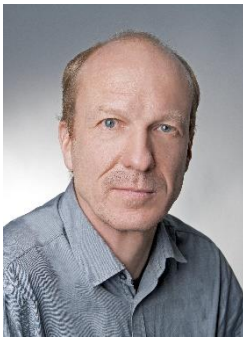
Ganzheitliche und kostenoptimierte Gebäudekonzepte – Die Evolution als Optimierungswerkzeug

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.

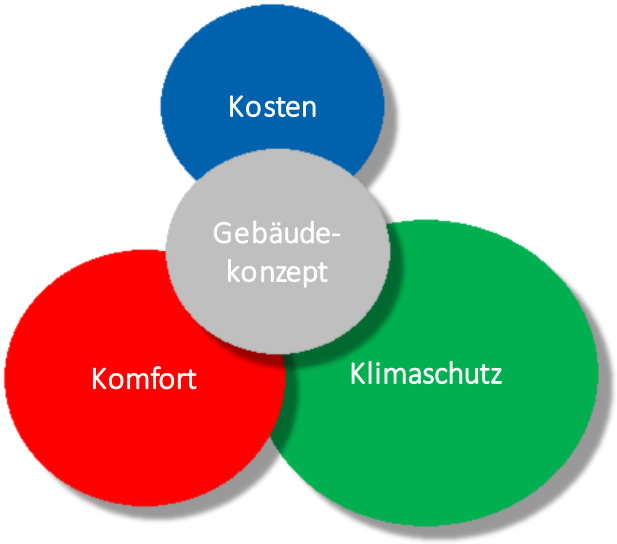


Abbildung 1: Ganzheitliche Gebäudekonzepte sind im Spannungsfeld zwischen Komfort, Klimaschutz und Kosten zu entwickeln.

2. Der ganzheitliche Ansatz und die Maschine

Gebäude stellen komplexe dynamische Systeme dar und sind zugleich Prototypen. Das Zusammenspiel von Gebäudehülle, Raumklimatechnik 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.

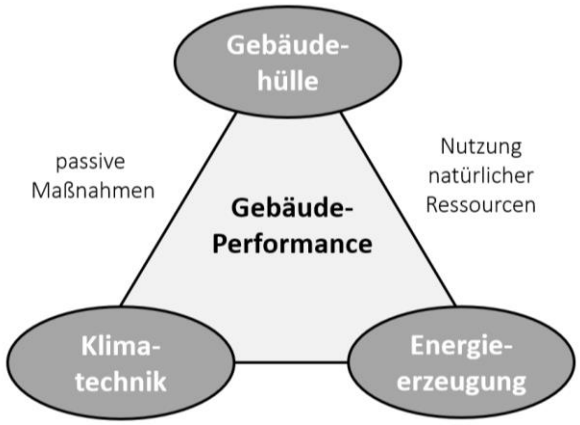


Abbildung 2: Das Zusammenspiel von Gebäudehülle, Klimatechnik und Energieerzeugung bestimmt maßgeblich die Gebäudeperformance.

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.

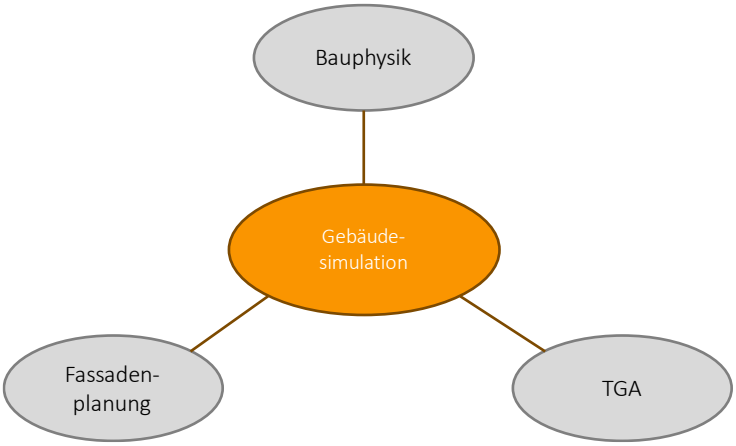


Abbildung 3: Die Gebäudesimulation als Bindeglied im Planungsprozess.

