

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.

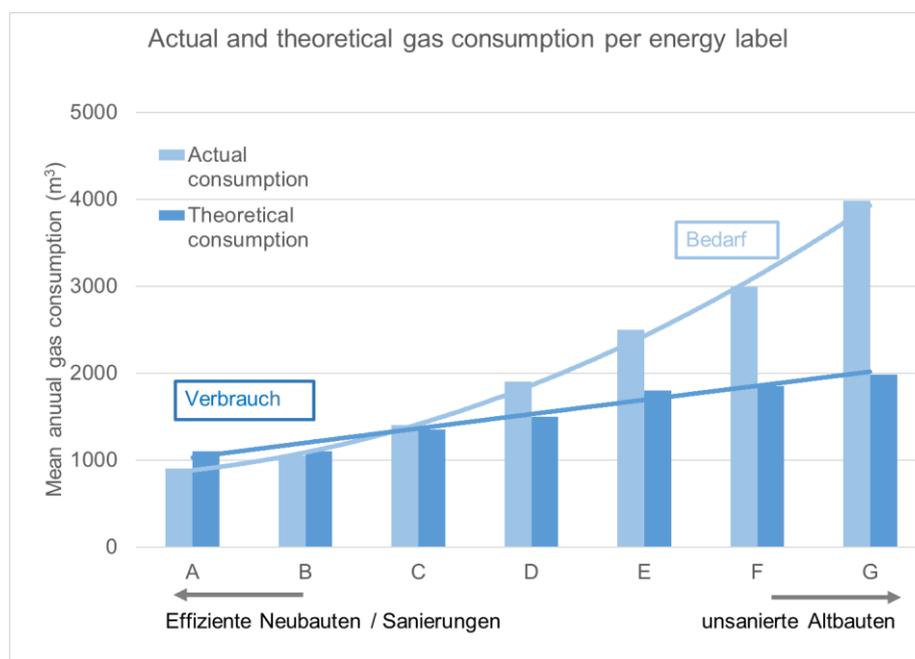


Abbildung 1: Verbrauch versus Bedarf bei Neubauten und Bestandsgebäuden. Grafik basiert auf: Gasbedarf versus Verbrauch von 200'000 EFH, MFH in den Niederlanden.

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

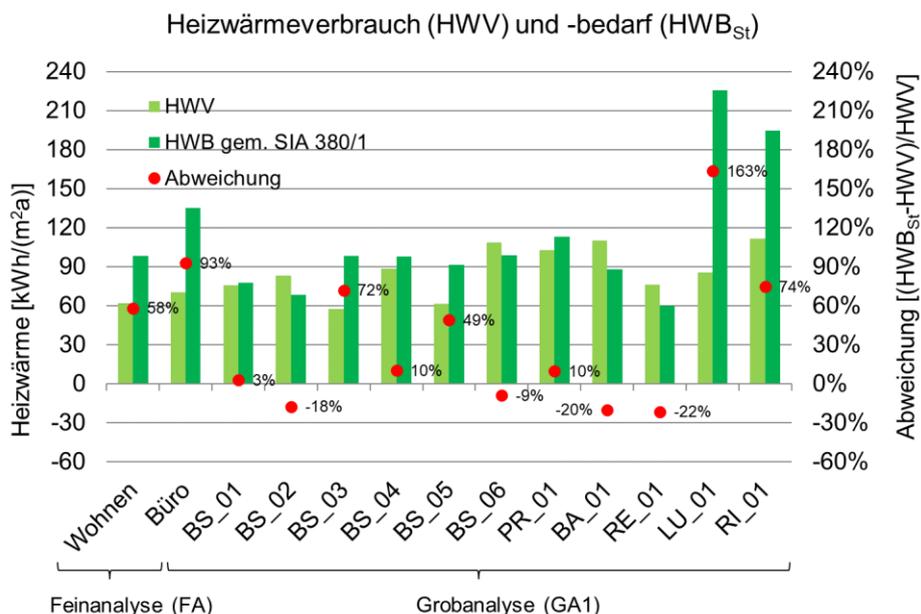


Abbildung 2: HWV und HWB_{St} (gem. SIA 380/1) für die beiden Gebäudegruppen FA und GA1. MFH: «Wohnen», BS_01, BS_02, BS_03, BS_04, BS_05, PR_01, BA_01 und RE_01. Das Gebäude BS_06 umfasst eine Mischnutzung mit Verkauf, Büro und Wohnen. EFH: LU_01 und RI_01 Flächenbezug: Energiebezugsfläche, A_E (früher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

