Wertschätzung von Ressourcen und das Halten dieser in lokalen Kreisläufen, sondern auch für ein neues ästhetisches Mindset.

Die Innovation des Konzeptes besteht in einem Upgrade von linearen Baustoffen in zirkuläre Bauteilkomponenten und deren lokalen Weiterverwendung.

Die «Material-Reinkarnation» verändert dabei den Entwurfsansatz grundlegend und generiert eine neue, ortstypische Architektursprache, die vermeintlich alte, minderwertige Baustoffe in einen neuen Kontext transferiert und damit dabei hilft, den Blick auf unser anthropogenes Erbe zu verändern.

Neben der primären Tragstruktur, die aus dem Bestandsbau gewonnen wird, werden auch die Fenster ausgebaut und zu einem Fassadenkleid des neuen Gebäudes zusammengesetzt. Alle notwendigen primären Ergänzungsbaustoffe werden – sofern möglich – aus nachwachsenden Baustoffen hinzugefügt. Das Konzept setzt im Lebenszyklus am «end-of-life» an und überführt vermeintlichen «Abfall» Onsite, in einen neuen Lebenszyklus. Ökobilanztechnisch leistet das Konzept einen wichtigen Debattenbeitrag zu den Potentialen des Modul D in der Ökobilanzierung.

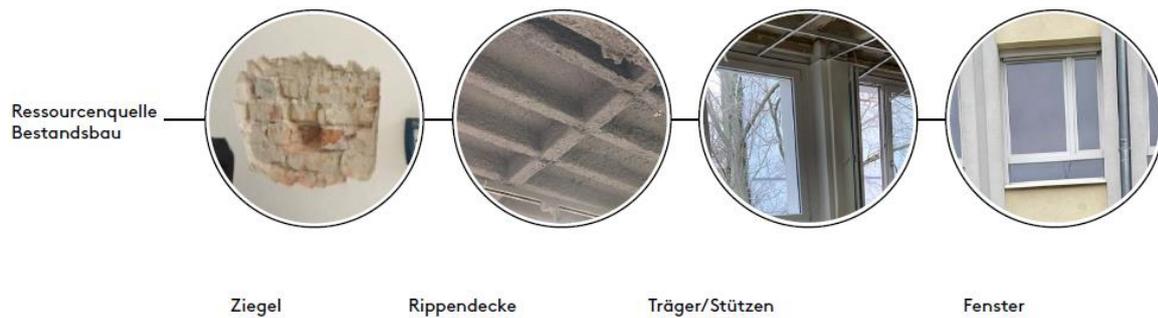


Abbildung 5: Ressourcen aus Bestandsbau

Die ökologischen Vorteile des Konzeptes liegen auf der Hand: vermeintlicher Abfall wird beim Rückbau in kreislauffähige Elemente transformiert. Es wird Müll vermieden und der Bedarf an Primärbaustoffen reduziert. Die Emission von Klimagasen entfällt weitestgehend. Durch die Onsite-Wiederverwendung fallen weder Transportemissionen durch den Abtransport, noch durch die Anlieferung von alternativen Baustoffen an. Die vorhandenen «Rückbau-Ressourcen» werden zudem unmittelbar bestimmender gestalterischer Akteur in der Neubauplanung und führen so den baukulturellen Diskurs am Ort fort.

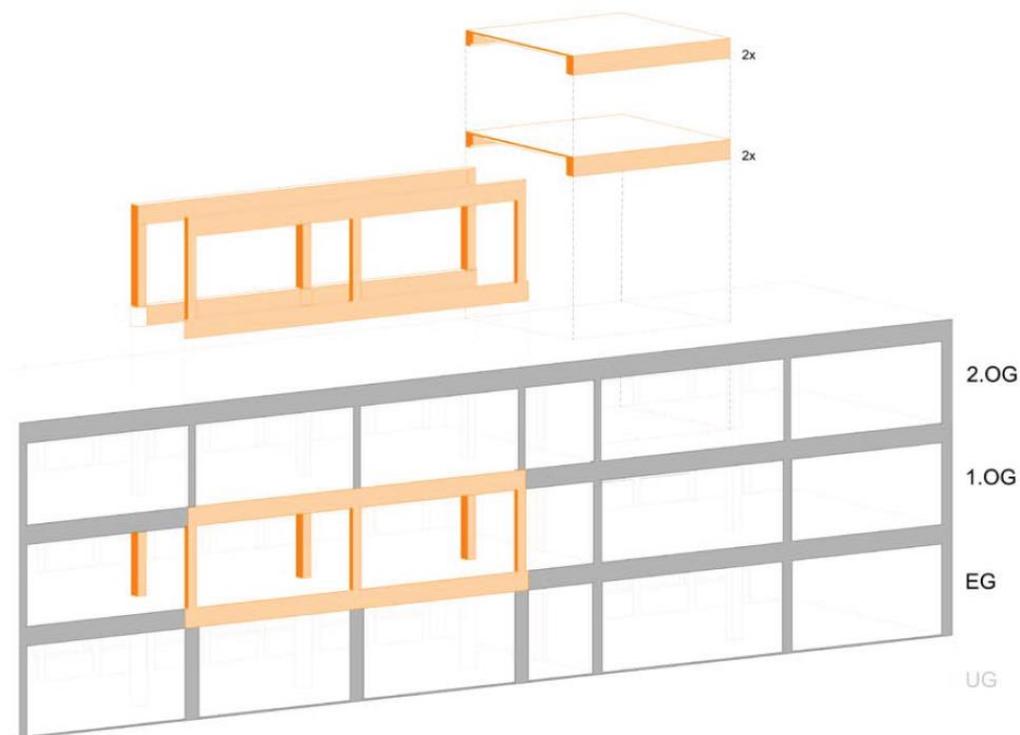


Abbildung 6: gezielter Rückbau der Primärkonstruktion zur Wiederverwendung als tragende Bauteile

Das Konzept ist Teil des konkreten Bauprojektes «ZilleCampus» in Berlin-Charlottenburg und soll im Laufe des Jahres 2023 in die Umsetzung gehen. Die Rückbaumaßnahmen erfolgen Mitte des Jahres 2022. Die Bauteile sollen auf dem Grundstück zwischengelagert werden.

Der Bauherr legt der Projektentwicklung ein holistisches Nachhaltigkeitsverständnis zugrunde. Der Pavillon soll als exemplarisches Experimentalgebäude für Zirkuläres Bauen im Zuge der Umsetzung des Gesamtprojektes realisiert werden. Neben der hohen ökologischen Qualität zielt die Entwicklung des Upcycling-Pavillons über seine Funktion als Kultur-, Begegnungs- und Veranstaltungsort sowie als Ort der Wissensvermittlung für die lokale Community auf einen sozialen Impact ab, wozu die Erlebbarkeit des zirkulären Bauens im Experimentalgebäude einen wichtigen Beitrag leistet.

Die Umsetzbarkeit und Ausbaufähigkeit hängt im Wesentlichen davon ab, ob es gelingt, das vermeintliche «Problem» eines Bestandsbaukörpers, der zurückgebaut werden muss, als Potential und Chance zu erkennen und ausreichend Informationen über die vorhandenen Bauteilkomponenten zusammentragen zu können. Neben der Schadstoffanalyse, ist dafür vor allem auch eine bauphysikalische und statische Bewertung der Elemente notwendig. Dazu muss die statische Berechnung über Bauarchive gesichtet und bewertet werden. Vor dem Hintergrund, dass sich die Transformation und Erweiterung unserer urbanen Räume mit genau diesem anthropogenen Lager beschäftigen wird, sind die Skalierungspotentiale enorm und die langfristige Wirkung kann einen signifikanten Beitrag zu einer zirkulären Zukunft leisten.

3. Zusammenfassung

Eine zirkulär organisierte Welt wird in der bevorstehenden postfossilen Epoche eine wesentliche Rolle spielen. Der zirkuläre Wirtschaftsansatz, steht aus unserer Sicht für einen notwendigen Paradigmenwechsel. Dafür ist aber auch eine breite gesellschaftliche Debatte notwendig. Wir verstehen diesen Prozess als eine große Chance, der gebauten Umwelt eine neue Sinnhaftigkeit und inhaltliche Tiefe zu verleihen. Denn nur so kann Architektur ihrer gesamtgesellschaftlichen Verantwortung gerecht werden.

Sponsoren – Aussteller



Komplettanbieter für Massivholzprodukte und innovative Baulösungen

Mit unseren Massivholzprodukten und innovativen Baulösungen werden weltweit Gebäude unterschiedlichster Verwendung durch Kunden und Partnerbetriebe errichtet. Modernste CNC-Technologie ermöglicht jegliche Bearbeitung unserer massiven Holzbauprodukte. Die kompetente binderholz Technikabteilung unterstützt Sie bei der Erarbeitung verschiedenster Gebäudekonzepte und der technischen Planung. Für durchdachte Massivholzbau Lösungen beraten Sie unsere Ingenieure mit fundiertem Fachwissen.

Sägeprodukte | Holzbauprodukte: Brettsper Holz BBS, Brettschichholz, Massivholzplatten, Konstruktionsvollholz | DIY-Produkte | Pressspanpaletten und -klötze | Biobrennstoffe | Pferdestreu

Wir haben etwas
gegen Zeitdruck und
Wetterumschwünge.
Sie jetzt auch.

www.egger.com/dhf



Sofort
ab Lager
verfügbar

Die diffusionsoffene Holzfaserverplatte DHF dient während der Bauphase als Behelfsdeckung. Von März bis November ist sie zwei Monate lang frei bewitterbar, verschafft Zeit und schützt vor Wind und Wetter. **Damit bietet sie mehr Sicherheit in Ihrem Bauablauf.**

MEHR AUS HOLZ.