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.

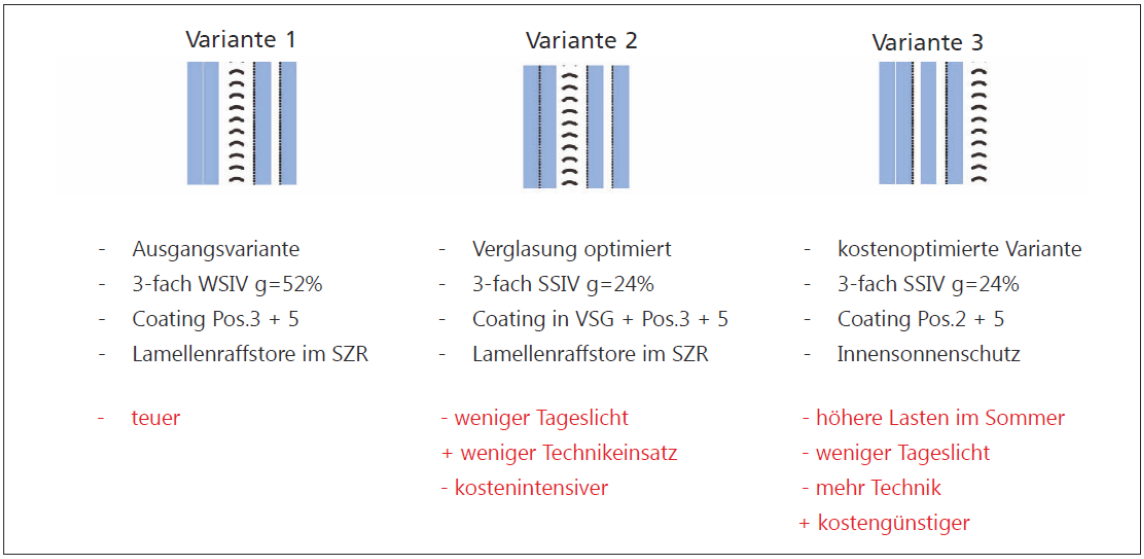


Abbildung 4: Fassadenvarianten und ihre Wechselwirkungen.

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 Wärmegewinne 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 CO_2-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.

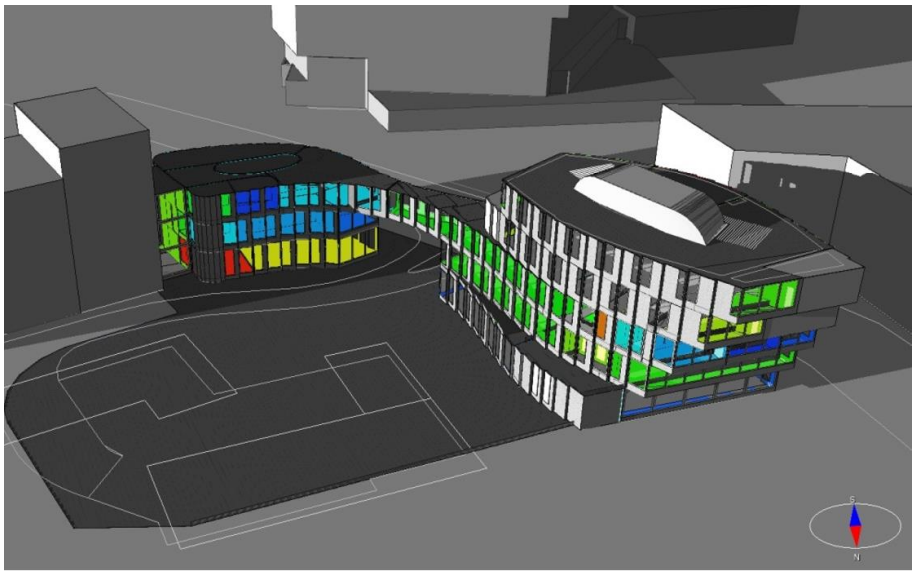


Abbildung 5: Simulationsmodell zur Ermittlung der optimalen Gebäudehülle.

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 Gesamtenergiedurchlassgrad (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).

