



Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Bauphysik

Entwicklung einer neuen Methode zur thermisch - energetischen und
ökonomischen Optimierung von Wohngebäuden

Simon Schmidt

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor- Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.- Ing. Christoph Gehlen

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.- Ing. Klaus Peter Sedlbauer
2. Prof. Dr.- Ing. Wolfram Haupt
3. Prof. Dr. jur. Dr. techn. Peter Kautsch

Die Dissertation wurde am 19. September 2016 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt
am 14. November 2016 angenommen.

Nichts, was wir nicht weggegeben haben, wird jemals wirklich unser sein.

Clive Staples Lewis: *Mere Christianity*. 1952

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner mehrjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bauphysik der Fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München.

An erster Stelle möchte ich meiner Familie, meiner Frau Stephanie Schäfer-Schmidt und meinen Kindern Elijana, Talitha und Noemi danken, für den Rückhalt, Ansporn und die große Geduld, die sie mir während der gesamten Zeit der Bearbeitung und insbesondere in der Endphase meiner Arbeit entgegengebracht haben. Meinen Eltern, Karl-Friedrich Schmidt und Ruth Schmidt gilt ein besonderer Dank. Durch ihre ideelle und natürlich auch finanzielle Unterstützung boten Sie mir die wesentlichen Voraussetzungen zum Erreichen dieser wissenschaftlichen Qualifikation.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ. -Prof. Dr. -Ing. Gerd Hauser, dem emeritierten Inhaber des Lehrstuhls für Bauphysik der Technischen Universität München und ehemaligen Leiter des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, für die Förderung, die großzügige Unterstützung, die Freiräume und das Vertrauen, welches er mir als Doktorand und Mitarbeiter entgegengebracht hat. Ich danke Herr Prof. Hauser für sein Engagement, die kontinuierliche Unterstützung und fachliche Begleitung als erstem Betreuer meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr. -Ing. Dipl. Phys. Klaus Peter Sedlbauer möchte ich mich herzlich dafür bedanken, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Arbeit unter seiner fachlichen Betreuung weiterzuführen. Durch die anregenden Gespräche und seine fachliche Unterstützung konnte ich die Arbeit erst in die vorliegende Form bringen.

Herrn Prof. Dr. -Ing. Wolfram Haupt danke ich neben der Übernahme des Koreferates, für seine Hinweise in allen Stufen der Bearbeitung, die sehr wertvollen Diskussionen, die Anregungen sowie seine Bereitschaft, sich im Rahmen seiner Arbeits- als auch seiner Freizeit um meine Betreuung zu engagieren. Über die gesamte Zeit der Bearbeitung war Prof. Haupt mir ein wertvoller Mentor, Kollege und Freund.

Darüber hinaus möchte ich mich, für seine Bereitschaft, als Gutachter zu fungieren, recht herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr.iur. Dr.techn. Peter Kautsch vom Institut für Hochbau an der Technischen Universität Graz bedanken.

Zum positiven Gelingen der Arbeit hat auch das angenehme Arbeitsklima am Lehrstuhl beigetragen. Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, Dipl.-Ing. Mareike Ettrich, Dipl. Soz. Caroline Goldammer, Prof. Dr.-Ing. Wolfram Haupt, Prof. Michaela Hoppe und Dipl.-Ing. Sandra Spindler, wie auch meinen gegenwärtigen, Dr.-Ing. Roland Göttig, Viktoria Krastel M.Sc, Dipl.-Math. Manuel Lindauer und

Alexander Peikos M.Sc., möchte ich hier für die vielen Gespräche, Diskussionen, Anregungen, Tipps und vor allem für das Zuhören danken. Gerade in der letzten Phase der Arbeit ermöglichten Sie alle und insbesondere Alexander Peikos es mir durch ihre Bereitschaft, meine Aufgaben am Lehrstuhl mit zu übernehmen, die Arbeit ungestört zu Ende zu schreiben. Besonders möchte ich mich bei Caroline Goldammer für ihr offenes Ohr und ganz besonders für das Korrekturlesen der Arbeit bedanken. Einen weiteren besonderen Dank möchte ich an Dr. -Ing. Roland Göttig richten, der mir unzählige Male Rede und Antwort stand. Ebenfalls möchte ich mich bei Ihm für das inhaltliche Korrekturlesen der Arbeit bedanken.

Simon Schmidt, im Juni 2016

Leider läßt sich eine wahrhafte Dankbarkeit mit Worten nicht ausdrücken, . . .

Johann Wolfgang von Goethe: *Goethe, Briefe. An Adelheid Amalia Fürstin von Gallitzin.* 06. Febr. 1797

Kurzfassung

Einleitung

Das Dissertationsvorhaben ist dem Themengebiet der *Building Performance Optimization* (BPO) zuzuordnen. Hierunter wird eine Kombination aus der reinen mathematischen Optimierung und der sogenannten *Building Performance Simulation* (BPS) von Gebäuden verstanden. Die Idee hinter der Verwendung von BPO ist, die Vorteile aus der thermischen Simulation von Gebäuden mit den Vorteilen der mathematischen Optimierung zu kombinieren.

Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Ziel der Dissertation ist es, eine Methode zu entwickeln, mit der einfach, erweiterbar, zukunftsfähig und nutzerbezogen eine thermisch-energetische und ökonomische Optimierung durchgeführt werden kann. Hierzu wird zunächst der aktuelle Stand des Wissens im Bereich der BPO analysiert und ausgewertet. Auf Grundlage dieser Auswertung wird im nächsten Schritt eine neue Methode entwickelt und dargestellt. Die Anwendbarkeit der entwickelten Methode wird anschließend anhand der Optimierung des thermischen Modells eines Beispielgebäudes durchgeführt. Abgeschlossen wird die Arbeit durch die Eingliederung der neuen Methode in den Stand des Wissens.

Kurzbeschreibung

Die neu entwickelte Methode enthält folgende Hauptbestandteile: Ein Gebäudemodell, eine Simulationsumgebung,

ein Optimierungsverfahren und eine Analyse der Ergebnisse. Sie setzt durch ihre Struktur an den Punkten Einfachheit, Erweiterbarkeit und damit auch an der Zukunftsfähigkeit an. Durch die Verwendung eines automatischen, auf das jeweils angebundene Simulationsprogramm abgestimmten Modellinterpreters ist es für den Nutzer sehr einfach, ein erstelltes Simulationsmodell der Optimierung zuzuführen. Durch die Verarbeitung aller notwendiger Schritte der Optimierung, wie die Definition der Zielgrößen, die Erstellung der Varianten, die Speicherung und Auswertung der Ergebnisse, welche vollumfänglich innerhalb einer Programmierumgebung durchgeführt werden und die ebenfalls interne Anbindung des Simulations- und Optimierungswerkzeuges, ist auch bei der Durchführung einer Optimierung der Grundsatz eines möglichst einfach zu bedienenden Werkzeugs gegeben.

Die Verwendung eines generischen Simulations- als auch Optimierungswerkzeugs führt dazu, dass Programmupdates und Aktualisierungen nahezu ohne Anpassungen der Methode implementiert werden können. Zusammen mit der Möglichkeit, weitere Simulations- und Optimierungswerkzeuge zu verwenden, ist hier ebenfalls der Grundsatz der Erweiterbarkeit und Zukunftsfähigkeit der neuen Methode gegeben.

Die Nutzerbezogenheit der neuen Methode wird hauptsächlich durch die Zielgrößenbetrachtung erreicht. Hierbei werden die drei wesentlichen Zielgrößen, Energieeffizienz, als Energiebedarfswerte aus dynamisch instationärer Simulation, Ökonomie, als Lebenszykluskosten und ther-

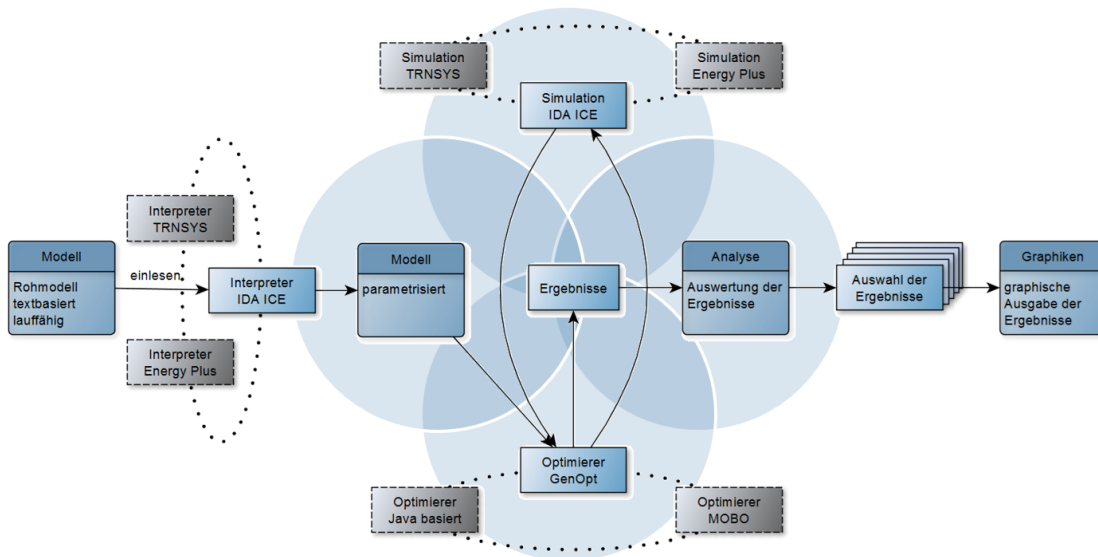


Abbildung 1: Schematische Darstellung der neu entwickelten Methode

mische Behaglichkeit, als Übertemperaturgradstunden auf Basis von Operativtemperaturen, im Rahmen der neuen Methode betrachtet. Diese werden, nach dem Grundsatz der besten Übereinstimmung mit den Wünschen und Anforderungen des Nutzers, nutzerbezogen kombiniert und anschließend optimiert. Dieses Vorgehen beinhaltet, dass nicht die mathematisch beste Lösung des gegeben

nen Optimierungsproblems, sondern eine nach den spezifischen Angaben des Nutzers beste Lösung gesucht wird.