E EGGER

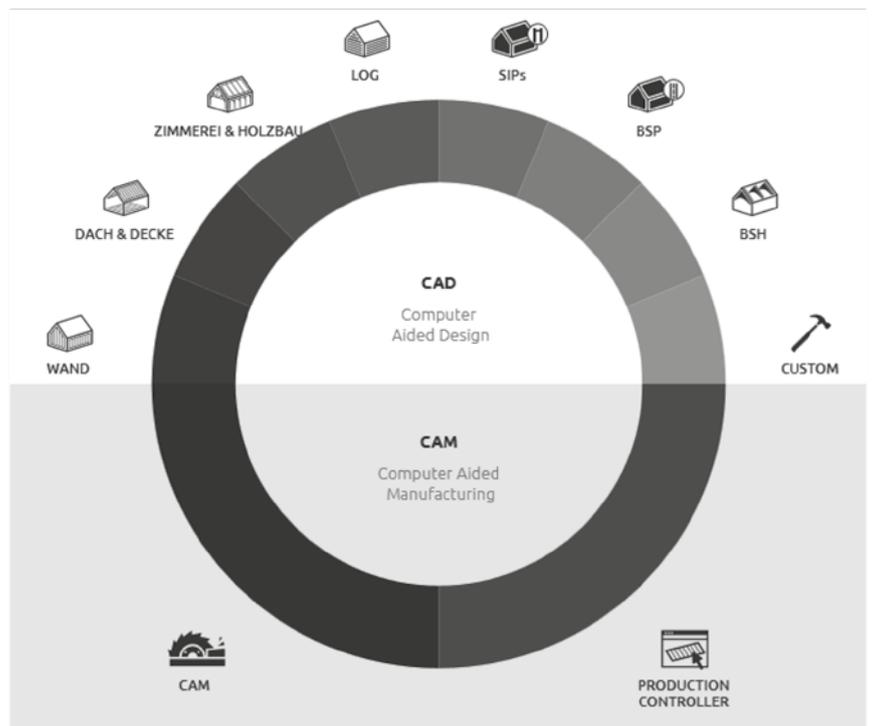
Einfach CAD

hsbcad – CAD/CAM für den
Holzbau auf der Basis von
AutoCAD Architecture®
und Autodesk Revit®

hsbcad ist die intelligente 3D-CAD-Lösung für alle Bereiche des Holzbaus. hsbcad basiert auf AutoCAD Architecture® oder Autodesk Revit - den weltweit führenden CAD-Plattformen. Auf dieser Grundlage vereint **hsbcad** den **gesamten Planungsprozess** im Holzbau und HolzFertighausbau **in einer Lösung** und in einem dynamischen und durchgängigen Konzept: **BIM** (Building Information Modeling). BIM unterstützt Sie dabei, Ihr 3D-Modell intelligent, konsequent und produktiv zu nutzen. Digitalisieren Sie mit unserem Fertigungsleitstand **hsbmake** Ihren Produktionsprozess und teilen Sie mit **hsbshare** Ihre digitalen Modelle mit Ihren Projektbeteiligten. hsbcad bietet **Datenfluss** von der Architektur über den Verkauf bis hin zur Arbeitsvorbereitung und CNC-Fertigung – **eine Lösung für alles!**

1 Lösung für alle Bereiche

hsbcad bietet innerhalb einer
Oberfläche für alle Bereiche des
Holzbaus eine einheitliche Lösung



Wir sind für SIE da

Besuchen Sie unseren Stand im Foyer.

Wir freuen uns auf ein Gespräch mit Ihnen!



ISOCELL

ISOCELL GmbH & Co KG

Gewerbestraße 9

5202 Neumarkt am Wallersee | Österreich

Tel: +43 6216 4108-0 | Fax: +43 6216 7979

office@isocell.at

WIR SCHÜTZEN VOR WASSER: VON OBEN...

Der Schutz vor Niederschlag ist ein essentielles Element im Gebäudebau. Hochwertige Produkte schützen bei Wetterkapriolen, nicht nur in der Bauphase.

Bauzeitschutz, Transportschutz und Luftdichtheitsschicht in einem Produkt vereint. Vollflächig klebend, rutschfest durch Anti-Slip-Ausrüstung, robust und wasserdicht durch den doppelten Funktionsfilm. Der **variable sd-Wert** garantiert optimale Rücktrocknung.



Hochwertige Dachbahnen für **regensichere** und **erhöht regensichere** Unterdächer.



& VON UNTEN

Der Wunsch nach Barrierefreiheit stellt neue Anforderungen an den Bau. Hochwertige Butyl- oder Bitumenklebebänder in Verbindung mit streichbarer Abdichtung sind **auch bei komplexen Übergängen eine sichere Lösung.**



OMEGA PLASTO Band



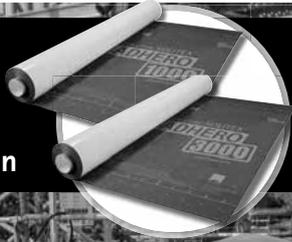
VERARBEITUNGSVIDEO

Das OMEGA PLASTO Band wurde in Kombination mit der OMEGA PoBit Dichtpaste gemäß der Richtlinie Bauwerksabdichtung-Anschluss an bodentiefe Fenster und Türen, Teil 2 auf Stauwasserdichtheit geprüft. (HFA 2281/2019/G-BF)

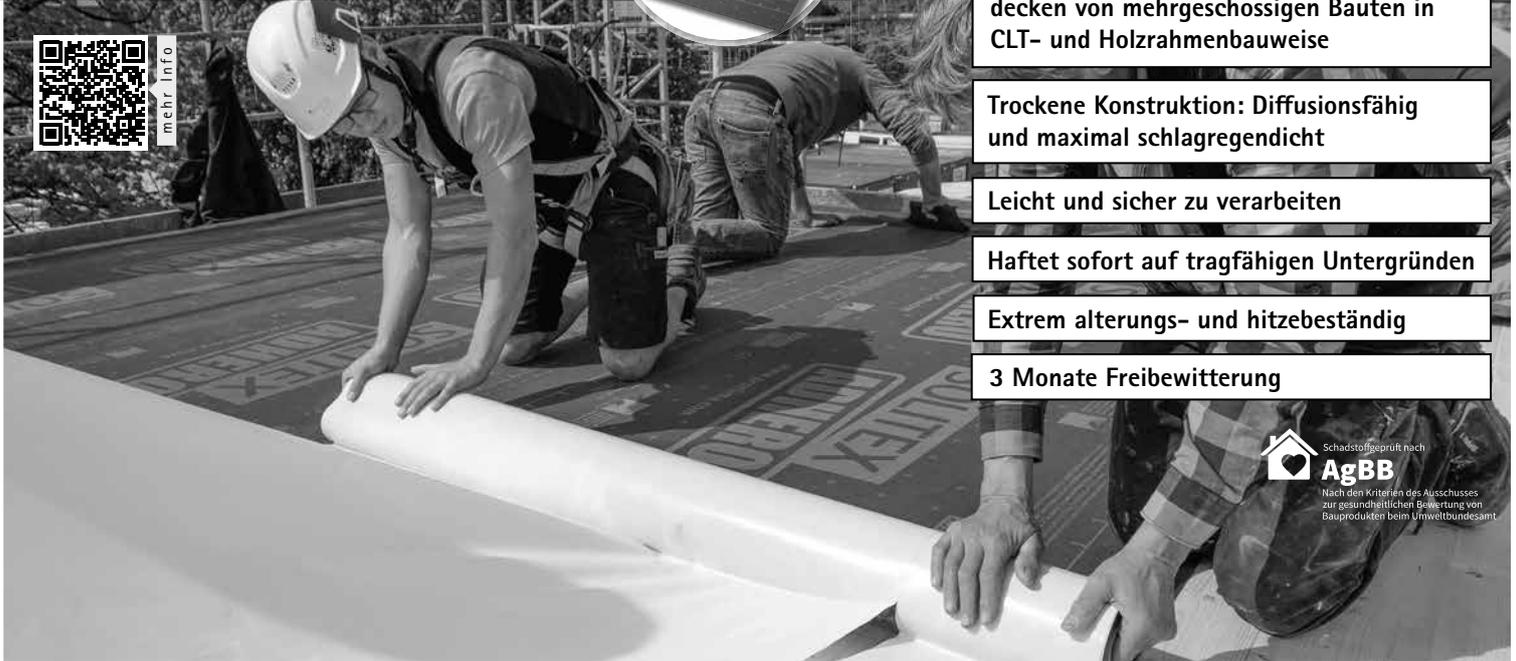
Beste Schutz vor Bauschäden und Schimmel

SOLITEX® ADHERO

Vollflächig klebende, diffusionsoffene
Luftdichtungs- und Witterungsschutzbahn



mehr info



Ermöglicht Herstellung der Luftdichtheit
auf Holzwerkstoffen und mineralischen
Untergründen

Temporärer Bauzeitenschutz auf Zwischen-
decken von mehrgeschossigen Bauten in
CLT- und Holzrahmenbauweise

Trockene Konstruktion: Diffusionsfähig
und maximal schlagregendicht

Leicht und sicher zu verarbeiten

Haftet sofort auf tragfähigen Untergründen

Extrem alterungs- und hitzebeständig

3 Monate Freibewitterung



AEROSANA® VISCONN

Sprühbare Luftdichtung mit
feuchtevariablem s_d -Wert



mehr info



Einfach aufsprühen

Fläche und Details

Holzbau, Mauerwerk, Beton

Übergänge schneller dicht



Planungshandbuch pro clima WISSEN
Kostenfrei anfordern
proclima.de/wissen

Fokus

Qualität & Innovation

**HASSLACHER
NORICA TIMBER**

From **wood** to **wonders**.

Führender Lieferant
von Systemlösungen
für den modernen Holzbau.

hasslacher.com

LUFT, WIND ODER REGEN? KEIN PROBLEM!

Unsere Lösungen schützen
die gesamte Gebäudehülle



Für weitere Informationen:
www.rothoblaas.de

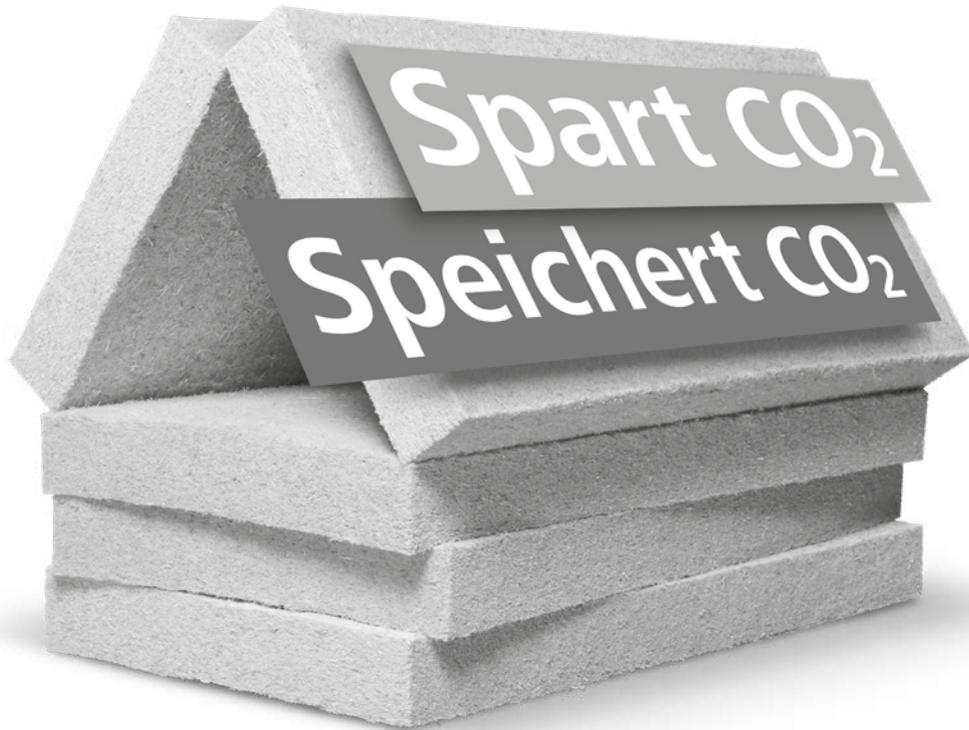


rothoblaas

Solutions for Building Technology

STEICOflex

Die Klimadämmung



www.steico.com/flex

Natürlich dämmen mit Holzfaser

Gebäude werden zu großen Kohlenstoffspeichern

In Holzfasern sind große Mengen CO₂ gespeichert. Denn bei seinem Wachstum setzt ein Baum kein CO₂ frei, sondern bindet große Mengen CO₂. Wird sein Holz stofflich genutzt, so bleibt es gespeichert. 85 kg CO₂-Äquivalent pro m³ speichert die STEICOflex 036. Das macht sich in der CO₂-Bilanz eines Gebäudes stark bemerkbar.