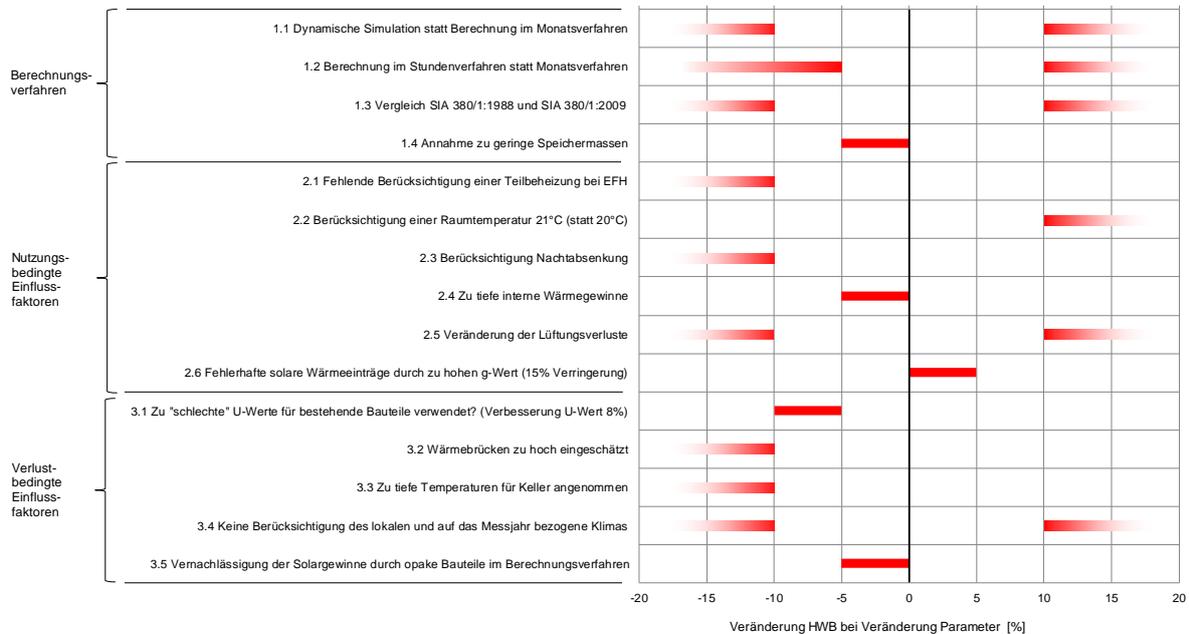
- Bilden ältere Berechnungsverfahren Bestandsgebäude besser ab?
Beispielrechnungen mit vier Gebäuden (BS_02, BS_03, PR_01 und RE_01, alle GA1) zeigen, dass die alte SIA 380/1:1988 die Bestandsgebäude nicht grundsätzlich passender abbildet als SIA 380/1:2009. Bei Verwendung von SIA 380/1:1988 kommt es 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. um +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 statt 20 °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 %.