Die Überprüfung der neuen Methode wird mittels einer beispielhaften Umsetzung durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass es mit der neuen Methode gelungen ist, sowohl die vier motivierenden Grundsätze zu erfüllen, als auch die Möglichkeiten auf dem Gebiet der BPO zu erweitern.

Abstract

Due to the increasing importance of holistic building assessments, interdisciplinary approaches as well as the development of new methods and tools is necessary. Against this background, an assessment method, which combines mathematical optimization and building performan-

ce simulation (BPS) has been developed. This method combines the advantages of both disciplines and enables simple, expandable, future-oriented as well as user-specific manner optimization of buildings from a thermal- energy and economic point of view.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iv
Kurzfassung	vi
1 Ausgangssituation	1
2 Zielsetzung und methodisches Vorgehen	3
3 Thermische Simulation – Stand des Wissens	5
3.1 Definitionen	5
3.1.1 System	5
3.1.2 Modell	7
3.1.3 Simulation	10
3.2 Grundlagen der thermischen Simulation	11
3.2.1 Geschichtliche Entwicklung	11
3.2.2 Anwendungsgebiete und Verfahren	12
3.3 Thermische Simulation in der Bauphysik	16
3.3.1 Geschichtliche Entwicklung	16
3.3.2 Klassifikation der verwendeten Programme	17
4 Optimierung – Stand des Wissens	20
4.1 Definitionen	20
4.1.1 Begriffsbestimmung Optimierung	20
4.1.2 Manuelle Optimierung	21
4.1.3 Automatisierte Optimierung	23
4.2 Grundlagen der Optimierung	24
4.2.1 Mathematische Grundlagen	24
4.2.2 Klassifizierung von Optimierungsproblemen	25
4.3 Optimierung im Bereich der Bauphysik	28
4.3.1 Klassifikation bauphysikalischer Optimierung	28
4.3.2 Aktuell verwendete Programme bei der Optimierung im Bereich der Building Performance Optimization	30
5 Thermisch-energetisch-ökonomische Optimierung – Stand des Wissens	34
5.1 Hintergrund und Problemstellung	34
5.2 Klassifikation der Methoden	35
5.3 Zielgrößenbetrachtung	43
5.4 Optimierungsalgorithmen und Variablenanzahl	45
5.5 Aktuelle Forschungsschwerpunkte	47
6 Darstellung der neuen Methode	48
6.1 Klassifikation der neuen Methode	48
6.2 Zielgrößenbetrachtung im Rahmen der neuen Methode	52

6.3	Darstellung der Implementierung der Bauteilsschwere und des Baustandards in der neuen Methode	55
7	Beschreibung des Basismodells	59
7.1	Randbedingungen der thermischen Simulation	60
7.2	Randbedingungen der Optimierung	61
7.3	Randbedingungen der Ökonomiebetrachtung	62
8	Überprüfung des Basismodells	64
8.1	Funktionsüberprüfung des thermischen Modells	64
8.1.1	Vergleich zwischen Literatur und Implementierung	64
8.1.2	Vergleich zwischen Simulationsprogramm und Implementierung	66
8.2	Überprüfung der Optimierung	66
8.2.1	Qualitative Überprüfung der Optimierung	68
8.2.2	Quantitative Überprüfung der Optimierung	71
8.3	Überprüfung der Ökonomiebetrachtung	71
8.3.1	Überprüfung der Herstellungskosten	72
8.3.2	Überprüfung der Nutzungskosten	74
9	Überprüfung der Funktionsweise der Methode	76
9.1	Einzeleinflüsse	76
9.2	Kombinationseinflüsse	78
9.2.1	Berechnung mittels des Particle Swarm Algorithmus	80
9.2.2	Berechnung mittels Multistart Generalized Pattern Search Methode	82
9.2.3	Berechnung mittels Simplex Algorithmus	84
10	Einordnung zum Stand des Wissens	86
10.1	Eingliederung der neuen Methode in die Methodenklassifikation	86
10.2	Unterscheidung hinsichtlich der Zielgrößenbetrachtung	89
10.3	Selbstkritische Bewertung der Methode	89
11	Zusammenfassung	91
12	Entwicklungsmöglichkeiten und Ausblick	93
	Literatur	96

1 Ausgangssituation

Das zentrale Thema der Dissertation ist die Beschäftigung mit der *Building Performance Optimization* (BPO). Hierunter wird eine Kombination aus der reinen mathematischen Optimierung und der *Building Performance Simulation* (BPS) von Gebäuden, der thermisch-energetischen, ökonomischen und anlagentechnischen Simulation von Gebäuden, verstanden, wie diese in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist. Ziel hierbei ist es, die Vorteile aus der Simulation von Gebäuden mit den Vorteilen der mathematischen Optimierung zu kombinieren.

Die beiden Disziplinen Simulation und Optimierung blicken zum aktuellen Zeitpunkt bereits auf eine mehr oder minder lange Entwicklungsphase zurück. Im Bereich der Simulation von Gebäuden gehen die ersten Softwareentwicklungen bis in die frühen sechziger Jahre zurück [59]. Die Entwicklung begann mit der Möglichkeit, einfache Vorgänge, wie den Wärmetransport durch ein Bauteil, berechnen zu können und entwickelte sich über die Kombination unterschiedlicher Transportvorgänge in Räumen, bis zu den heute häufig verwendeten ganzheitlichen Betrachtungen von Gebäuden [86]. Eine ausführlichere Beschreibung der historischen und aktuellen Entwicklungen im Bereich der Simulation von Gebäuden ist in Kapitel 3 auf Seite 5 beschrieben.

Demgegenüber reicht die geschichtliche Entwicklung der mathematischen Optimierung sehr viel weiter in die Vergangenheit zurück. Bereits die initialen Versuche, Vorgänge mathematisch auszudrücken, können theoretisch als erster Versuch zur Optimierung angesehen werden. Diese Entwicklung wurde über viele Jahrhunderte immer weiter geführt und bekam durch die Erfindung der digitalen Rechenhilfen einen enormen Schub [21]. Erst ab diesem Zeitpunkt war es möglich, einerseits

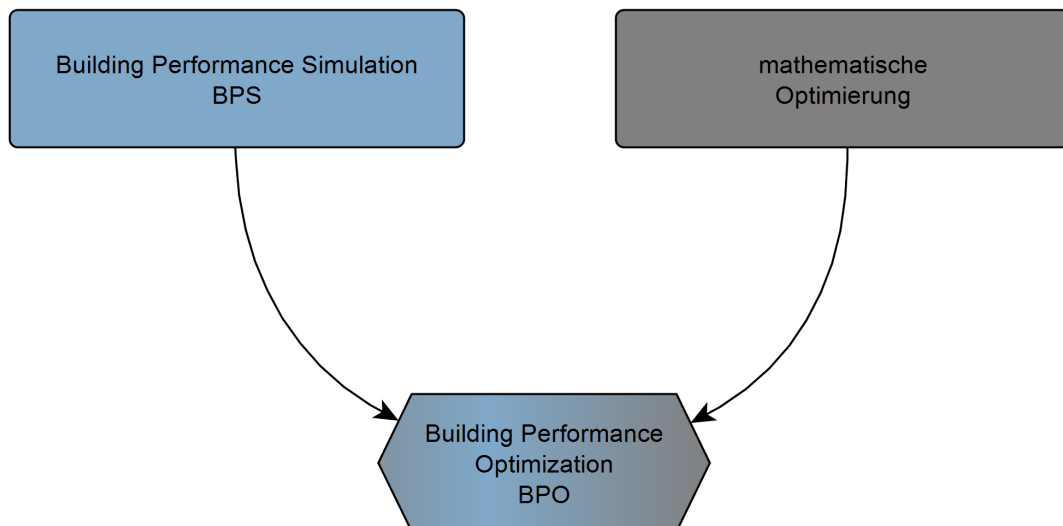


Abbildung 2: Graphische Darstellung des Zusammenhangs von Simulation und Optimierung im Bereich der Building Performance Optimization (BPO)

sehr umfangreiche Optimierungsräume zu betrachten und andererseits neben den bis dato ausschließlich analytischen Optimierungen auch andere Optimierungsmethoden anzuwenden [61]. Dies führte dann auch zur Möglichkeit, eine Verknüpfung zwischen Building Performance Simulation und mathematischer Optimierung zur BPO durchzuführen.

Bereits seit den 1990er-Jahren wird darüber geforscht, wie Building Performance Simulation und mathematische Optimierung bestmöglich verknüpft werden können [91]. Erst jedoch seit 2006 nimmt das Interesse einer breiteren Forschungsöffentlichkeit zu, wie man an den seitdem stetig steigenden Zahlen an Veröffentlichungen zu diesem Thema nach [70] in Abbildung 3 sehen kann. Ein Grund für dieses gesteigerte Interesse könnte die immer ganzheitlicher Betrachtung von Gebäuden sein, die zu dieser Zeit im wissenschaftlichen Bereich stark fokussiert wurde. Daneben entwickelten sich die Möglichkeiten der mathematischen Optimierung ebenfalls zu diesem Zeitpunkt [89]. Ein Weiterführen der Untersuchung von Nguyen, Reiter und Rigo zeigt, dass auch in den Jahren nach 2012 dieser Trend ungebrochen ist.