Holz stammt aus nachhaltiger Forstwirtschaft

Nachhaltig bewirtschaftete Wälder ergänzen die CO₂-Speicherung von Holz zu einer hochwirksamen Klimaschutzstrategie: Junge Bäume ersetzen die geernteten und binden neues CO₂. Deshalb stammt das Holz zur Herstellung der STEICOflex 036 ausschließlich aus FSC- und PEFC-zertifizierter Forstwirtschaft.

Wärmespeicherung schützt vor Überhitzung

Aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherefähigkeit schützt die STEICOflex 036 an sonnigen Sommertagen vor Überhitzung des Gebäudes. Denn die von außen in die Dämmschicht eindringende Hitze kann nur sehr langsam vordringen. Wenn es draußen Nacht und kühl wird, fließt die gespeicherte Hitze größtenteils wieder nach außen zurück und strahlt ab.

Schützt die Konstruktion

Die STEICOflex 036 ist zum einen diffusionsoffen und kann zum anderen viel Feuchte aufnehmen, zwischenspeichern und wieder abgeben, ohne dass sich ihre Dämmfähigkeit dabei groß ändert. Dadurch bleiben Dämmschicht und Konstruktion länger trocken – und das ist die beste Garantie gegen Feuchteschäden und für ein langes Gebäudeleben.

Gesundes Raumklima wird unterstützt

Die Diffusionsoffenheit und Feuchtespeicherfähigkeit der STEICOflex 036 gleicht Feuchtespitzen in der Raumluft aus und unterstützt ein angenehmes, gesundes Raumklima. Zudem ist die STEICOflex 036 aus frischem Nadelholz hergestellt und enthält keine bedenklichen Zusatzstoffe. Das Institut für Baubiologie Rosenheim (IBR) empfiehlt sie.

Jetzt Gratismuster bestellen



λ_D 0,036 Niedrigste Wärmeleitfähigkeit unter den Naturdämmstoffen



NOVATOP SYSTEM

Hochentwickelte Technologie
Schweizerisches Know-how
Kluge und effiziente
Verwendung vom Holz
Flexibilität und Individualität
Einstellung Sichtholz
im Innenbereich



NOVATOP ACOUSTIC



NOVATOP SWP



Gemeinsam stärker – mit Collano

Collano entwickelt clevere Systeme, neue Lösungen und Produkte für aussergewöhnliche Klebstoff-Verbindungen. Mit profunder Kenntnis verschiedenster Substrate und Hybridwerkstoffe sowie einem speziellen Fokus auf den modernen Holzbau eröffnet Collano dem Baugewerbe die ganze Breite an Klebeverbindungen.

www.collano.com



Collano AG

Neulandstrasse 3
CH-6203 Sempach Station
Switzerland

T +41 41 469 92 75

info@collano.com

www.collano.com



Alles in einem Element:



Statik - tragend



Schallschutz



Feuerwiderstand 90 min



Raumakustik



Ästhetik



Wärmeschutz



Ökologie



Top-Beratung

Interessiert?

Kontaktieren Sie unser
Beratungsteam:

+41 71 353 04 10
beratung@lignatur.ch



Erfahren Sie mehr unter:

www.lignatur.ch

Pitzl

Ihr innovativer Experte im Bereich Schallschutz



Innovative Holzverbindingssysteme für höchste Ansprüche.

Pfostenträger | Verbinder | Balkonsäulen | Zaunsäulen | Werkzeuge | Schallschutz

Pitzl Metallbau GmbH & Co. KG
Siemensstraße 26, 84051 Altheim
Telefon: +49 8703 93460
www.pitzl-connectors.com



**NEU**

Wetguard: Transparente Feuchteschutz- Membrane von SIGA

SIGA Wetguard ist die neue vollflächig selbstklebende Feuchteschutz-Membrane und kann bereits werkseitig, in der Vorfertigung, oder auf der Baustelle montiert werden.

SIGA Wetguard 200 SA schützt vorgefertigte Holzelemente zuverlässig vor Feuchtigkeit und Beschädigungen während Lagerung, Transport, Montage und der Bauphase und verhindert damit Feuchteschäden wie Verfärbungen im Sichtbereich oder Spannungen und Massungenauigkeiten durch Aufquellen der Elemente.

Über Wetguard

SIGA Wetguard ist diffusionsfähig und mit einer rutschfesten und wasserdichten Spezialbeschichtung ausgerüstet. Das robuste Vlies schützt vor mechanischer Beschädigung und der vollflächig aufgebrachte SIGA-Hochleistungsklebstoff sorgt für sichere Haftung auf Holzoberflächen. Mit der transparenten Optik von SIGA Wetguard bleiben nicht nur

im Werk angebrachte Markierungen oder Durchdringungen sichtbar, sondern auch die charakteristische Oberflächenstruktur des Werkstoffes Holz.

Die Folie ist robust gegenüber mechanischer Belastung und auch bei Nässe rutschfest. Der formstabile Träger ermöglicht einfaches, schnelles und faltenfreies Verlegen und ist sofort dicht verklebt. SIGA Wetguard ist in drei Produktdimensionen (1560mm / 780mm / 390mm x 50m) erhältlich. Für spezielle Anwendungen können nach Kundenwunsch verschiedene Dimensionen und Ausführungen hergestellt werden.

SIGA Wetguard sorgt für maximale Sicherheit über den gesamten Bauablauf und erspart dem Handwerker zusätzliche Arbeitsschritte und Zeit. Damit ist sie die ideale Abdichtung während der Bauzeit, ob für einfache oder herausfordernde Holzbauprojekte.

ISOVER
SAINT-GOBAIN

Rigips
SAINT-GOBAIN

Besser im System: ULTIMATE und Rigidur H Gipsfaserplatten - zwei starke Partner im Holzbau

- innovative leichte Dämm- und Beplankungslösungen
- sichere, geprüfte und schlanke Konstruktionen
- für optimal kombinierten Wärme-, Schall- und Brandschutz sowie
- hohe mechanische und optische Anforderungen



www.holzbau.saint-gobain.de


SAINT-GOBAIN

best wood®
SCHNEIDER

DAS DECKENSYSTEM FÜR DEN MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAU

Profitieren Sie von den hervorragenden und geprüften Eigenschaften unserer »best wood **CLT BOX – DECKE FS**«

- erhöhter **Schallschutz** auch im tieffrequenten Bereich
- Brandschutz bis **F90/REI90**
- **inklusive** Holzfaser-Akustikplatte und Schüttung
- **hohe statische** Tragfähigkeit
- **große Spannweiten** möglich

Interessiert?
Wir freuen uns Sie
persönlich an unserem
Stand begrüßen
zu dürfen.





Die isofloc AG aus der Schweiz, die 1980 gegründet wurde, ist Produzentin und Anbieterin des nachhaltigsten Dämmprodukts im In- und Ausland. Knapp 35 Jahre Erfahrung und Wissen in der Produktion und der Verarbeitung von einblasbaren Dämmstoffen haben das Dämmsystem der isofloc AG perfektioniert. Zellulosedämmung ist ein Up-Cycling-Produkt. Anstelle von kurzlebigen Zeitungen entsteht ein langlebiger Dämmstoff mit vielen positiven bauphysikalischen Eigenschaften. Der dafür benötigte Energieaufwand für die Herstellung ist marginal. Dementsprechend sind die energetischen Amortisationszeiten sehr kurz und die CO²-Bilanz positiv.

Zellulosefasern basieren letztendlich über den Umweg Papier auf Holz. Dieses bindet beim Wachsen CO² – durch die Nutzung als Dämmstoff wird diese Bindung enorm verlängert und zusätzlich im Gebäude Energie eingespart.

Am meisten punktet das Material in der Ökobilanz: Kein Dämmstoff weist einen grösseren Recycling- und einen geringeren Primärenergieanteil auf,

was ihn zum nachhaltigsten aller Isolierstoffe im Gebäudebereich macht. Da der Auffaserungsprozess sehr einfach ist und Papier keinen grossen Widerstand entwickelt, braucht es für die Herstellung wenig Energie.

Technisch ebenfalls auf höchstem Niveau ist das industrielle Dämmsystem easyfloc – Dämmstoff und Einblas-technik sind optimal aufeinander abgestimmt. Die Vorzüge der einblasbaren Dämmstoffe kommen dadurch voll zum Tragen. easyfloc im Vorfertigungsprozess bei Holzbaubetrieben ermöglicht neben einer Qualitätssteigerung im Bereich der Dämmung auch eine deutliche Effizienzverbesserung. Mit isofloc hat ein Holzbauunternehmen zuverlässige Partner an der Seite, die auf über 30 Jahre Know-how zurückgreifen.

Die isofloc Zellulose ist FSC®, natureplus- und Swiss-Label-zertifiziert.



Das Zeichen für verantwortungsvolle Waldwirtschaft



Weitere Informationen:

isofloc AG
Telefon: +41 71 3139100
Telefax: +41 71 3139109
E-Mail: info@isofloc.swiss
Internet: www.isofloc.swiss

isofloc®





GEBÜNDELTE HOLZBAU-KOMPETENZ

Innovative Holzbau-Systeme aus einer Hand

Die Unternehmen der Knauf Gruppe bündeln ihre individuellen Kompetenzen, um sowohl kleinen Zimmereien als auch großen Holzbaubetrieben und Fertighausanbietern aufeinander abgestimmte und geprüfte Lösungen aus einer Hand bieten zu können.

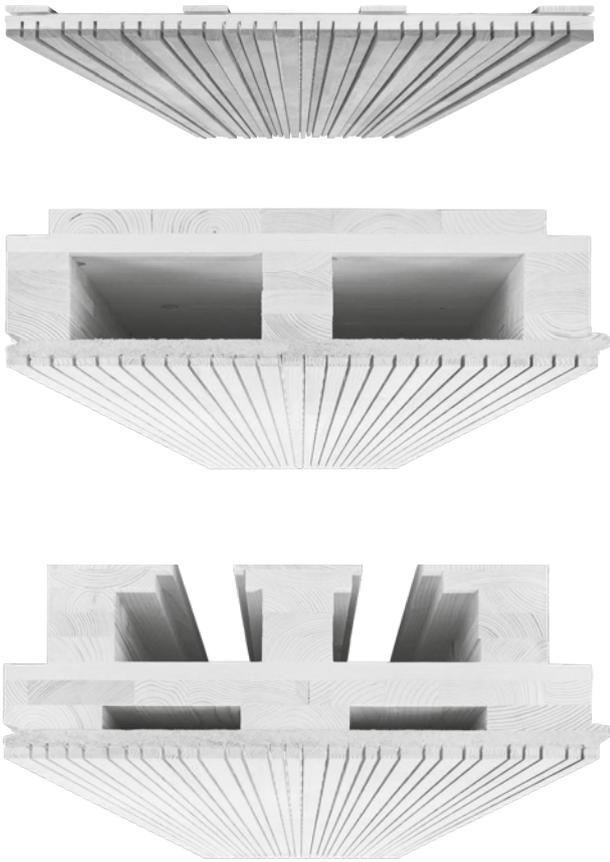
So sorgen wir für Planbarkeit, Zuverlässigkeit und Ausführungssicherheit – sowohl auf der Baustelle als auch im seriellen Fertigungsprozess – und bieten Ihnen mit unserem auf den Holzbau spezialisierten Vertriebsteam persönlichen Kontakt auf Augenhöhe.

www.knauf-holzbau.de

KNAUF

LIGNO® – Konfigurierbares Brettsperrholz

Decken-, Dach- und Wandbauteile,
Echtholz-Akustikpaneele.