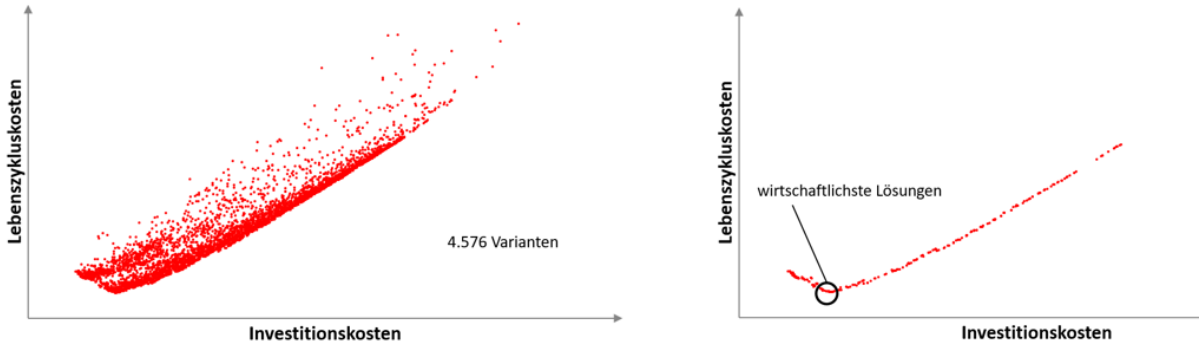


Abbildung 6: Ergebnisse der Optimierungsaufgabe Gebäudehülle
links: alle berechneten Varianten, jeder Punkt repräsentiert eine Variante
rechts: Schar aller optimalen Lösungen (Paretokurve).

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.).

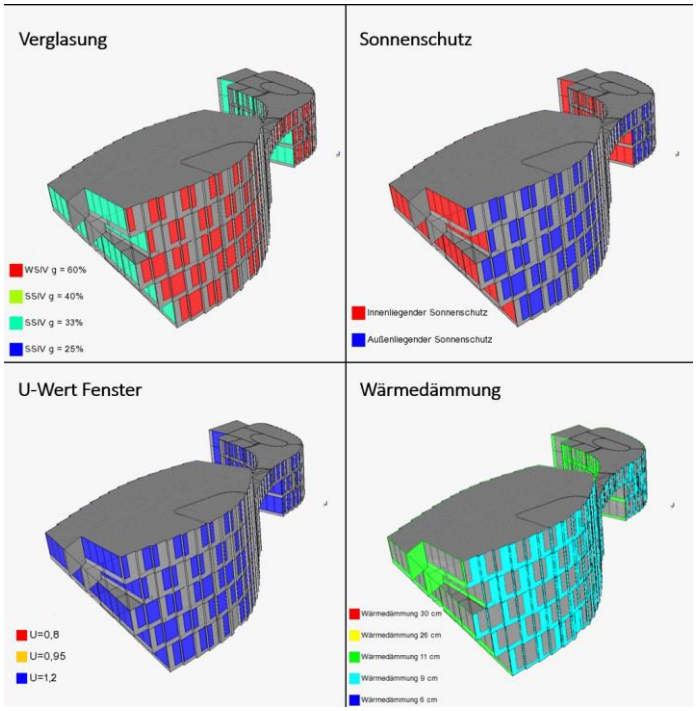


Abbildung 7: Die optimale Gebäudehülle: Ergebnis für die wirtschaftlichste Lösung.

4. Beispiele

4.1. Das vom Rechner entwickelte Energiekonzept

Die zuvor vorgestellte rechnergestützte, parametrisierte Optimierung kann u. a. auch zielführend 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.