2 Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Ziel der Beschäftigung mit dem Thema ist es, eine Methode, mit der einfach, erweiterbar, zukunftsfähig und nutzerbezogen eine thermisch-energetische und ökonomische Optimierung durchgeführt werden kann, zu entwickeln.

Der aktuelle Stand des Wissens wird für die Themenbereiche thermische Simulation, mathematische Optimierung und Building Performance Optimization erarbeitet. Der Fokus liegt hierbei auf dem Bereich der BPO, für den ausgewählte Methoden analysiert und klassifiziert werden. Die Klassifikation erfolgt hierbei durch eine eigens hierfür entwickelte Klassifizierungsmethode, die in Kapitel 5.2 näher erleutert wird. Das Ergebnis dieser Klassifizierung ist die graphische Darstellung aller analysierter Methoden in der BPO-Methodenlandschaft (Abbildung 13).

Auf Grundlage dieser Auswertung wird im nächsten Schritt, vor dem Hintergrund der Zielsetzung, eine neue Methode zur thermisch-energetischen und ökonomischen Optimierung entwickelt und dargestellt. Bei der Entwicklung der Methode wird auf die beiden Komponenten, generisches Simulationsprogramm und generisches Optimierungsprogramm zurückgegriffen. Diese beiden Komponenten werden unter Zuhilfenahme einer Programmierumgebung gekoppelt. Innerhalb der Programmierumgebung werden alle notwendigen Einstellungen, für die ein nutzerbezogenes Optimierungsproblem notwendig ist, das automatische Ansteuern der Programme, sowie die Ergebnisverarbeitung und -ausgabe durchgeführt.

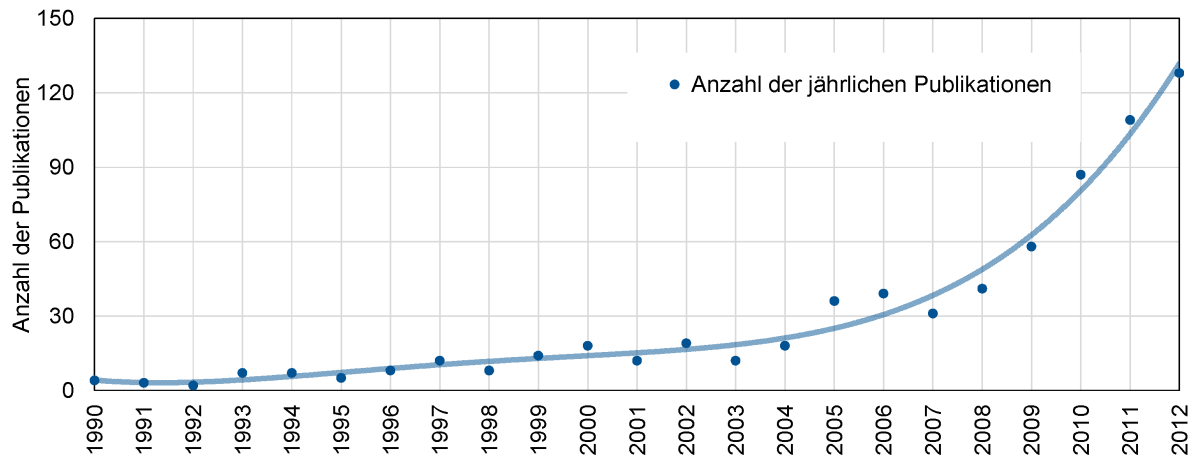


Abbildung 3: Verlauf von Veröffentlichungen zum Thema automatisierten Optimierung im Kontext von thermischer Simulation seit 1990 [70, S. 1045]

Die Anwendbarkeit der entwickelten Methode wird anhand eines Beispielgebäudes durchgeführt. Hierzu wird ein bekanntes thermisches Modell verwendet und mittels der neuen Methode berechnet. Die so gewonnenen Ergebnisse werden anschließend mit den veröffentlichten Ergebnissen aus der dokumentierten Berechnung des Modells verglichen.

Abgeschlossen wird die Arbeit durch die Eingliederung der neuen Methode in den Stand des Wissens.

3 Thermische Simulation – Stand des Wissens

3.1 Definitionen

Der Begriff *thermische Simulation* taucht in den letzten Jahren im wissenschaftlichen, aber auch im planerischen Kontext immer häufiger auf. Das, was im Allgemeinen darunter verstanden wird, ist jedoch oft nicht dasselbe. Wie in der Arbeit von Spath [81] dargelegt, sind diese unterschiedlichen Verständnisse aus der geschichtlichen Entwicklung des Begriffes der *Simulation* entstanden. Spath beschreibt in ihrer Arbeit die Entwicklung des Begriffes *Simulation* im philosophischen und wissenschaftstechnischen Bereich. Andere Quellen, wie beispielsweise das Nachschlagewerk Brockhaus [15], gibt für die Bereiche Allgemein, Strahlentherapie und wissenschaftlich technisch differenzierte Definitionen an. Um im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine einheitliche Grundlage zu schaffen, beschränkt sich die Definition in dieser Arbeit auf den wissenschaftlich-technischen Kontext des Begriffes *Simulation*. Dieser soll aus den eng mit ihm verbundenen Begriffen *System* und *Modell* entwickelt werden, die im Folgenden definiert werden.

3.1.1 System

Als System wird etwas verstanden, das sich neben einer inneren Struktur klar nach außen abgrenzen lässt und einen Systemzweck als Existenzgrundlage besitzt. Es kann somit grundsätzlich alles ein System sein, was wir als solches erkennen [22].

Meadows definiert ein System als:

A set of elements or parts that is coherently organized and interconnected in a pattern or structure that produces a characteristic set of behaviors, often classified as its “function” or “purpose.” [66, S. 188]

Diese Systeme können in natürliche und künstliche Systeme gegliedert werden. Entsteht und existiert ein System ohne menschlichen Einfluss, so wird es als natürliches System bezeichnet. Alle anderen Systeme gelten als künstlich. Unabhängig davon kann ein System als Menge von Komponenten angesehen werden, die miteinander in Interaktion stehen. Komponenten können Einzelkomponenten oder auch Komponentengruppen, auch Subsysteme genannt, darstellen. Komponenten besitzen Eigenschaften. Diese sind fixiert, oder veränderlich und werden dann als Eigenschaften oder als Zustandsvariablen bezeichnet. Zustandsvariablen können dabei binäre, diskrete oder kontinuierliche Wertebereiche aufweisen.

Besitzt ein System ausschließlich gegenständliche Komponenten, gilt es als materielles, oder auch gegenständliches System. Sind demgegenüber begriffliche Komponenten enthalten, spricht man von immateriellen oder begrifflichen Systemen. Immaterielle Systeme werden weiterhin in mentale, verbale, grafische und formale Modelle unterschieden, je nach Art der im System enthaltenen Komponenten. Besteht ein System lediglich aus Eigenschaften, so gilt es als statisches System. Verändern sich die Zustandsvariablen mit der Zeit, gilt es als dynamisches System. Interagieren die Komponenten lediglich mit anderen Komponenten des gleichen Systems, so gilt das System als geschlossen. Existieren Interaktionen mit der Umwelt, gilt es als offen. Definiert wird diese Interaktion durch Ein- und Ausgabegrößen, wobei die Eingabegrößen entweder kontrollierbar oder unkontrollierbar sind und die Ausgabegrößen als beobachtbar gelten. Die Interaktionen in einem System sind dabei entweder ebenfalls beobachtbar (white-box) oder nicht beobachtbar (black-box).[18]

Um ein System kennen und verstehen zu lernen, muss es beobachtet werden. Je nach System (offen, geschlossen, white- oder black-box) kann dies durch die Beobachtung der Eingabegrößen, Interaktionen im System und Ausgabegrößen, oder lediglich durch Beobachtung der Ein- und Ausgabegrößen geschehen. Formalisiert man diese Beobachtung, kann die Ausgabegröße als P gelten, die kontrollierbaren Eingabegrößen als C , sowie die unkontrollierbaren Eingabegrößen als U . Die Interaktionen im System, die aus den Ein- die Ausgabegrößen erzeugen, werden als Funktion f definiert. Um die Funktion f zu verstehen muss also das Verhalten von P bezüglich der Eingabegrößen C und U untersucht werden [18]. Je nach Verhalten von P gelten Systeme als deterministisch oder stochastisch. Diese Untersuchung des Verhaltens von Systemen wird *experimentieren* genannt. Eine Einzelbeobachtung *Experiment*. *Experimentierbarkeit* ist nach VDI 3633 als

„... die gezielte empirische Untersuchung des Modellverhaltens...“ [87]

definiert, wobei eine Untersuchung auch die Auswertung der gewonnenen Ergebnisse beinhaltet.