Installationen

Oberseitige Leitungsführung:
längs und/oder quer



Dämmung

Erhöhter Schallschutz – auch tiefrequent,
integrierte Wärmedämmung



Brandschutz

Feuerwiderstand bis REI 90,
Entflammbarkeit bis B-s1-d0



Tragfähigkeit

Variable Steghöhen für Spannweiten bis 18m,
Statik mit Schwingungsnachweis



Raumakustik

Integrierter Akustikabsorber
aus natürlicher Holzfaser



Installationsraum / Zusatzabsorber

Unterseitige Leitungsführung
und optionaler Zusatzabsorber



Sichtoberflächen

Echtholz-Oberflächen – geschlossen
und in verschiedenen Profilierungen



Baubiologie

natureplus®-zertifizierte
gesundheitliche Unbedenklichkeit

LIGNO ■ TREND®

Für eine nachhaltige Holz-Baukultur.

Landstraße 25 | 79809 Weilheim | Deutschland
Tel.: +49 (0) 7755-9200-0 | Fax: -55
E-Mail: info@lignotrend.com

Konfigurieren Sie das individuelle
Element für Ihr Projekt selbst:
www.lignotrend.com/konfigurator





PRÄZISE und MASSIV



SWISS KRONO **MAGNUMBOARD®** OSB

- ✓ Das massive Holzbausystem für schnelles, ökologisches Bauen
- ✓ Großformatige, fugenfreie und direkt beschichtbare Elemente

swisskrono.com/de



HOHER VORFERTIGUNGSGRAD

- ✓ Präzises Fräsen von Installationskanälen
- ✓ Individuelle, rasterlose Vorfertigung
- ✓ Neue geprüfte Schall- und Brandschutzaufbauten im Timberplanner

timberplanner.com

Made in Austria



AIR FIRE TECH

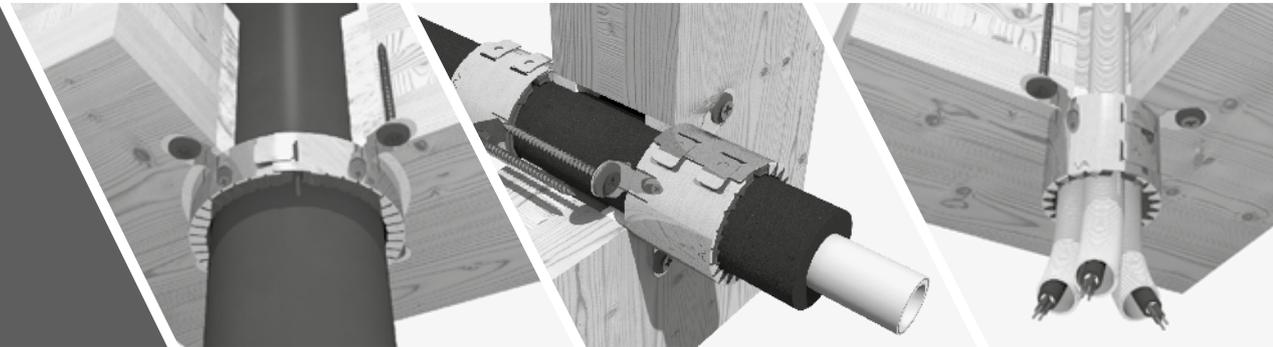
Brandschutz kennt keine Kompromisse



Abschottungen für den Holzbau – *Sealings for timber construction*

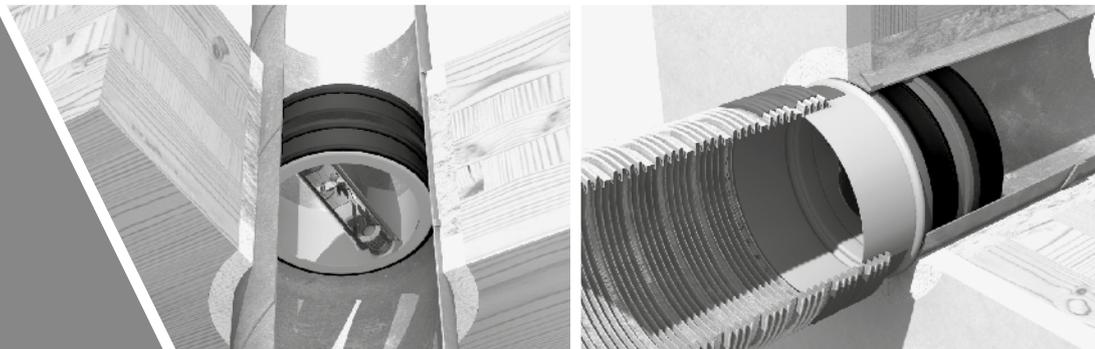
Sanitär
Heizung
Elektro

*Plumbing
Heating
Electrics*



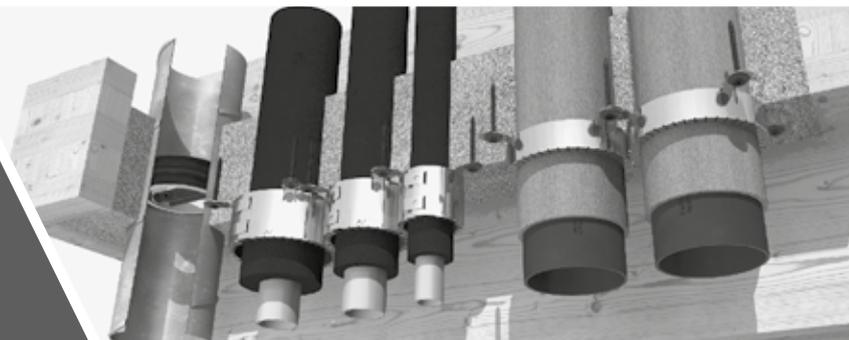
Lüftung

Ventilation



TIROTECH® Kombischott

TIROTECH® Combination seal



www.airfiretech.at

RAUMKLANG IN PERFEKTION.

Wir bieten Ihnen:
**Akustiklösungen für den
hochwertigen Innenausbau.**

Überzeugen Sie sich selbst:
www.akustik-plus.com



akustik*plus*



Mit persönlicher Leidenschaft und jahrzehntelanger Expertise entwickeln und produzieren wir mit und für unsere Kunden die passende akustische Lösung aus dem nachhaltigen Material Holz.

Immer mit höchstem ästhetischen Anspruch, bester Qualität und persönlicher Beratung."

alwitra^a

Lupendicht.

**Wie nah Sie auch ran gehen,
Sie sehen nur eins.**

100 % lupendichte Nahtverbindung.

**EVALASTIC[®] ist die einzige homogen
verschweißbare EPDM-Dachbahn.**

**100 % frei von Bitumen, Weichmachern, PVC, Chlor.
So wird ein EPDM-Dach 100 %ig dicht!**

Mehr erfahren Sie unter: www.lupendicht.de

Jetzt auch in
neuer Farbe
schiefergrau
matt

Optimale Schalldämmung im Trockenbau für leichte Holzdecken

Neue Versuchsergebnisse an leichten Holzdecken zeigen das große Potential bei der Schalldämmung, welches über reine Trockenbaulösungen erreicht werden kann.

Im Laborversuch wurde mit einem punktuell elastisch gelagerten Trockenestrich und einer elastisch abgehängten Unterdecke eine Verbesserung im **Trittschall von 32dB** und im **Luftschall von 26dB** gemessen.

Als Bodenlagerung wurden die neuen **AMC Akustik Floor Mounts** verwendet, als Unterdeckenabhängiger die **AMC Akustik Super T-60**. Bei beiden Produkten kommt als Elastomer ein auf die jeweilige Belastung abgestimmtes Sylomer® zum Einsatz, wodurch sehr tiefe Eigenfrequenzen im Bereich von ca. 10Hz entstehen.

Bodenlagerung:

AMC-Akustik Floor Mount

(Min. Eigenfrequenz: 10Hz)



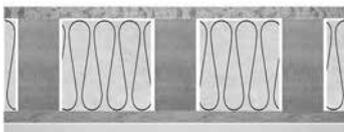
Unterdeckenabhängiger:

AMC-Akustik Super T-60 Nonius

(Min. Eigenfrequenz: 7Hz)

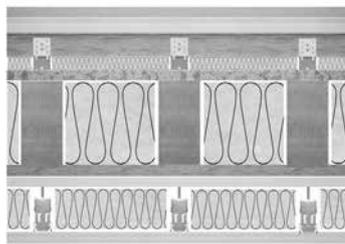


Referenzaufbau **R**



- 22mm Spanplatte
- 120x180 mm Holzbalken (100mm Mineralwolle)
- 24 mm Holzlatten
- Gipskartonplatte
- Gewicht/m²: 45,5kg

Schalltechnisch optimierte Trockenbaulösung **S**

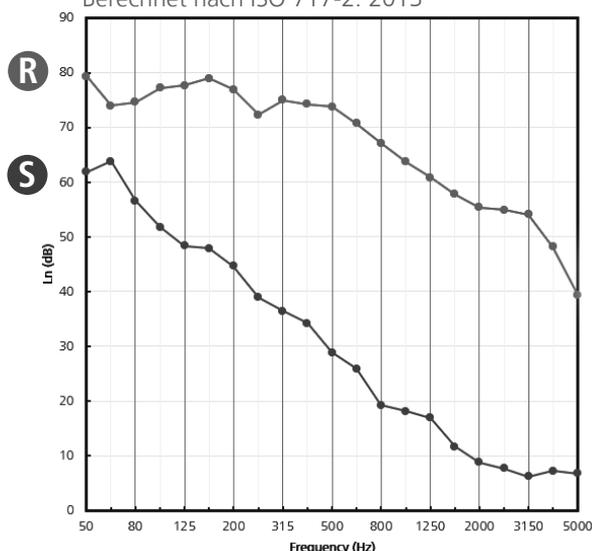


- Rigidur H13 BR - 13mm (Zementplatte)
- Rigidur 20mm
- 50mm Holzlatten (+Mineralwolle)
- AMC-Akustik + Sylomer® Floor Mount 25
- 22mm Spanplatte
- 120x180 mm Holzbalken (100mm Mineralwolle)
- 24 mm Holzlatten + 1 Gipskartonplatte
- AMC-Akustik + Sylomer® Super T60 Unterdeckenabhängiger (280mm Hohlraum mit 90mm Mineralwolle)
- 2 GKP mit 12,5mm