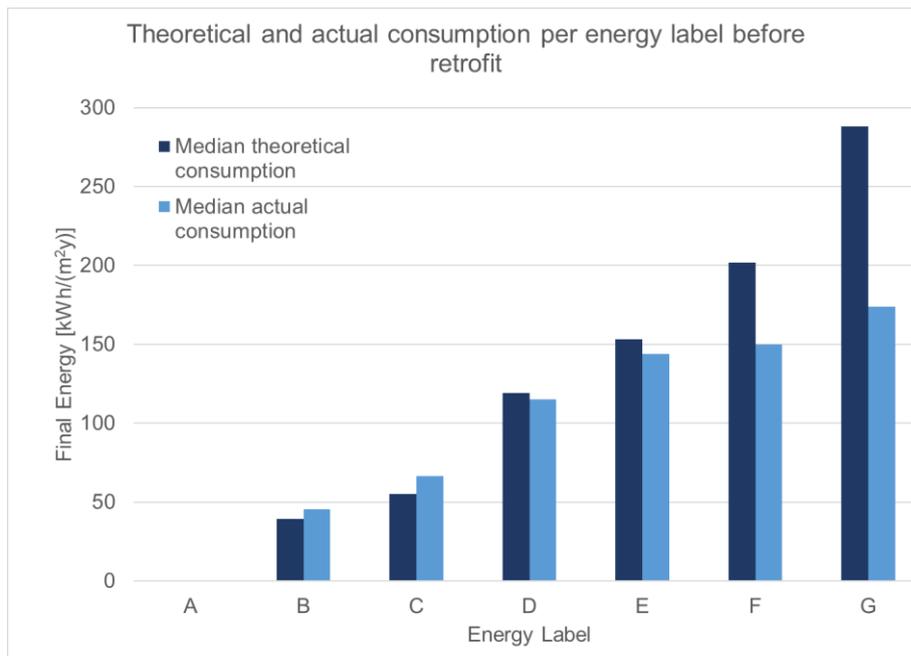


Abbildung 3: Theoretischer und tatsächlicher Endenergiebedarf, bzw. -verbrauch vor der Gebäudesanierung. Die Werte für die Grafik sind aus [38] entnommen. Das Label bezieht sich auf die Gesamtenergie.

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.

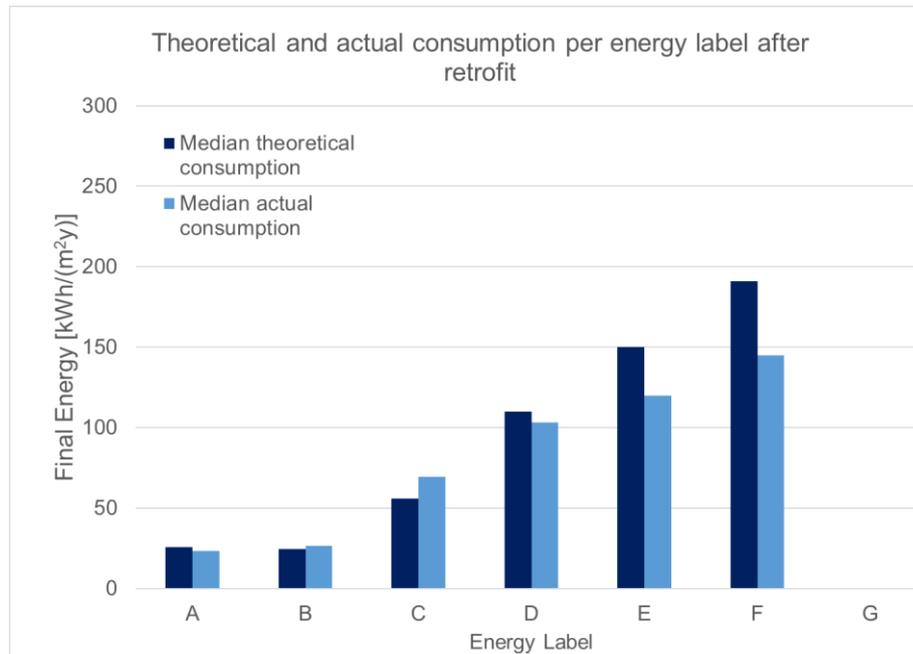


Abbildung 4: Theoretischer und tatsächlicher Endenergiebedarf, bzw. -verbrauch nach der Gebäudesanierung. Die Werte für die Grafik sind aus [38] entnommen. Das Label bezieht sich auf die Gesamtenergie.

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. Graetzi-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. Künzel, *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.