Eine Systematik des Begriffs System und den angegliederten Begriffen ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

3.1.2 Modell

Über den Systembegriff hinaus wird als *Modell* ein System verstanden, welches das nicht nur beobachtet, sondern aktiv verändert, also *experimentell* untersucht werden kann. Niemeyer spezifiziert dies und definiert ein Modell als

„... materielle oder immaterielle Systeme, die andere Systeme so darstellen, dass eine experimentelle Manipulation der abgebildeten Strukturen und Zustände möglich ist.“ [72]

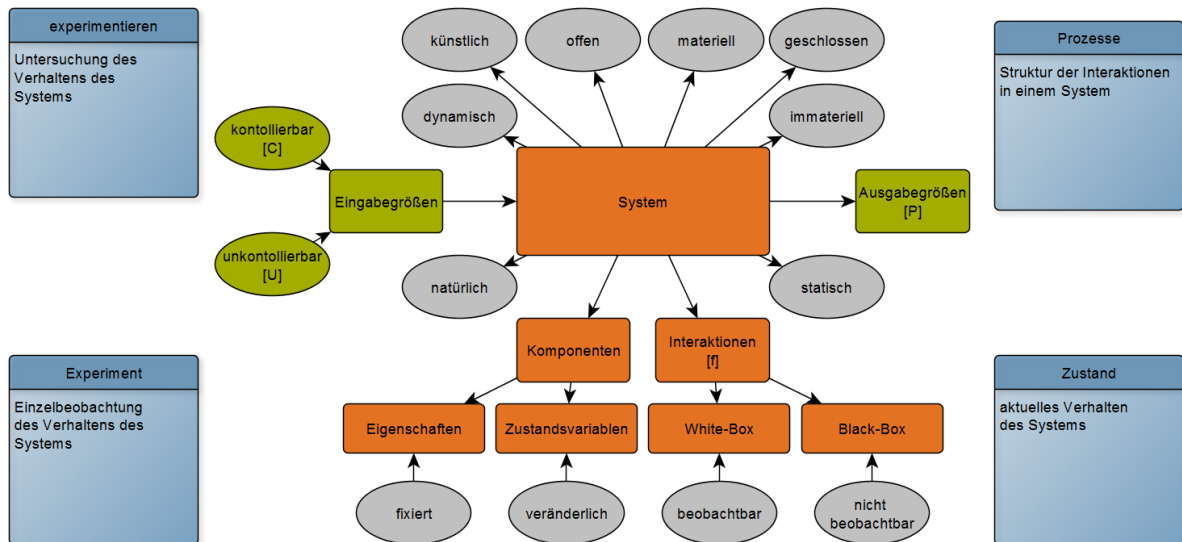


Abbildung 4: Abstrakte Darstellung des Begriffs System und der angegliederten Begriffe

Eine weitere Definition gibt die VDI 3633 an. Ein Modell ist demnach

„... eine vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System...“ [87].

Vereinfacht ausgedrückt handelt es sich bei einem Modell also um ein simplifiziertes Abbild des Originals. Buchholz [18] leitet aus dieser Definition ab, dass einerseits die Ergebnisse vom Modell auf das Originalsystem übertragbar sind, andererseits die Modelle durch Abstraktion oder Idealisierung handhabbar gehalten werden müssen.

Nach der bisherigen Definition eines Modells ist der Begriff immer noch sehr weit gefasst. Als Modell kann, wie auch als System, grundsätzlich alles aufgefasst werden. Beispiele von Modelltypen sind mentale, verbale, grafische, materielle und formale Modelle. Im Rahmen einer thermischen Simulation werden allerdings ausschließlich formale Modelle verwendet. Buchholz definiert diese als Modelle,

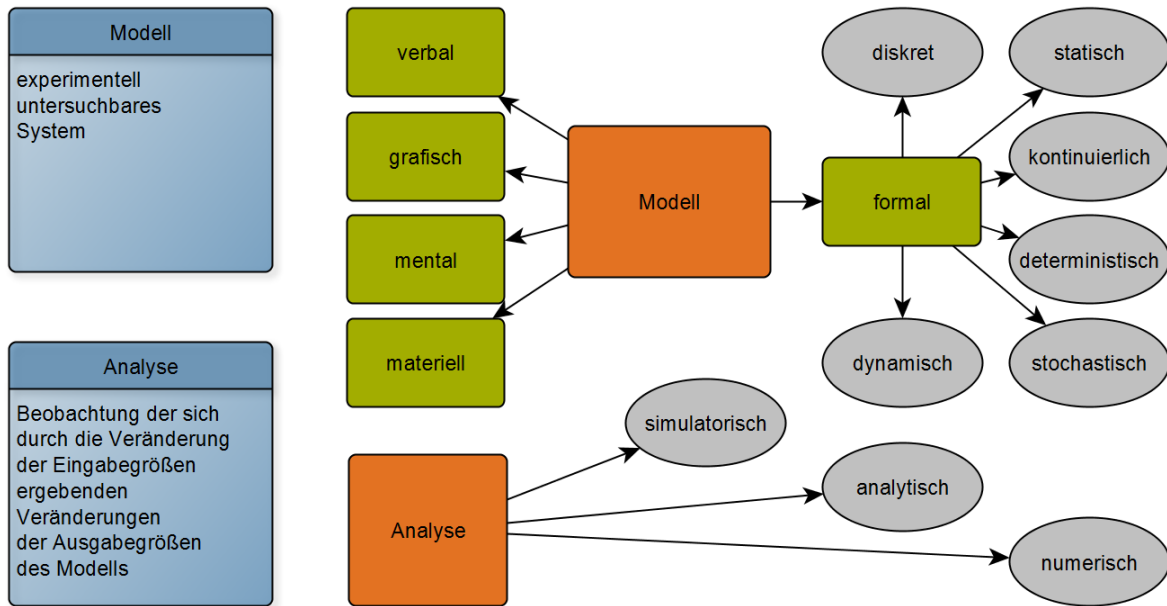


Abbildung 5: Abstrakte Darstellung des Begriffs Modell und der angegliederten Begriffe

“... die sich in einem formalen System nach festgelegten Regeln beschreiben lassen und sich mittels einer Programmiersprache in ein auf einem Computer analysierbares Modell transformieren lassen.“ [18, S. 11]

Formale Modelle können statisch oder dynamisch, deterministisch oder stochastisch mit kontinuierlichen und/oder diskreten Zustandsvariablen sein. Die im Rahmen der thermischen Simulation eingesetzten Modelle sind nach dieser Klassifizierung dynamische, deterministische Modelle mit kontinuierlichen und diskreten Zustandsvariablen.

Eine Systematik des Begriffs Modell und den angegliederten Begriffen ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

3.1.3 Simulation

Wurde ein Modell mit einer bestimmten Zielsetzung erstellt, so erfolgt nach der Definition eines Modells dessen Beobachtung. Dieses *Experimentieren* mit einem Modell hat nun nicht mehr das Ziel, die Struktur des im Modell abgebildeten Systems aus den Ein- und Ausgaben kennen zu lernen, sondern untersucht die aus der Veränderung der Eingabegrößen C unter Berücksichtigung der Modelleigenschaften f entstehenden Ausgabegrößen P . Dieser Vorgang wird auch *Analyse* genannt. Je nach Art des Modells kann die Analyse analytisch, numerisch oder simulatorisch durchgeführt werden.

Betrachtet man die Interaktion in einem System, wie vorher bereits beschrieben, als Funktion f , so beschreibt eine analytische Lösung, dass die Ergebnisse in geschlossener Form darstellbar sind. Ist dies nicht der Fall und liegt die Funktion f lediglich implizit vor, kann eine numerische Lösung berechnet werden. Lassen sich die Zusammenhänge in einem Modell jedoch lediglich als eine Menge von Zusammenhängen und Abhängigkeiten analytischer und/oder numerischer Art darstellen, so ist eine Lösung nur durch schrittweises Durchspielen der Abhängigkeiten simulatorisch möglich. [18]

Eine Simulation setzt also im Umkehrschluss immer ein simulatives Modell voraus, auf dessen Grundlage die Simulation durchgeführt wird. Sie beschreibt demnach die

Analyse eines als Menge von Zusammenhängen und Abhängigkeiten bestehenden Systems, einem simulativen Modell.

Eine erweiterte Definition von Simulation findet sich auch in den VDI Richtlinien 3633. Hier wird unter einer Simulation

„... ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell...“ [87]

verstanden.

Besteht das simulative Modell nun lediglich aus Zusammenhängen und Abhängigkeiten, die auf thermisches Verhalten zurückzuführen sind, spricht man kurz von einem thermischen Modell. Die thermische Simulation beschreibt somit, folgt man den vorherigen Definitionen,

die Analyse des thermischen Verhaltens eines Modells mit dem Ziel, die real auftretenden Zusammenhänge mit möglichst geringem Aufwand, dabei jedoch möglichst exakt abzubilden,

und ist somit eine Untergruppe der Simulation.

3.2 Grundlagen der thermischen Simulation

3.2.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Wurzeln der thermischen Simulation liegen im Bereich der Grundlagenforschung der Physik. Hier wurde meist mit materiellen Modellen gearbeitet, auf deren Basis analytische Analysen durchgeführt wurden. Hierbei standen gezielt einzelne Phänomene, wie beispielsweise der Wärmetransport in Folge Wärmeleitung im Fokus. Schnell wurde das auf diese Weise entstandene Verständnis auch auf andere Disziplinen, wie zum Beispiel den Maschinenbau, übertragen. [62]

Mit Fortschreiten der Entwicklung entstanden so an die jeweils gegebenen Fragestellungen angepasste und häufig hoch spezialisierte Modelle. Nachdem die Fragestellungen und Modelle immer komplexer, die reale Modellierung häufig nicht mehr wirtschaftlich, die Arbeit mit formalen Modellen wesentlich einfacher war und analytische Lösungen kaum mehr gefunden werden konnten, wurden Modelle mit lediglich implizit vorliegenden Interaktionen, numerische Modelle, unter Zuhilfenahme von EDV-Systemen entwickelt. Beschleunigt wurde dies durch den rasanten Entwicklungsprozess in der EDV. [2]

Viele dieser von den anderen Disziplinen übernommenen, aber auch die in diesen Disziplinen neu entwickelten Modelle wurden im Laufe der Zeit immer weiter an die jeweilige Fragestellung angepasst und im Detaillierungsgrad ihrer Berechnung verfeinert. Der Übergang von den numerischen zu den simulativen Modellen war und ist hierbei fließend. Die Erstellung und Analyse dieser Modelle erfolgt ausschließlich EDV-basiert in speziellen Programmen. Diese sind heutzutage im Bereich der thermischen Simulation für nahezu alle thermischen Aspekte zur Berechnung von Materialien, Bauteilen, Gebäuden und Quartieren in beinahe unbegrenzter Auflösung vorhanden. [86]

3.2.2 Anwendungsgebiete und Verfahren

Durch die Betrachtung von thermischen Prozessen in den unterschiedlichsten Bereichen in Wirtschaft und Forschung ist das Anwendungsgebiet für die thermische Simulation sehr weit. Es reicht von Anwendungen in der Biologie, Chemie über Maschinenbau, Informatik bis zum Baubereich.