Versuchsergebnisse

ERGEBNISSE TRITTSCHALL

Berechnet nach ISO 717-2: 2013

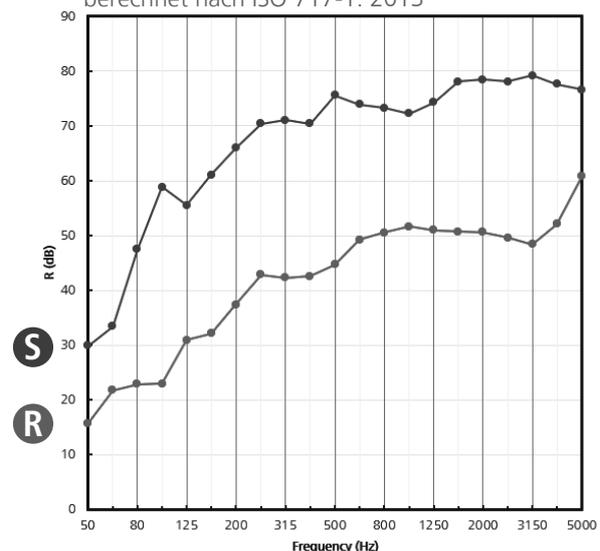


R 70,6 (0) dB

S 38,3 (2) dB

ERGEBNISSE LUFTSCHALL

berechnet nach ISO 717-1: 2013



R 48 (-2;-7) dB

S 74 (-2;-7) dB

Die genauen Prüfberichte als auch detaillierte Informationen zu den verwendeten Produkten finden Sie unter www.akustik.com/de-DE

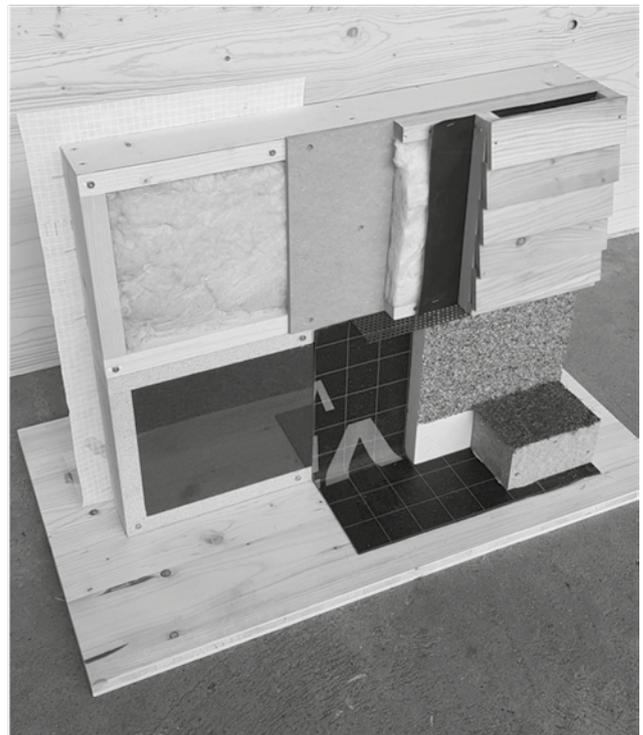
Eberl Thermosockel – die erste normgerechte Sockellösung im Holzbau

Erstmals gibt es eine Lösung für den Sockelbereich von Holzhäusern: der patentierte „Eberl Thermosockel“, 16 und 20cm breit. Der Thermosockel erfüllt gleichzeitig vier Normen: Die Önormen B 2320, B 3691, B 3692 und B 1600. Das patentierte Produkt löst so das bislang bestehende Problem, dass Holz nicht unter Niveau verbaut werden darf. Damit ist der Sockel die ideale Lösung für das europäische Klima.

Der Eberl Thermosockel besteht aus zwei Recyclingdämmstoffen. Das tragende „Gerüst“ besteht aus Purenit, einem hochverdichteten Funktionswerkstoff auf PUR-Hartschaumbasis mit hohem Wärmedämmwert. Dieses Wandelement wird dann mit thermisch bearbeitetem Altglas ausgefüllt, z.B. Foamglas.

Da das tragende Material selbst Dämmmaterial ist, werden Wärmebrücken verhindert, gleichzeitig kann es durch die dichte Pressung auch statische Funktion übernehmen. Es ist feuchteunempfindlich, dauerhaft und einfach in der Bearbeitung. Die Abdichtung mit allen gängigen Dichtstoffen und Elastomer-Bitumenbahnen ist möglich. Auch kann durch den Einbau des Sockelelements die Barrierefreiheit erfüllt werden. Die Elemente werden in der Regel im Produktionsprozess direkt als „Wandfuß“ an die Riegelwand montiert. Weiters ist es möglich, die Elemente für Brettsper Holz wände als Sockel vorweg direkt auf der Baustelle zu versetzen.

In enger Zusammenarbeit mit mehreren Forschungseinrichtungen wurde durch Prüfungen wie bauphysikalische Untersuchungen, statische und Schallschutzprüfungen etc. nachgewiesen, dass der Eberl Thermosockel all diesen Anforderungen entspricht. Er bietet Holzbaubetrieben und Holzhausherstellern einen Wettbewerbsvorteil, zumal es bis heute keine vergleichbare Lösung am Markt gibt. Für sämtliche Infos hinsichtlich Anwendung und Verfügbarkeit steht die Bautechnik Eberl GmbH unter info@thermosockel.at oder +43 664 13 28 524 zur Verfügung. Weitere Daten finden Sie auch unter www.thermosockel.at



Muster Thermosockel
Bildrechte: Bautechnik Eberl GmbH



Deutscher
Holzfertigbau-
Verband e.V.

Bauen
mit Holz:

**Gemeinsam
MEHR erreichen.**

► Werden Sie jetzt
Mitglied im DHV
www.d-h-v.de

Immer eine **STARKE VERBINDUNG**

SYSTEMINNENECKE CLT

Eines unserer neuen Produkte ist die Systeminnenecke CLT. In Kombination angewendet ermöglicht sie eine starke Verbindung von Wandknotenpunkten. Zudem ist die Systeminnenecke eine unschlagbare Lösung für Holz – Holz Verbindungen.



Anwendungsbeispiel der Systeminnenecke CLT mit der KonstruX

KONSTRUX VOLLGEWINDESCHRAUBEN

KonstruX Vollgewindeschrauben maximieren die Tragfähigkeit einer Verbindung durch den hohen Gewindeausziehewiderstand in beiden Bauteilen. Beim Einsatz von Teilgewindeschrauben begrenzt der wesentlich geringere Kopfdurchziehewiderstand im Anbauteil die Tragfähigkeit der Verbindung.



KonstruX, Senkkopf verzinkt

HEBEANKER HEBE**FIX** & KUGELTRAGBOLZEN

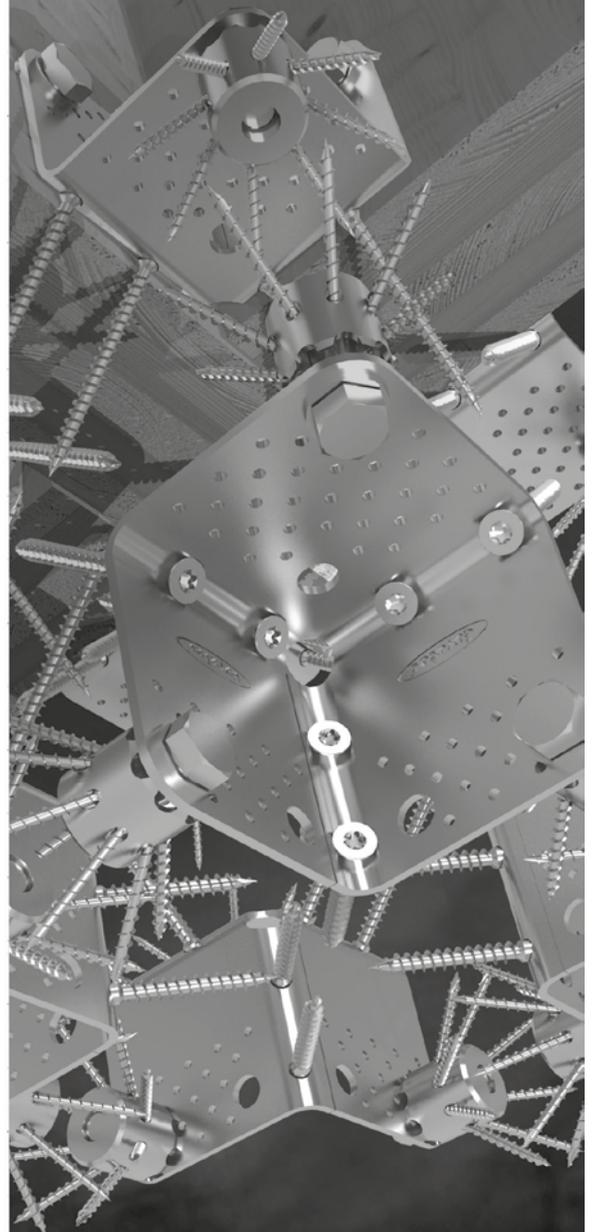
Für die Anwendung mit einem Kugeltragbolzen wurde der ausgeklügelte Hebe**Fix** konzipiert. Vorgefertigte Wandelemente können problemlos mit dem Hebeanker angehoben und transportiert werden. Die Verwendung mit Schrauben erlaubt es den Hebeanker mehrfach einzusetzen.



Anwendungsbeispiel für den Hebe**Fix** in Kombination mit dem Kugeltragbolzen

Eurotec®

Der Spezialist für Befestigungstechnik



Erfahren Sie mehr über
unseren Ingenieurholzbau!



FunderPlan – Ökologische Holzfaserplatte für raumseitige Beplankung im Holzbau

Jetzt neu: FunderPlan Verlegeplatte

- rundum laufende Nut/Feder
- formschlüssige fugenlose Verbindung
- schnelles Endlosverlegen
- „fliegende Stöße“ realisierbar
- auch für Feuchtebereich geeignet
- auf Wohngesundheit geprüft
- Wohnraumgewinn durch schlanken Aufbau
- Kleinformatig für bauseitige Beplankung

Fundermax GmbH
Mobil: +49 (0) 151 558 70 545
thomas.graf@fundermax.biz
www.fundermax.at

For you to create

Fundermax





Innovativer Schallschutz
mit Syldyn® für den Holzbau
Flankenschallentkopplung

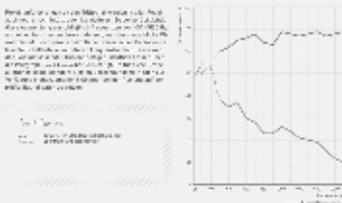


Neuer
technischer
Katalog



Tiefrequenter Trittschall

Reduzierung des tiefen Frequenz Trittschalls

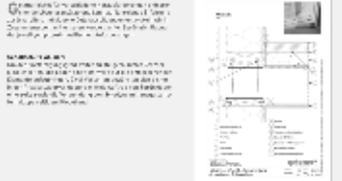


Flankenübertragungswege



Text describing flanking transmission paths and technical specifications.