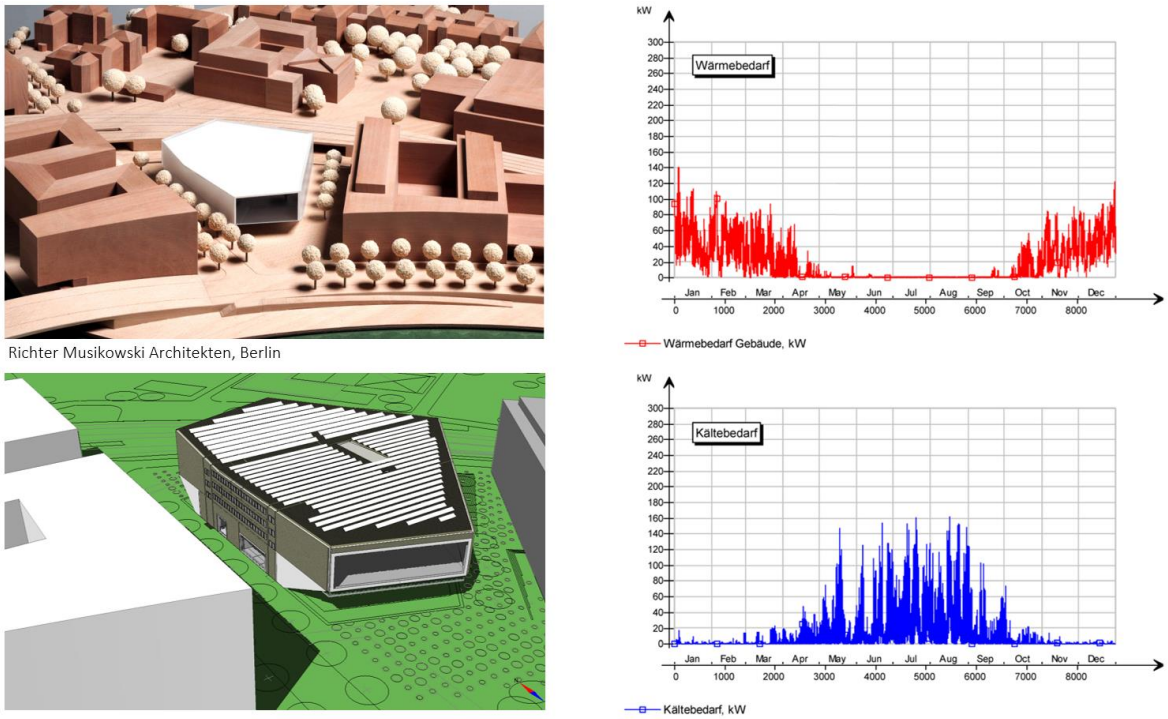


Abbildung 8: Lastgänge des Gebäudes im Jahresverlauf als Eingangsgrößen für das Energiekonzept.