Ein thermisches Modell ist, folgt man der Definition aus dem vorherigen Kapitel, die vereinfachte Nachbildung real ablaufender thermisch-dynamischer Prozesse mittels unterschiedlichster Komponenten. Hierunter fallen Subsysteme wie Materialien, Bauteile, Räume, Gebäude, Gebäudekomplexe, Quartiere oder Kombinationen dieser. Die abgebildeten thermisch-dynamischen Prozesse sind dabei die Wärmetransportvorgänge Wärmeleitung, -strömung, -strahlung, sowie Speichervorgänge und alle Prozesse der „Energieerzeugung“ und Wandlung [37]. Die Berücksichtigung der Wärmeströmung wird jedoch lediglich in sehr weit entwickelten strömungsmechanischen Simulationsprogrammen berücksichtigt. Die Experimente an diesen Modellen werden ausschließlich am Computer durchgeführt. Hiermit kann gewährleistet werden, dass die Eingabegrößen bei jedem Experiment gleich bleiben und damit die beobachtete Ausgabe, Reaktion des Systems auf lediglich eine geänderte kontrollierbare Eingabegröße, variabel, explizit beobachtet werden kann.

Die verwendeten Subsysteme zur Erstellung eines thermischen Modells werden zunächst mittels Abbildung des realen auf ein modellhaftes System erzeugt. Dies erfolgt durch analytische, numerische oder ersetzende Verfahren, je nach Art des zu erstellenden Modells.

Analytische Verfahren

Analytische Verfahren beruhen auf der mathematisch geschlossenen Beschreibung des zu betrachtenden Systems. Die gefundenen Lösungen sind allgemeingültig. Eingesetzt werden analytische Verfahren meist nur für einfache Systeme, da diese Verfahren bei komplexeren Systemen schnell sehr umfangreich werden und teilweise keine geschlossene Lösung mehr gefunden werden kann.

Verwendet werden häufig spezielle Lösungen des Fourier-Ansatzes für die periodisch thermische Beanspruchung von einzelnen Bauteilen, die Laplace-Transformation bei Wärmeleitungsproblemen oder analytische Näherungsverfahren für Einschichtkonstruktionen. [42]

Anwendung finden diese Verfahren meist nur in der Berechnung von einzelnen Wärmetransportvorgängen in klar definierten Umgebungen, wie beispielsweise der Wärmeleitung durch ein mehrschichtiges Bauteil.

Numerische Verfahren

Numerische Verfahren beruhen auf der numerischen Lösung von analytischen Problemen. Hierdurch können analytisch nicht mehr lösbare Probleme untersucht werden. Das Prinzip beruht nach [42] auf der Einführung finiter Differenzen bzw. Elemente, wodurch die analytischen Differentialgleichungen in Differenzgleichungen übergehen, mit deren Hilfe dann Lösungen gefunden werden können.

Durch die Verwendung von numerischen Verfahren können komplexere Systeme betrachtet werden, auch die Kombination verschiedener numerischer Systeme ist möglich. Zum Einsatz kommen beispielsweise Verfahren nach Johannsen, Binder-Schmidt und Crank-Nicolson.

Die Berechnung der nach dem numerischen Verfahren erstellten Modelle ist nicht mehr händisch möglich und wird ausschließlich EDV-basiert durchgeführt [16]. Verwendet werden diese numerischen Verfahren aktuell, um nahezu alle Systeme, die im Rahmen von thermischen Simulationen analysiert werden, modellhaft zu erstellen. Ein Hauptgrund liegt hierbei darin, dass numerisch erzeugte Modelle nahezu unbegrenzt miteinander verknüpft werden und so auch sehr komplexe Systeme abgebildet werden können.

Ersetzende Verfahren

Neben den analytischen und numerischen Verfahren, die sehr gut für white-box Systeme verwendet werden können, werden ersetzende Verfahren häufig für black-box Systeme verwendet. Gertis definiert diese ersetzenden Verfahren für Probleme der Wärmeleitung wie folgt:

“Analogiemodelle sind Modelle mit deren Hilfe Probleme der Wärmeleitung auf analoge Probleme der Physik übertragen und gelöst werden können.“ [42]

Ziel dieser Verfahren ist es, die meist nicht beobachtbaren Interaktionen im System mittels sich analog verhaltender, bekannter Systeme abzubilden. Hierbei werden sowohl einzelne als auch zusammengesetzte bekannte Systeme verwendet. Darüber hinaus kommen ersetzende Verfahren auch dann zum Einsatz, wenn die zu betrachtenden Systeme sehr komplex sind und deshalb stark vereinfacht werden sollen.

Beispiele für ersetzende Verfahren sind elektrische oder hydraulische Analogiemodelle oder die Response-Factor-Methode. [60]

Unabhängig von der Wahl des Verfahrens muss die Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden. Dies wird durch den Vergleich der simulierten Ausgabegrößen mit der Realität überprüft (Validierung). Um diesen Vergleich ziehen zu können, müssen die Ausgabegrößen des realen Systems gemessen werden. Um diese Messungen durchführen zu können, werden Teil- oder Gesamtsysteme als materielle Modelle erstellt, experimentell untersucht und die messtechnisch erfassten Ergebnisse mit den simulierten Ausgabegrößen verglichen. Nur wenn die Abweichungen der Ergebnisse zwischen dem realen und dem modellierten System klein sind, können aus den Beobachtungen des simulierten Systems Rückschlüsse auf das reale System getroffen werden. [37]

3.3 Thermische Simulation in der Bauphysik

3.3.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Simulation in der Bauphysik beginnt mit der Entstehung der Disziplin selbst als Experimentieren an materiellen und formalen Modellen. Sie wird von Anfang an stark EDV-lastig meist an formalen Modellen durchgeführt und anschließend durch Experimente an materiellen Modellen validiert.

Die Bauphysik als eigenständige Disziplin in den Ingenieurwissenschaften ist eine sehr junge Disziplin, auch wenn die unter dem Begriff Bauphysik zusammengefassten Themengebiete Brandschutz, Schallschutz, Wärmeschutz, Feuchteschutz und Akustik teilweise bis auf die Anfänge des Bauens zurückgehen. Künzel beschreibt die Bauphysik als eine aus einem Zweig der technischen Physik entstandene Disziplin, die sich in den fünfziger und sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt hat [58, S. 6]. Bis zu diesem Zeitpunkt waren die zu untersuchenden Systeme meist durch materielle Modelle abgebildet und wurden messtechnisch untersucht. Ab diesem Zeitpunkt wurden vornehmlich formale Modelle entwickelt, die durch die parallele Entwicklung von Computern meist formal umgesetzt und EDV-gestützt analysiert wurden.

Nach van Treek [86] wurden die ersten Softwareentwicklungen bereits in den sechziger Jahren gemacht und unterschiedlichste Modelle und Methoden publiziert, die den konvektiven Wärmetransfer oder vereinfachte numerische Modelle berechnen konnten. Für viele der heute verwendeten Simulationsprogramme liegen die Wurzeln einzelner Quellcodes in den frühen siebziger Jahren, die auf der Grundlage der bereits in den sechziger Jahren entwickelten Modelle beruhen. In den achtziger Jahren kam die sog. integrierte Modellierung auf, die neben den thermischen auch visuelle und akustische Effekte berücksichtigte.

Heutzutage erlauben es leistungsstarke Prozessoren, detaillierte Berechnungen in relativ kurzer Zeit zur Beantwortung nahezu aller Fragestellungen der Bauphysik durchzuführen. Die Entwicklung ging hierbei von statischen Berechnungen einzelner Komponenten schnell auf die Bilanzierung über größere Zeiträume bis hin zu den heute beinahe ausschließlich verwendeten dynamischen Berechnungen über.

3.3.2 Klassifikation der verwendeten Programme

Die Programme, die aktuell zur Analyse der thermischen Modelle eingesetzt werden, greifen zum größten Teil auf bereits validierte Subsysteme zurück. Diese werden, je nach Fragestellung, durch Kombination zu einem Gesamtsystem verbunden. Einzelne Programme unterscheiden sich dabei in der Art und Weise, wie diese Kombination der Subsysteme durchgeführt wird. Zu Beginn der Entwicklung der Simulationsprogramme wurden hierzu der Quellcode der einzelnen Subsysteme in einem Quellcode zusammengefasst und die Verbindungen zwischen den Subsystemen programmiertechnisch umgesetzt [48]. In später entwickelten Programmen werden die Subsysteme innerhalb einer graphischen Oberfläche händisch platziert, mittels graphischer Verbindungen verknüpft und spezifiziert [83]. Eine weitere Methode die bei aktuellen Neu- und Weiterentwicklungen angewendet wird, ist die vollständige graphische Eingabe der Subsysteme, bei der lediglich die Spezifika der Subsysteme händisch modelliert werden und die Verknüpfung vollautomatisiert, programmintern durchgeführt wird [34].