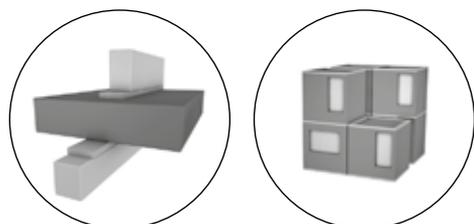
Detailausbildungen



Katalog - Decken

Innovativer Schallschutz für den Holzbau

Die Vorteile der Leichtbauweise des zukunftssträchtigen Holzbaus machen Lärmschutz zur Herausforderung der Bauakustik. In unserem neuen Katalog finden Sie detaillierte Informationen zu den wichtigsten Kenngrößen (Stoßstellendämmmaß Kij), Produktinformationen zu Syldyn®, Installationsanleitungen, Konstruktionsregeln und vieles mehr.



Getzner Werkstoffe GmbH

Herrenau 5
6706 Bürs
Österreich
T +43-5552-201-0
F +43-5552-201-1899
info.buers@getzner.com



getzner
engineering a quiet future

GUTEX PYRORESIST

für den mehrgeschossigen Wohnungsbau
und die urbane Nachverdichtung



Ökologische Dämmstoffe aus Holz.

Holzfaserdämmplatten sind leistungsstarke Dämmstoffe mit vielen positiven Eigenschaften, für die aber bisher galt: Sie glimmen und schwelen. Ganz anders die Innovation GUTEX Pyroresist: Unsere neu entwickelte Produktlinie ist nach DIN EN 13501-1 nicht nur schwerentflammbar (Baustoffklasse C), sondern auch nicht glimmend nach DIN EN 16733. Somit vergrößert GUTEX die Einsatzmöglichkeiten von Holzfaserdämmplatten in Bauteilkonstruktionen enorm!

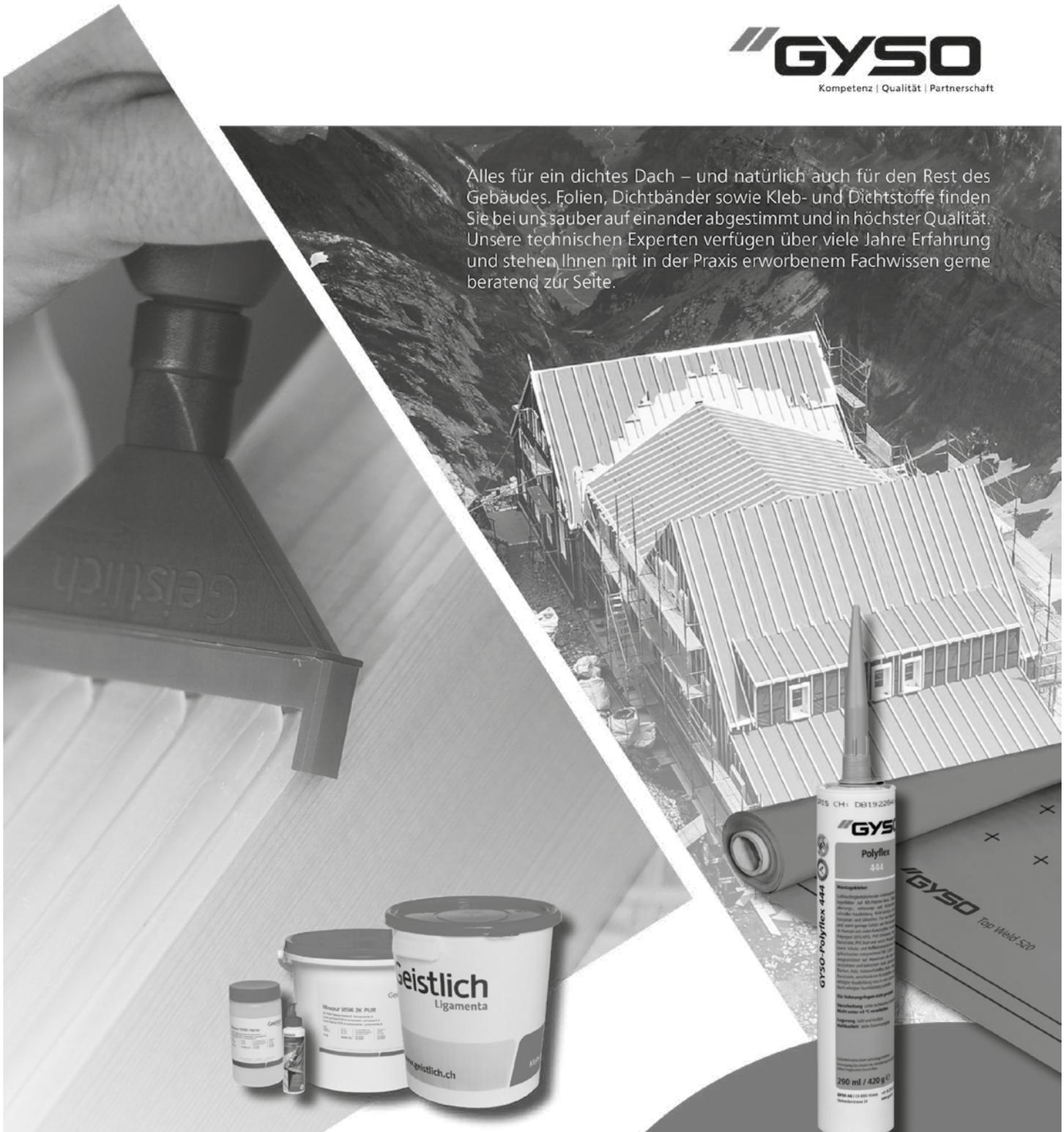
Erfahren Sie mehr unter www.pyroresist.de

GUTEX Holzfaserplattenwerk

Gutenberg 5 | D-79761 Waldshut-Tiengen | Telefon: + 49 7741 6099-0 | info@gutex.de

 **GUTEX**[®]
DÄMPLATTEN AUS SCHWARZWALDHOLZ

Alles für ein dichtes Dach – und natürlich auch für den Rest des Gebäudes. Folien, Dichtbänder sowie Kleb- und Dichtstoffe finden Sie bei uns sauber auf einander abgestimmt und in höchster Qualität. Unsere technischen Experten verfügen über viele Jahre Erfahrung und stehen Ihnen mit in der Praxis erworbenem Fachwissen gerne beratend zur Seite.

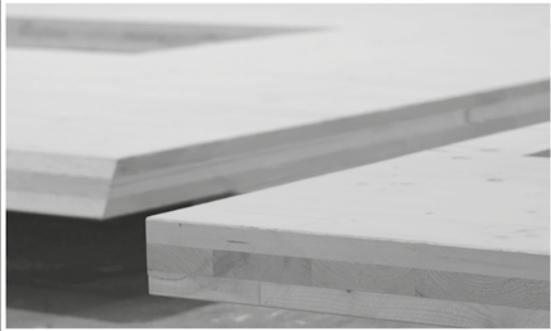


Geistlich Ligamenta

Für eine sichere Verklebung von Holz und Holzwerkstoffen. Die Klebstoffe von Geistlich Ligamenta sind seit Jahrzehnten in der Holzbau-Branche gleichermassen bekannt wie bewährt und ergänzen das Produkt-Portfolio von GYSO ideal.



www.hbs-berga.de



HBS

B E R G A

Bausysteme aus Holz

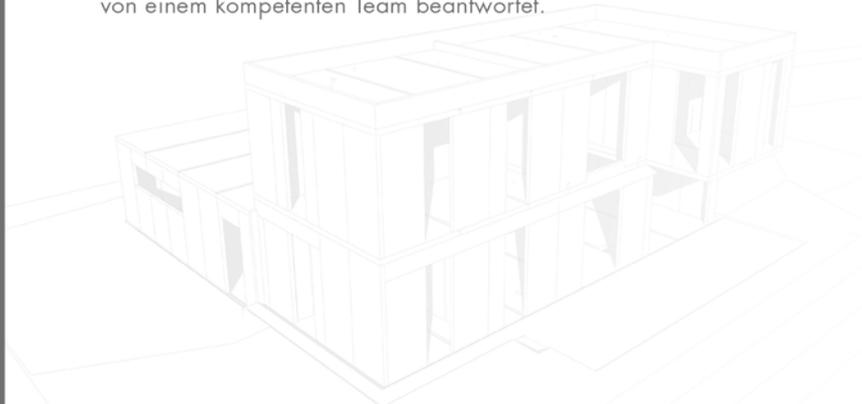
- **Dach-/ Wand- und Deckenkonstruktionen**
- **Modernste CNC-Maschinen und Fertigungsprozesse**
- **Beratung und Unterstützung für Architekten, Planer und Holzbaubetriebe bei individuellen Projekten**

Als Hersteller von Brettsperrholz bietet HBS Berga großformatige Massivholzelemente welche als Wand-, Decken- und Dachbauteile eingesetzt werden können.

Diese Bauteile sind standardmäßig in den Abmessungen von 3,50 m x 16,00 m herstellbar, Überlängen sind auf Anfrage möglich. Die Bauteilstärken liegen zwischen 60 mm und 280 mm, i.d.R in 20 mm Schritten. Sonderstärken sind ebenfalls auf Anfrage möglich.

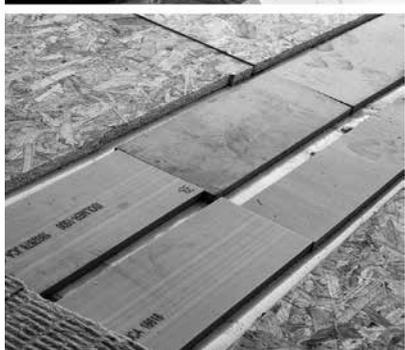
Der montagefertige Zuschnitt der Bauteile erfolgt entsprechend der Kundenvorgaben auf modernen Abbund-CNC-Maschinen. Neben der Herstellung von Brettsperrholz unterstützt HBS-Berga auch bei der Planung von Massivholzgebäuden.

Für die statische Bemessung steht eine Bemessungssoftware zur Verfügung und Fragen zur Konstruktion oder Bauphysik werden von einem kompetenten Team beantwortet.



HBS Berga GmbH & Co. KG
Ahornweg 1 • 06536 Berga
+49 34651 451-0 • info@hbs-berga.de

Solutions against vibrations, shocks and structure-borne noises in timber constructions



Solutions

- Decoupling of flank noise
- Spring bearings for HVAC systems and machines
- Elastic bearings for elements and modules

HBT-ISOL AG
Im Stetterfeld 3
CH-5608 Stetten
T +41 56 648 41 11
www.hbt-isol.com
info@hbt-isol.com

HBT-ISOL GmbH
Waldstr. 63
D-13156 Berlin
T +49 (0)30-97 89 47 07
www.hbt-isol.de
info@hbt-isol.com

HELLA

Jalousien. Markisen. Rollläden.