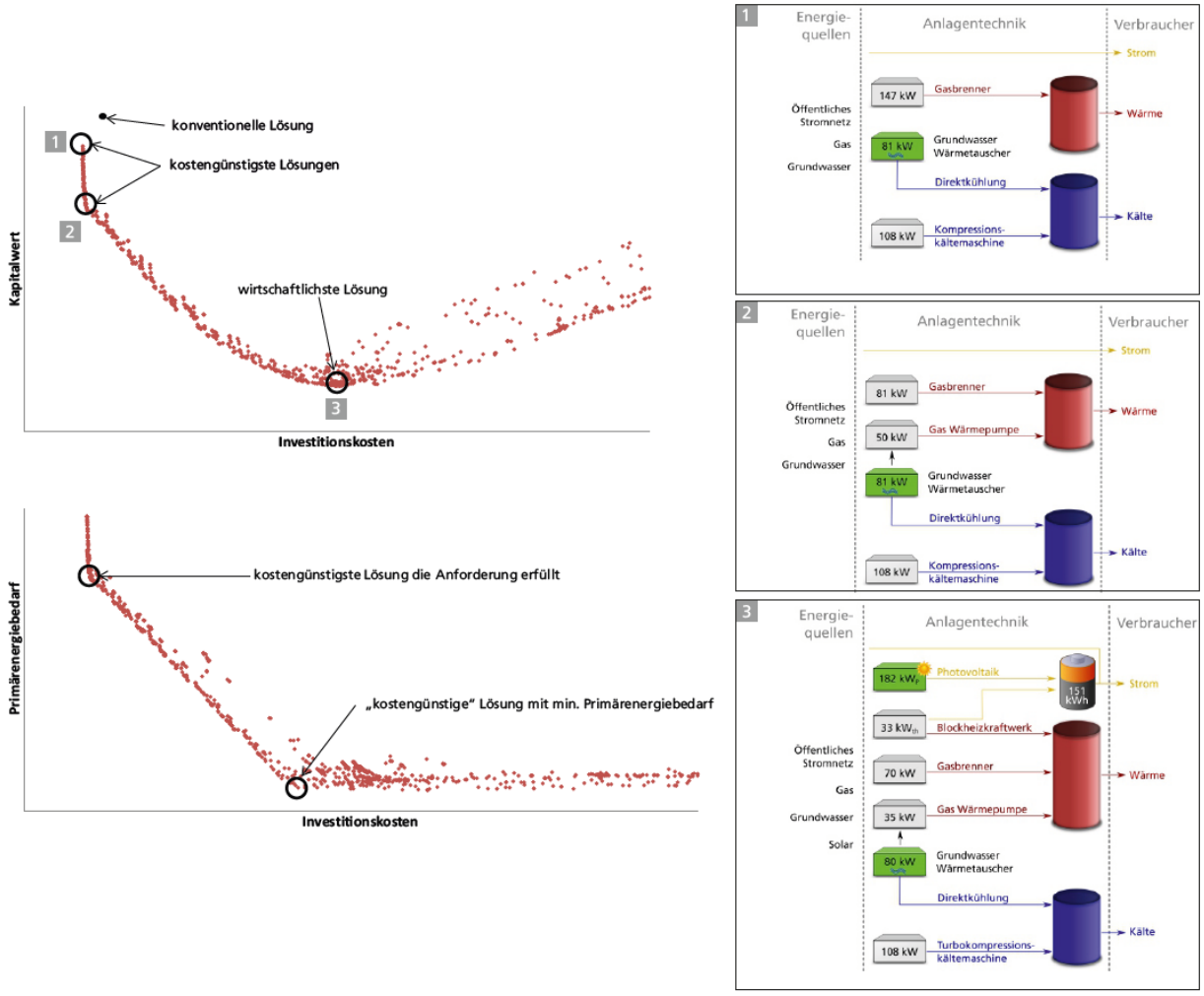


Abbildung 9: Das optimale Energiekonzept: Ergebnisse der parametrisierten Optimierung.

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 (Raumlufttemperaturen und Raumluftfeuchte). 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.

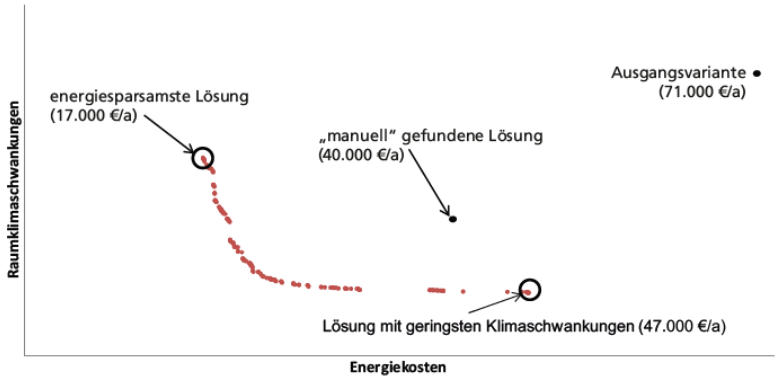


Abbildung 11: Ergebnisse zur Optimierung der Betriebsweise einer Vollklimaanlage.

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.