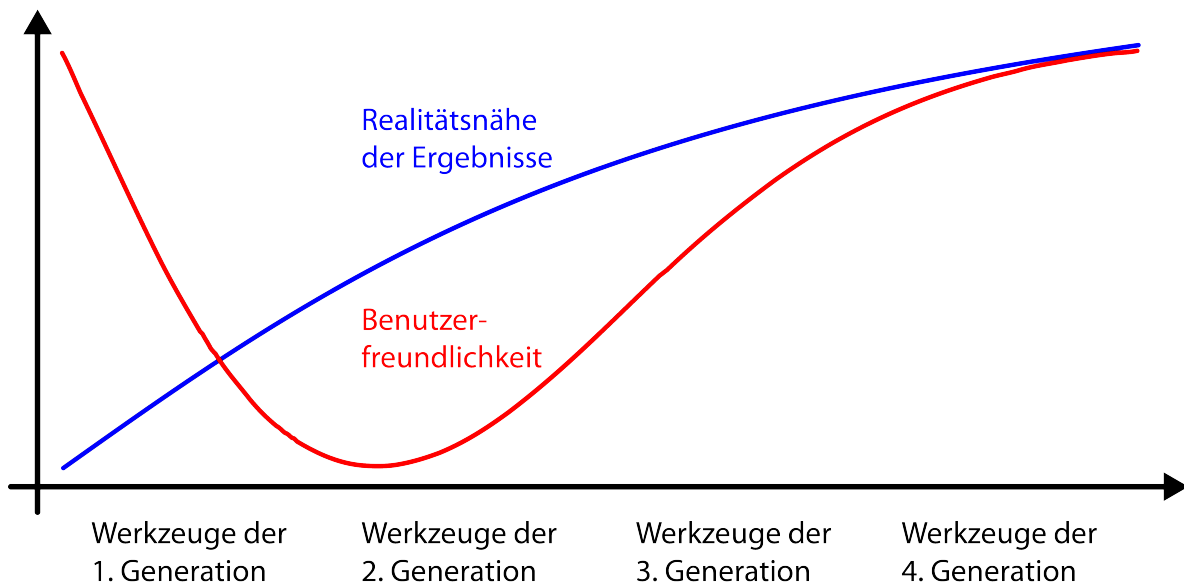


Abbildung 6: Verhältnis der Übertragbarkeit und Nutzerfreundlichkeit von Simulationsprogrammen eingeteilt in vier Generationen nach Morbitzer [67, S. 23]

Nach Morbitzer [67] können diese Simulationsprogramme, nach Abbildung 6, in vier Generationen eingeteilt werden. Die beiden Hauptkriterien der Klassifizierung sind die Realitätsnähe der Ergebnisse und die Benutzerfreundlichkeit. Aktuelle Programme werden nach dieser Klassifizierung in die 3. Generation eingegliedert, wobei die Forschung und Entwicklung daran arbeitet, die Lücke zu Werkzeugen der 4. Generation zu schließen.

Im Zuge dieser Entwicklung veränderte sich auch die Zielrichtung, welche für die thermischen Simulationen eingesetzt wird. Waren in Programmen der ersten Generation hauptsächlich Einzelwerte von Interesse, veränderte sich dies mit der Betrachtung zu immer mehr ganzheitlichen Ansätzen ebenso. Der Begriff, der damit sehr stark in Zusammenhang steht, ist der der *Building Performance Simulation* (BPS), der für die ganzheitliche Betrachtung von Gebäuden mittels thermischer Simulation steht. [86]

Durch die Entwicklung immer einfacher bedienbarer Werkzeuge, bei steigender Realitätsnähe der Ergebnisse, kommen thermische Simulationen immer häufiger zum Einsatz. Die aktuellen Bestrebungen im Bereich des *Building Information Modelling* (BIM), das den einfacheren Informationsaustausch zwischen den am Bau Beteiligten ermöglicht, führen auch dazu, dass Simulationen leichter in den Planungsprozess eingegliedert werden können [7]. Daneben sind auch normative Grundlagen geschaffen, thermische Simulationen im Planungsprozess einzusetzen. Ein Beispiel hierfür ist der sommerliche Wärmeschutz nach DIN 4108 Teil 2 [28], der explizit mittels thermischer Simulation bestimmt werden kann. Darüberhinaus ist die fortschreitende Verbreitung von Nachhaltigkeitszertifizierungen, in denen immer häufiger zu thermischen Simulationen geraten wird, eine treibende Größe für die Entwicklung neuer Werkzeuge, welche aktuell stark fokussiert wird.

Neben dieser Entwicklung werden thermische Simulationen immer häufiger in multidomänen Umgebungen, als ein Baustein einer umfänglicheren Betrachtung von Bauwerken verwendet. Hier werden beispielsweise statische Untersuchungen parallel zum thermischen Verhalten eines Gebäudes untersucht [4]. Zukünftig ist zu erwarten, dass diese multidomänen Betrachtungen an Bedeutung zunehmen.

Ein weiterer Aspekt ist die Verschmelzung unterschiedlicher Skalenebenen innerhalb eines Programms. Ein Beispiel hierfür ist das Programm Wufi-Plus des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, das sowohl auf der Skalenebene des Raumes als auch auf der Skalenebene der Bauteile sowie in den Domänen thermisch und hygrisch Berechnungen durchführt. [40]

4 Optimierung – Stand des Wissens

4.1 Definitionen

4.1.1 Begriffsbestimmung Optimierung

Das Ziel der Beschäftigung mit Modellen und der darauf basierenden Simulation war schon von Beginn an darauf ausgerichtet, das zu untersuchende System zunächst zu verstehen und darauf aufbauend so gut als möglich zu verbessern. Der Begriff *Optimierung* steht dabei als Synonym für diese Suche nach der besten Lösung. Das Fremdwörterbuch beschreibt den Vorgang des Optimierens darüber hinaus als das Finden der günstigsten Lösung für eine bestimmte Zielsetzung [32].

Formalisiert betrachtet ist die Optimierung in diesem Fall die Mini-, oder Maximierung einzelner oder mehrerer Ausgabegrößen P durch die Veränderung der kontrollierbaren Eingabegrößen C unter Berücksichtigung der unkontrollierbaren Eingabegrößen U , deren Zusammenhang durch die Interaktionen in einem System, ausgedrückt durch die Funktion f , berücksichtigt wird. Im Rahmen von Optimierungen spricht man dann von der Zielfunktion f und den Variablen P . [18]

Nguyen et al. beschreibt Optimierung als das

Vorgehen, ein System oder Modell so gut als irgend möglich zu verbessern oder es so effektiv wie möglich zu machen. [70]

Des weiteren beschreibt sie die Optimierung im mathematischen Kontext als

das Finden der besten Lösung eines Problems aus dem Raum aller möglichen Alternativen. [70]

Hieraus leitet sie eine Definition von Optimierung im Rahmen von thermischen Simulationen ab, indem der Begriff als Synonym für einen automatisierten Prozess, der sich vollständig auf thermische Simulation und mathematische Optimierung gründet, verwendet wird. [70]

Die Erweiterung dieser Definition liegt den nachfolgenden Betrachtungen zu Grunde. Optimierung ist demnach

der (automatisierte) Prozess, die beste Lösung eines Problems, das mittels Simulation bestimmt werden kann, aus allen möglichen Alternativen zu finden.

Optimierung kann, für die nachfolgenden Betrachtungen, mittels zweier grundsätzlich unterschiedlicher Herangehensweisen, der manuellen und der automatisierten Optimierung definiert werden.

4.1.2 Manuelle Optimierung

Im Rahmen der manuellen Optimierung werden nach der Erstellung des Modells händisch einzelne Variablen verändert und die Ergebnisse neu berechnet. Durch geschickte Wahl der zu verändernden Variablen kann so abgeschätzt werden, wie sich die Zielwerte aus der Zielfunktion gegenüber der Veränderung verhalten. Mittels dieser Kenntnisse können dann die so gefundenen signifikanten Variablen in der Weise verändert werden, dass ein den Vorgaben entsprechend optimales Ergebnis erzielt wird. Häufig muss dieser Prozess jedoch mehrmals durchschritten werden, um zum optimalen Ergebnis hinsichtlich der vorher festgesetzten Zielwerte zu kommen. Ein beispielhafter Ablauf einer manuellen Optimierung ist in Abbildung 7 dargestellt.