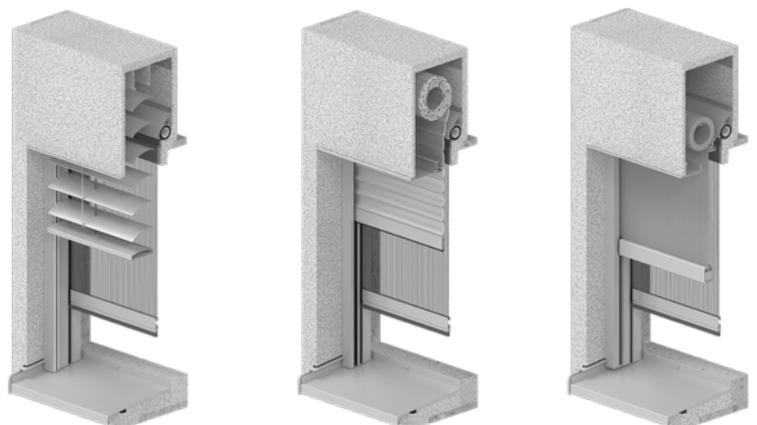


EINFACH PERFECT INTEGRIERT

HELLA TRAV®Integral

Ob Sonnenschutz, Insektenschutz oder Anschlussprodukte, HELLA TRAV®Integral ist die perfekte Lösung speziell für den Holzbau. In die Wandöffnung wird ein fertiger Baukasten eingesetzt, der das Fenster und den Sonnenschutz nahtlos integriert. Wärmebrücken, Wassereintritt, Putzrisse und andere Konstruktionsfehler sind dabei praktisch ausgeschlossen. Einfach gesagt: das rundum-sorglos-Paket für den Holzbau-Profi.

www.hella.info





KLH®

WIR FREUEN
UNS AUF
IHREN BESUCH
STAND 29

Unser Ansprechpartner für Deutschland:

ABA HOLZ
van Kempen GmbH

ABA HOLZ VAN KEMPEN GMBH
Streitheimer Straße 22 | 86477 Adelsried
info@aba-holz.de | www.aba-holz.de | www.klh.at

- PIONIER IN DER HERSTELLUNG VON BRETTSPERRHOLZ
- MEHR ALS ZWEI JAHRZEHNTE ERFAHRUNG
- DAS ORIGINAL MIT MEHR ALS 38 000 PROJEKTEN WELTWEIT
- INTERNATIONALES PROJEKTMANAGEMENT
- LÖSUNGSORIENTIERTER PROJEKTPARTNER
- VON STATISCHER VORBEMESSUNG BIS ZUR WERKPLANUNG

KLH MASSIVHOLZ GMBH | 8842 Teufenbach-Katsch | Gewerbestraße 4
Tel +43 (0)3588 8835 | office@klh.at | www.klh.at

Alessandra-Chemello - www.orsenigochemello.com | KLH UK, www.klhuk.com | Erich-Cross-Photograph
Dirk-Wilhelmy - www.wilhelmy-fotografie.de | Pedro-Pegenaute - www.pedropegenaute.com | Claas
Peter-Wassnig - www.aags-nig.de | I u S Modulhaus, Arch. Oliver Seindl, www.modulhaus.at | Alex Filz |
(C) J. Konstantinow - KLH, www.klh.at | Rendering, © LSI architects, www.lsiarchitects.com

LIGNOPRO®

Holzbeschichtungen für die industrielle Anwendung

LIGNOPRO® 851

CLT-Varnish UV

Hydrophobe Oberfläche

Optimaler UV-Schutz

Hochwertige Optik

...in einem Arbeitsgang!

Kontakt:

Adam Maciejewski

Verkaufsleiter | Sales Manager

+49 171 23 72 832

a.maciejewski@kochundschulte.de

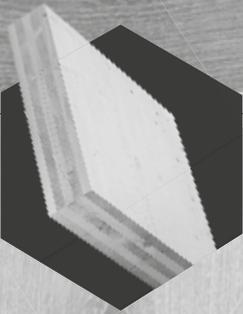
www.kochundschulte.de



LEIDORF
HOLZBAU



EIN VOLLES BRETT AN LEISTUNGEN



CLT

CLT BESCHAFFUNG
MIT KURZER LIEFERZEIT

HOLZBAU PLANUNG

HIGH-TECH ROBOTER ABBUND

EINBAU VON
FENSTERN, GIPSKARTONPLATTEN,
DÄMMUNG, ... IM WERK

LIEFERUNG MIT EIGENEN LKW'S
AUF DIE BAUSTELLE



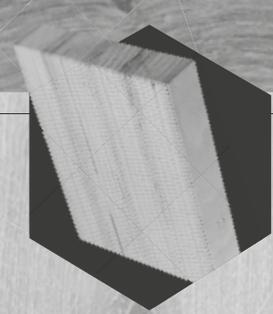
KERTO

WIR SIND PREMIUM-HÄNDLER
FÜR ÖSTERREICH UND
SÜDDEUTSCHLAND

LAGERFORMAT: 2,5 X 13,5 M

ABBUND AUCH GROSSFORMATIGER
PLATTEN

> 3.600 M² KERTO | LVL LAGERND



BAUBUCHE

WIR BEARBEITEN UND
LIEFERN BAUBUCHE
FÜR IHR PROJEKT

INTERESSIERT?

UNVERBINDLICH ANFRAGEN:

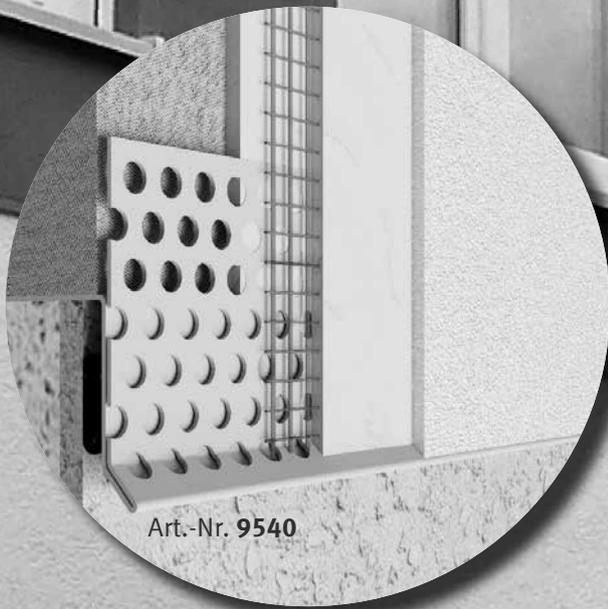
 office@leidorf.com

 +43 681 811 848 77

www.leidorf.com

ÜBERGANG MIT PROFIL

SICHERE LÖSUNGEN BEI DER AUSFÜHRUNG VON GLEITLAGERFUGEN



Wir haben mehrere Lösungen für gleitende Übergänge in PVC oder Aluminium. Gleitlagerfugenprofile als Einschubprofile zur schnellen und optimalen Ausbildung von Gleitlagerfugen - besonders geeignet für Aufstockungen.

- ✓ **Schnelle und einfache Montage**
- ✓ **Optimal geeignet für Aufstockungen ohne Fassadensanierung am Bestand**
- ✓ **Formschöner Übergang mit minimalem Versatz**
- ✓ **Dichter und dauerhafter Übergang**