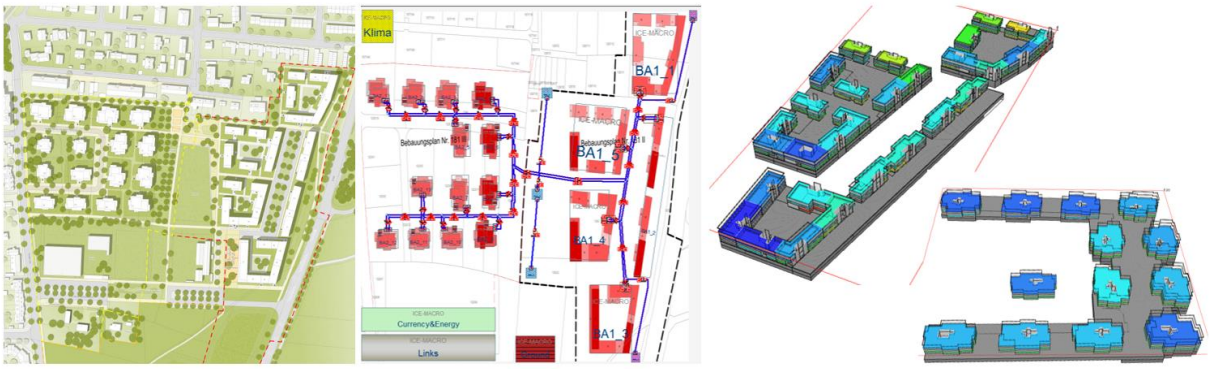


Abbildung 12: Simulationsmodell eines Wohnquartiers einschließlich Wärmenetz.

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.

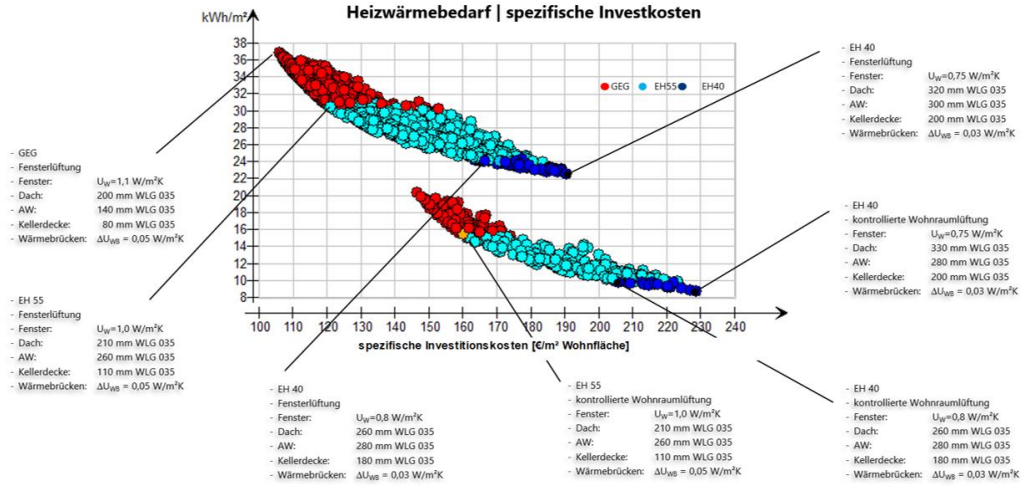


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und spezifischen Investitionskosten für unterschiedliche Gebäudestandards.

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.

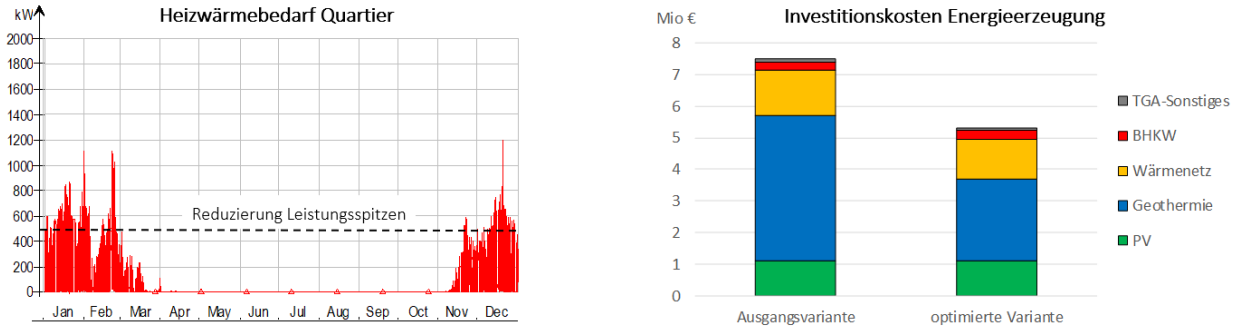


Abbildung 14: Einsparung bei den Investitionskosten der Energieerzeugung durch gezielte Nutzung der Gebäudespeichermassen und Reduzierung der Leistungsspitzen der Wärmeerzeugung.

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.