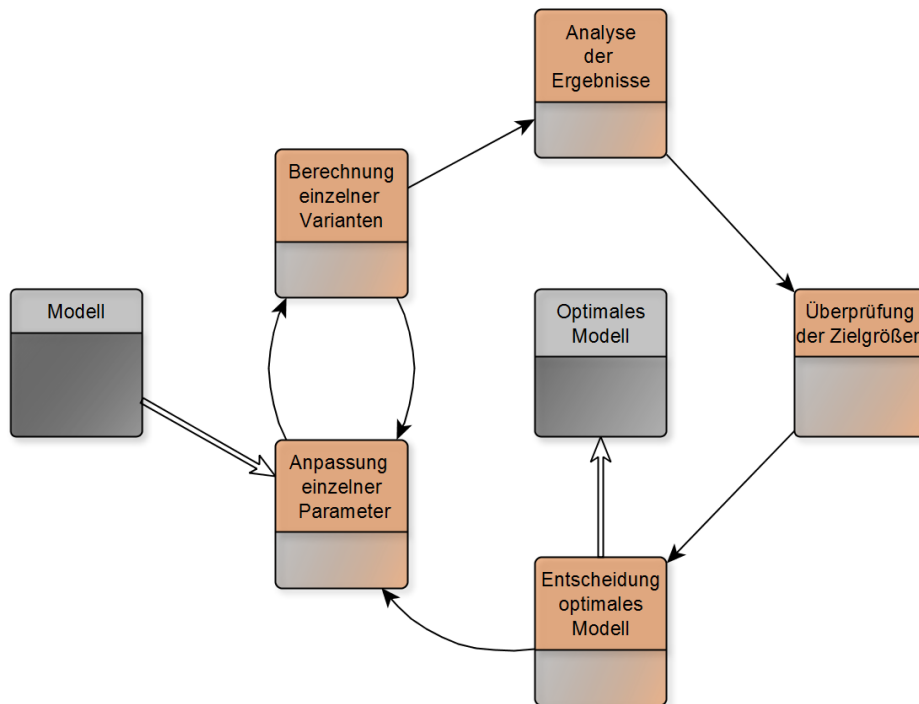


Abbildung 7: Schematisches Ablaufdiagramm einer manuellen Optimierung

Dieses Vorgehen fordert ein hohes Maß an Erfahrung des Anwenders bezüglich der Parameterauswahl und Ergebnisinterpretation, da ansonsten nur mit sehr hohem Zeitaufwand ein Optimum gefunden werden kann. Doch auch dann ist diese Methode zeitaufwändig und fehleranfällig, da eine Berechnung des gesamten Ergebnisraumes nur schwer möglich ist und durch die händische Anpassung der Variablen leicht Fehleingaben entstehen können.

Wird eine Optimierung nach der manuellen Methode durchgeführt, geschieht dies einerseits ausschließlich durch erfahrene Anwender und andererseits werden die gefundenen Ergebnisse nach Ausführung des Optimierungsobjektes mittels Messdaten validiert. Nur hierdurch kann sichergestellt werden, dass das berechnete Ergebnis ein Optimum darstellt und die Erfahrung des Anwenders gesteigert wird.

4.1.3 Automatisierte Optimierung

Mit dem Fortschreiten der Entwicklung von mathematischen und computertechnischen Möglichkeiten im Bereich der Optimierung und durch die immer stärker in den Fokus rückende ganzheitliche Betrachtung von Gebäuden, wird die manuelle Optimierung, gerade auch im wissenschaftlichen Bereich, immer mehr durch eine automatisierte Optimierung ersetzt. Diese Entwicklung kann deutlich durch die steigende Zahl an Veröffentlichungen in diesem Themenbereich abgelesen werden, die in Abbildung 3 dargestellt ist.

Unter einer automatisierten Optimierung versteht man eine Optimierung, bei der die Veränderung der Variablen sowie die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich der optimalen Lösung durch einen automatischen Prozess durchgeführt wird. Gegenüber der manuellen Simulation bietet sich der Vorteil, dass weitaus geringere Anforderungen an den Anwender gestellt werden und viel mehr Varianten in kürzerer Zeit berechnet und ausgewertet werden können. Zudem besteht durch diese Erhöhung der Anzahl der Varianten die Möglichkeit, Optima zu finden, die unter Verwendung der manuellen Simulation nur schwer, oder gar nicht gefunden werden können. Nachteile ergeben sich jedoch dadurch, dass durch die automatische Auswahl und Berechnung der Varianten häufig eine Vielzahl an Berechnungen durchgeführt werden, welche zur Findung des Optimums nicht notwendig sind, wodurch die Berechnungen meist sehr zeit- und rechenleistungsintensiv sind. Ein beispielhafter Ablauf einer automatisierten Optimierung ist in Abbildung 8 dargestellt.

Zur Anwendung kommen aktuell sowohl *generische* (Kapitel 4.3.2) als auch *angepasste* (Kapitel 4.3.2) Werkzeuge, in denen alle Arten von Optimierungsalgorithmen implementiert sind.

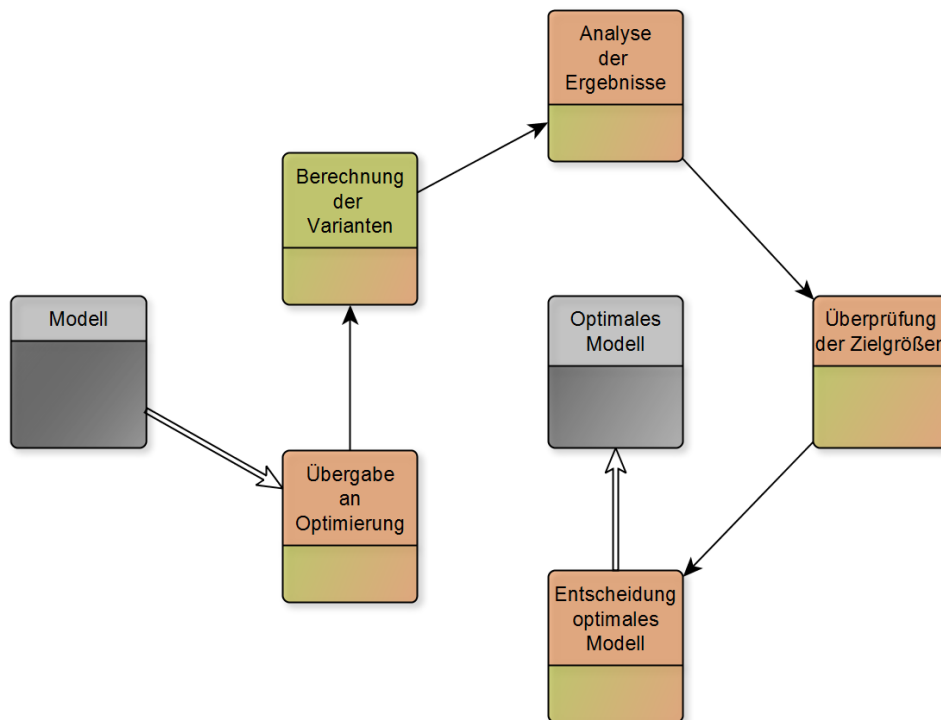


Abbildung 8: Schematisches Ablaufdiagramm einer automatisierten Optimierung

4.2 Grundlagen der Optimierung

Die Grundlagen der Optimierung liegen im Bereich der Mathematik. Es wird, ausgehend von einer mathematischen Beschreibung der Optimierung, eine Überleitung zur Optimierung in den Bereich der thermischen Simulation vorgenommen werden.

4.2.1 Mathematische Grundlagen

Im mathematischen Sinne klassifiziert man Optimierungsprobleme in skalare und vektorbasierte Probleme [18]. Skalare Optimierungsprobleme sind alle Probleme, deren Ziel es ist, die Extremwerte der reellwertigen Funktion $f(x)$ unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen $x \in X$ mittels der Abbildung $f : V \rightarrow \mathbb{R}$ und $X \subseteq V$ zu finden. Hierbei ist X die Menge aller nutzerspezifischen Randbedingungen, welche den zu untersuchenden Optimierungsraum definiert und alle möglichen

Varianten beinhaltet, V die Menge aller Randbedingungen, innerhalb derer die Funktion $f(x)$ gültig ist [53]. Vektorbasierte Probleme können analog beschrieben werden mit dem Unterschied, dass nicht nur eine, sondern mehrere Zielfunktionen gleichzeitig untersucht werden, was formal durch $f_i : V \rightarrow \mathbb{R}^n \quad (i = 1, \dots, r)$ ausgedrückt wird. Wird über den gesamten zulässigen Bereich optimiert, spricht man von globaler Optimierung, sonst von lokaler Optimierung [53]. Neben der Betrachtung der Dimension des Optimierungsproblems wird bezüglich der Anzahl der betrachteten Zielgrößen in *Single-Objektive-Optimierung* (SOO) für eindimensionale, sowie *Multi-Objektive*-(MOO) und *Pareto-Optimierung* für mehrdimensionale Zielgrößenräume unterschieden [76] [80].

4.2.2 Klassifizierung von Optimierungsproblemen

Neben der Unterscheidung der Optimierungsprobleme auf Grundlage der Dimension des zu untersuchenden Problems wird auch eine Klassifizierung hinsichtlich der Art der Ziel- und Nebenbedingungsfunktion in lineare und nichtlineare Optimierungen verwendet. Lineare Optimierung beschreibt dabei Optimierungen, deren Zielfunktion und alle Nebenbedingungen lineare Gleichungen sind. In dieser Klasse ist jedes *lokale Optimum* auch *globales Optimum*. [11]

Nichtlineare Optimierung besitzt demgegenüber Zielfunktionen und/oder Nebenbedingungen, die nicht linear sind. Sie wird weiterhin bezüglich des gesuchten Optimums in lokale und globale nichtlineare Optimierung unterschieden. Im Gegensatz zum Problem der lokalen Optima, gilt das der globalen Optima aktuell noch als quasi ungelöstes Problem der Mathematik, da bislang kein mathematischer Beweis geführt werden konnte, der ein globales Optimum im Optimierungsraum belegt [90]. In beiden Bereichen existieren jedoch unterschiedlichste Methoden, um die

Optima zu finden. Je nachdem, welche Informationen über die Optimierungsfunktion vorliegen, unterscheidet man in white-box Methoden, wenn die Struktur von $f(x)$ genutzt wird, und black-box Methoden, wenn keine Informationen über die Struktur der Zielfunktion vorhanden sind, ähnlich dem Vorgehen der Untersuchung der Systeme in Kapitel 3.1.1.