PROTEKTOR

PUTZPROFILE | TROCKENBAUPROFILE | FASSADENPROFILE
DACHENTWÄSSERUNG | BETON- / ESTRICHPROFILE | BAUCHEMIE

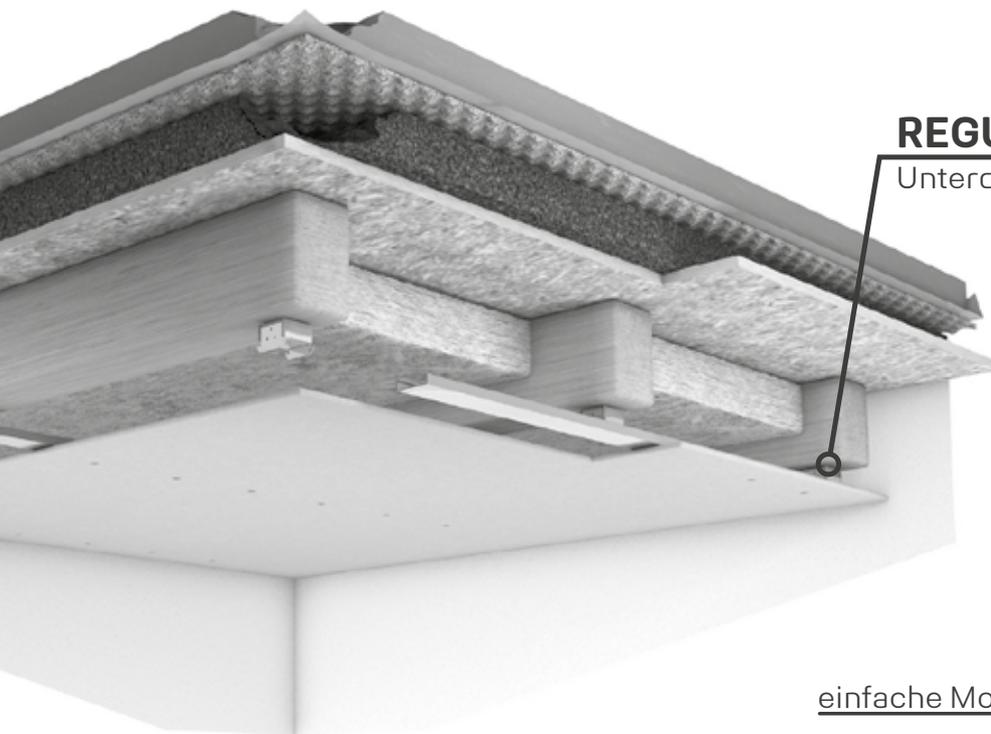
www.protektor.com

Jetzt App laden:
Weitere Infos erhältst Du auf
protektor-loyalty-club.com





KLEINES BAUTEIL GROSSE WIRKUNG



REGUFOLAM hangers

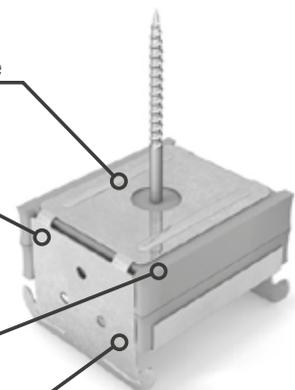
Unterdeckenabhängung

einfache Montage

sicher und tragfähig

verschiedene Belastungsklassen

tieffrequent abstimmbar

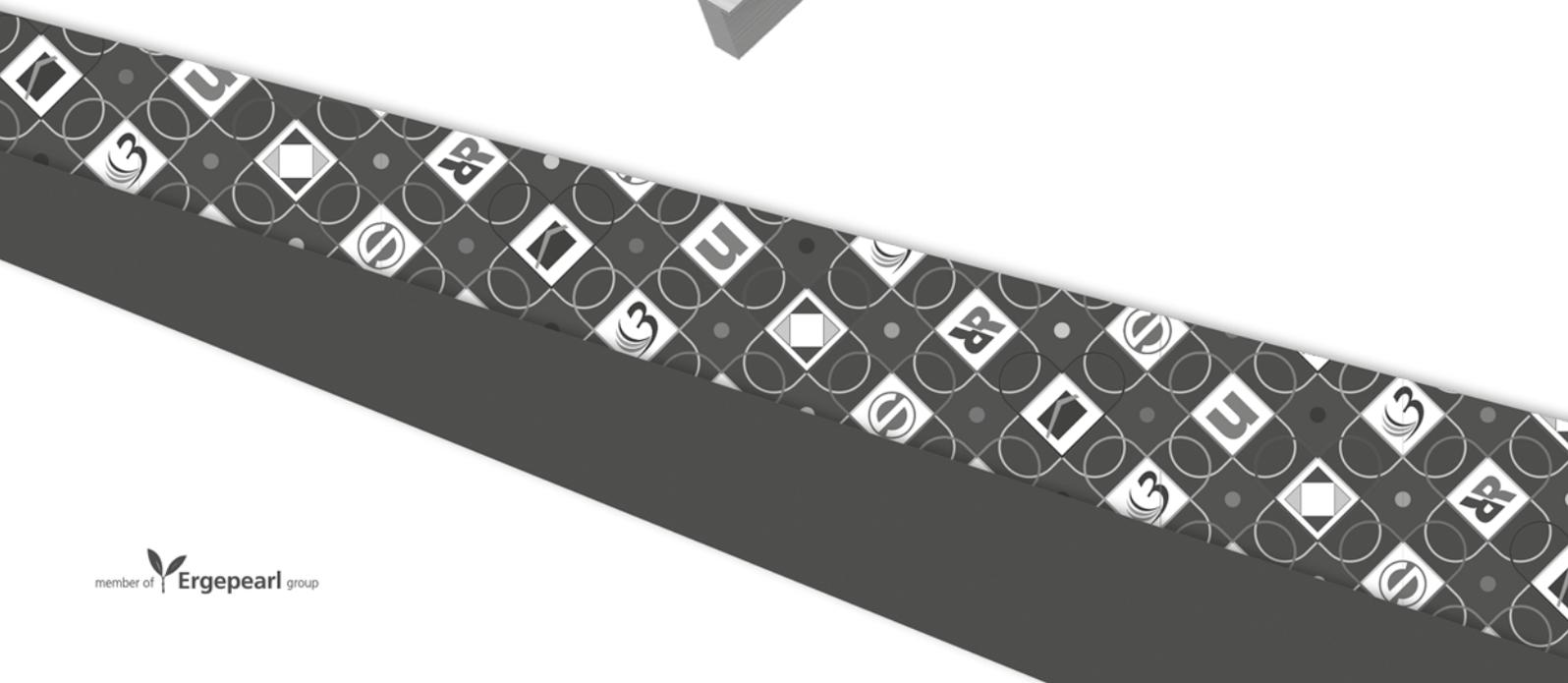
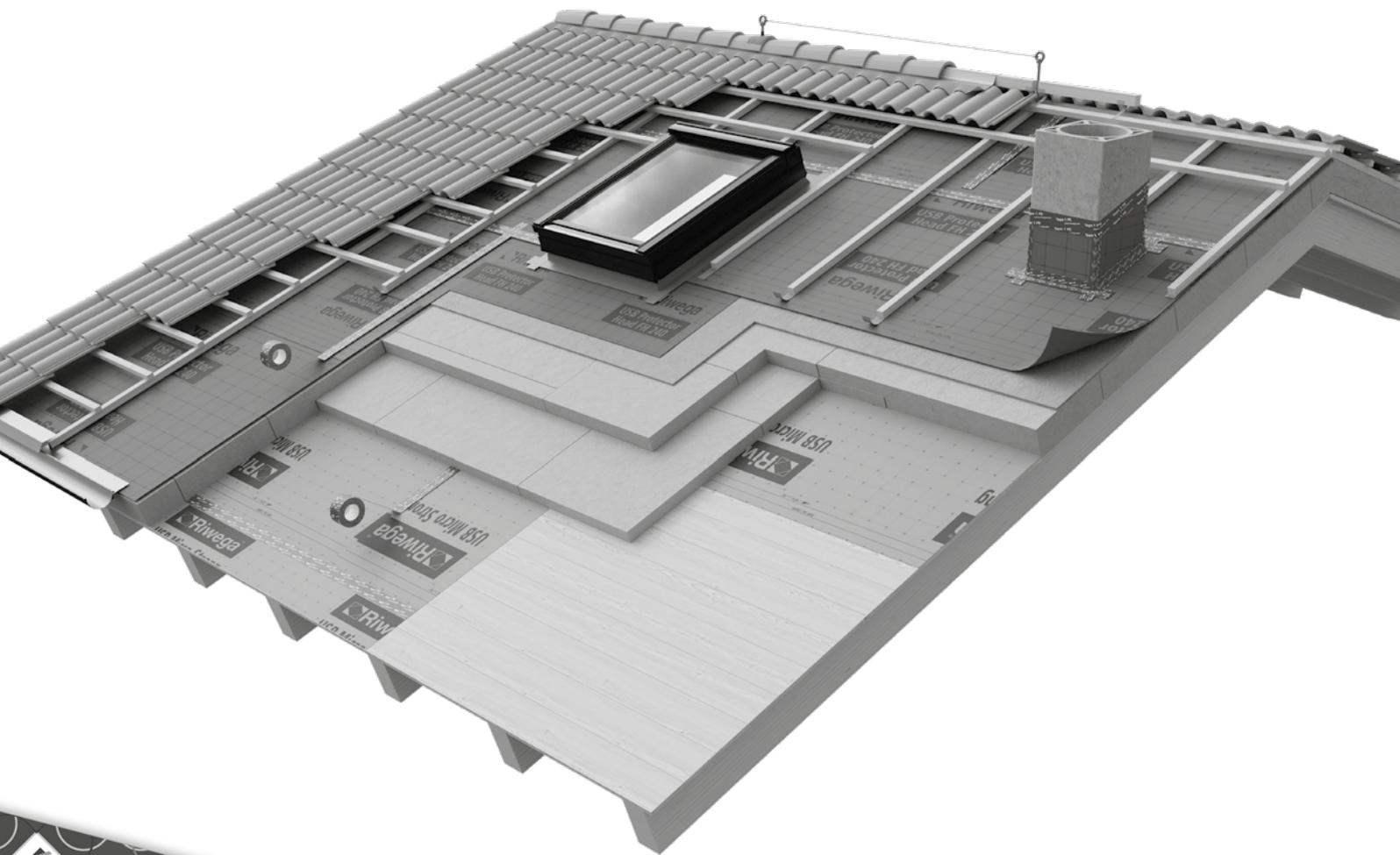


3therm®

Riwega®

RoofRox®

Das Beste für **Dach und Wand!**



FLEXIBLE GLASSFASSADEN

FÜR BALKONE MIT MEHRWERT

Effektiver Schall- und Witterschutz · raumhoch oder auf Brüstung
komplett zu öffnen · individuelle Projektlösungen



TJIKO — EINFACH. ANSPRUCHSVOLL.

Die Tjiko-Systembauweise als Lösungsansatz für schnellen, bezahlbaren Wohnbau.

Tjiko ist ein mittelständisches Unternehmen im Wachstum. Unsere Vision ist es, das Baugewerbe nachhaltig zu verbessern. Durch unsere vorgefertigten, konfigurierbaren Bad-Module machen wir das Bauen einfach, effizient und planbar. Dafür haben wir das Tjiko Bad als fertig anwendbares Produkt entwickelt. Mit geringem Aufwand ist das komplette Thema Badezimmer schon in einer frühen Planungsphase abgehakt!

Die Module werden ab Stückzahl eins und Just-in-time geliefert. Zur Montage müssen sie nur noch mit dem Kran in das Gebäude eingehoben werden. Anschließend erfolgt der bauseitige Anschluss.

Konfigurieren Sie Ihre Badmodule auf Basis unserer Modelle und Designlinien ganz einfach online.



KONTAKT

Tjiko GmbH | Rosenheim
www.tjiko.de
+49 8031 2715370

✉ kontakt@tjiko.de

📷 [@tjikogmbh](https://www.instagram.com/tjikogmbh)

in [Tjiko GmbH](https://www.linkedin.com/company/tjiko-gmbh)

SCHALLDÄMMUNG

FUSSBODENHEIZUNG

TROCKENESTRICH



PhoneStar  Schalldämmplatten

PowerFloor  Fussbodenheizung

PhoneStrip  Entkopplungsstreifen

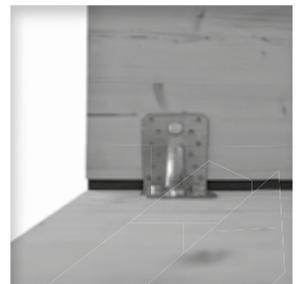
 Spezialprodukte  Messtechnik

TROCKENE SYSTEMLÖSUNGEN

für Boden, Wand und Decke bei Neubau (Massiv / Holz) und Sanierung

PhoneStrip  **PHONESTRIP**
Entkopplungsstreifen

PhoneStrip vermindert die Flankenübertragung von Luft- und Körperschall durch die innere Reibung und funktioniert daher grundlegend anders als herkömmliche Entkopplungslager.



NEU!!! Feuerwiderstandsprüfung

Eine Feuerwiderstandsprüfung der MFPA Leipzig GmbH bescheinigt PhoneStrip Entkopplungsstreifen in Bauteilfugen eine **Feuerwiderstandsdauer von 97 Minuten**.

Holzbaunternehmen und Fachplaner können die Vorzüge des Entkopplungsstreifens nun auch weiterhin in **Gebäudeklasse 4** nutzen, ohne Probleme mit den Brandschutzanforderungen bzw. der neuen Holzbaurichtlinie zu befürchten.



✓ innovativ ✓ ökologisch ✓ ausgezeichnet

Wolf Bavaria GmbH - ist seit 2004 ein erfolgreiches, innovatives und expandierendes Unternehmen für Systemlösungen im Holz- und Trockenbau.

Wir bieten einfache und effiziente Lösungen für Schalldämmung, Fußbodenheizung und Trockenestrich. Unsere Produkte sind für den Bestandsausbau und Neubau optimiert.



Wolf Bavaria GmbH
Gutenbergstraße 8
91560 Heilsbronn
Germany

Kontakt
Tel.: +49 (0) 9872 953 98 0
Fax: +49 (0) 9872 953 98 - 11
Email: info@wolf-bavaria.com



www.wolf-bavaria.com

Vertrieb FORUM **HOLZBAU**, Bahnhofplatz 1, 2502 Biel/Bienne, Schweiz
T +41 32 372 20 00
info@forum-holzbau.com, www.forum-holzbau.com

Bearbeitung und Satz: Simone Burri, Katja Rossel, Katharina Uebersax

© 2022 by FORUM **HOLZBAU**, Biel/Bienne, Schweiz
ISBN 978-3-906226-41-5

UN
UNBO