Im Rahmen der white-box Methode kann die Zielfunktion meist analytisch ausgewertet werden. Bei black-box Methoden werden lediglich die Auswertungen einiger Punkte der Zielfunktion verwendet. Zum Finden des Optimum oder der (lokalen) Optima werden hier unterschiedliche Suchverfahren eingesetzt, die sich in *deterministisch*, *stochastisch*, *metaheuristisch*, *populationsbasiert* und *metamodellbasiert* einteilen lassen. [11]

Deterministische Verfahren gehen von einem oder mehreren Startpunkten aus und bestimmen auf dieser Basis neue Punkte, an denen die Zielfunktion ausgewertet wird. Dies wird solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Stochastische, metaheuristische und populationsbasierte Verfahren erzeugen ebenfalls Ergebnisse aus vorhergehenden Evaluierungen der Zielfunktion zur Optimierung, erzeugen neue Suchpunkte allerdings per Zufallszahlen. Die Idee bei metamodellbasierten Verfahren ist, aus einer gewissen Anzahl an ausgewerteten Punkten ein neues, (Meta) Modell zu erzeugen, mit dessen Hilfe ein Optimum leichter gefunden werden kann. [18]

Je nach verwendetem Verfahren existieren unterschiedliche Optimierungsalgorithmen die zur Suche des Optimum oder der Optima eingesetzt werden. Diese lassen sich wiederum nach unterschiedlichen Kriterien gruppieren. Beispiele für

analytische Algorithmen sind das Intervallhalbierungsverfahren (goldener Schnitt), das Downhill-Simplex-Verfahren, das Sekantenverfahren, das Gradientenverfahren, das Quasi-Newton-Verfahren und das Newton-Verfahren. Allen diesen Algorithmen gemein ist, dass sie sehr rechenintensiv, aber, außer der Methode nach Newton, auch sehr robust sind. Im Bereich der black-box-Methode und zur Suche nach globalen Optima werden häufig evolutionäre Algorithmen, Clusteranalysen oder neuronale Netze verwendet. Allen diesen Algorithmen gemein ist, dass die besten Ergebnisse erzielt werden, wenn die lokalen Optima im Optimierungsraum nach einer Gesetzmäßigkeit angeordnet sind. [41]

Neben der Unterscheidung nach white- und black-box-Problemen ist es auch notwendig, die Art der zu betrachtenden Variablen im Optimierungsraum zu betrachten. Je nach Variablenart, *kontinuierlich*, *diskret*, *binär* oder gemischt, muss die Auswahl der Algorithmen angepasst werden. [41]

Die Entwicklung der Algorithmen ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht abgeschlossen. Einerseits werden bereits bekannte Algorithmen immer wieder erweitert oder an die jeweilige Optimierungsaufgabe angepasst [46], andererseits werden neue entwickelt. Neu entwickelte Algorithmen werden vor Ihrer Verwendung meist anhand bekannter, komplexer Probleme getestet. Ein Beispiel eines solchen Problems ist die Rastring-Funktion.

Eine Darstellung der Klassifizierung von Optimierungen ist in Abbildung 9 gegeben.

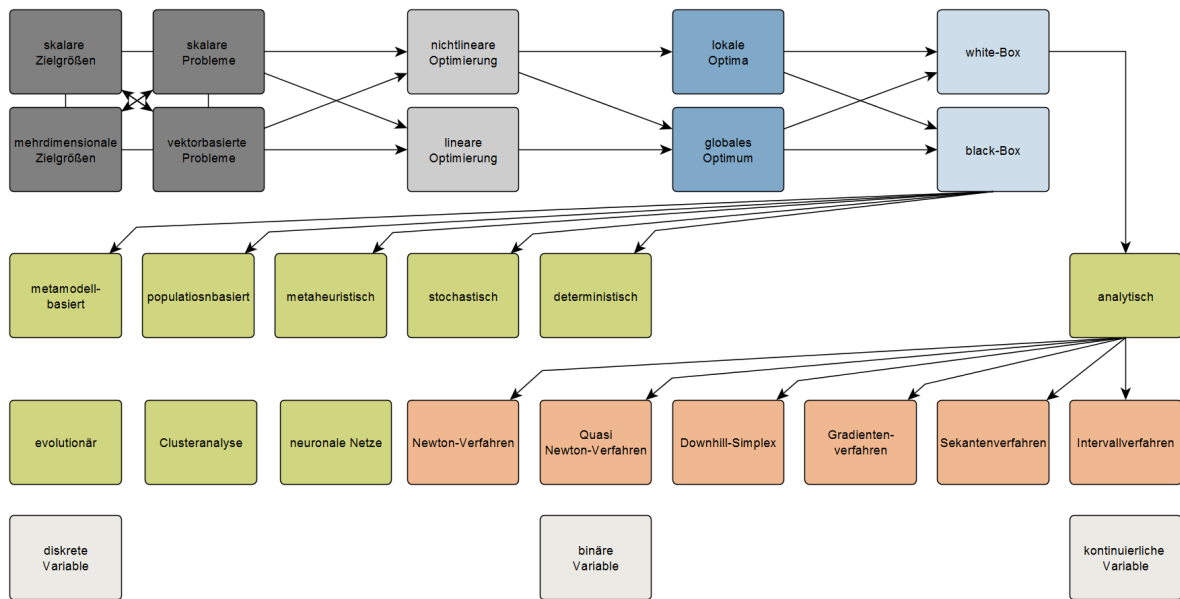


Abbildung 9: Möglichkeit der Klassifizierung eines Optimierungsproblems

4.3 Optimierung im Bereich der Bauphysik

4.3.1 Klassifikation bauphysikalischer Optimierung

Nahezu gleichzeitig mit der Entwicklung formaler Modelle im Bereich der Bauphysik wurde damit begonnen, diese mit Blick auf unterschiedliche Zielfunktionen zu optimieren. Lange Zeit wurde dabei ausschließlich das manuelle Verfahren eingesetzt. Erst mit der Entwicklung von sehr fortschrittlichen Optimierungsalgorithmen begann man auch im bauphysikalischen Bereich automatische Optimierungen anzuwenden. Die Gründe für diesen sehr späten Beginn der Verwendung von Optimierungen liegen in den Spezifika der Optimierungsprobleme. [77]

Optimierungsprobleme im Bereich der Bauphysik können nach dem im vorherigen Kapitel dargestellten Klassifikationssystem als vektorbasierte, meist nichtlineare Optimierungen mit dem Ziel ein Optimum in einer multiobjektiven Domäne mittels black-box-Verfahren zu finden, gegliedert werden. Die Gründe für diese Klassifizie-

lung liegen in den verwendeten formalen Modellen, die meist aus einem Konglomerat aus vielen Subsystemen bestehen, dynamisch berechnet werden und das zu betrachtende System meist ganzheitlich in den Blick nehmen.

Aus dieser Beschreibung lassen sich die Spezifika eines Optimierungsproblems im Rahmen einer thermischen Simulation ableiten. Zunächst werden durch die ganzheitliche Betrachtung in Kombination mit den unterschiedlichen Subsystemen meist mehrdimensionale (multiobjektive) Probleme betrachtet. Die dabei zur Anwendung kommenden Variablen können diskret, kontinuierlich oder binär sein [70]. Zudem ergeben sich aus der Kombination der Variablen in Verbindung mit den Subsystemen teilweise unstetige Verläufe der Zielfunktion, die überdies nicht explizit vorliegt [90]. Ebenso existieren meist sehr große Optimierungsräume, innerhalb derer zwar einerseits viele Variablen voneinander abhängig sind, diese Abhängigkeiten jedoch nicht trivial bestimmbar sind, wodurch meist mit einer großen Anzahl an Variablen gerechnet werden muss.

Durch das Fehlen der analytischen Informationen der Zielfunktion müssen im black-box-Verfahren die Ausgabegrößen P für jeden zu evaluierenden Punkt des Optimierungsraumes mittels Simulation bestimmt werden. Hieraus ergibt sich die Besonderheit, dass die Analyse der Zielfunktion meist länger dauert als die Bestimmung des nächsten Iterationsschrittes [90]. Die Zeit, in der ein Optimierungsproblem gelöst werden kann, ist somit direkt von der Zeit für eine Evaluierung der Zielfunktion und somit von der Simulationsdauer abhängig. Ein sich hieraus ableitendes Ziel in der Forschung um die Optimierung im Bereich der Bauphysik ist die Reduktion der Simulationsdauer. Diese wird mittels unterschiedlicher Methoden, wie beispielsweise durch Reduktion der zu betrachtenden Variablen im Optimierungsraum, Verbesse-

rung der Simulationswerkzeuge hinsichtlich der Rechengeschwindigkeit, parallele Berechnung mehrerer Simulationen und Verbesserung der Konvergenz der Optimierungsalgorithmen durch Wahl eines möglichst optimal geeigneten Algorithmus zu erreichen versucht [70].

Diese und die vorher genannten Spezifika werden gemeinhin in der Forschungsrichtung *building performance optimization* (BPO) zusammengefasst.

4.3.2 Aktuell verwendete Programme bei der Optimierung im Bereich der Building Performance Optimization

Werden bei der Optimierung nach dem manuellen Verfahren nahezu ausschließlich reine Simulationsprogramme verwendet, kommen bei der automatisierten Optimierung sowohl Simulationsprogramme, als auch reine Optimierungsprogramme und Kombinationen beider Programmarten zum Einsatz. [35]

Die im Bereich der manuellen Optimierung eingesetzten Simulationswerkzeuge bieten dem Nutzer meist nur die Möglichkeit an, Einzelvarianten intern zu speichern und deren Ergebnisse im Vergleich zueinander anzuzeigen. Alle weiteren Schritte, ein Optimum zu finden, werden dann von den Anwendern in jeweils persönlich präferierten Abläufen und Programmen durchgeführt.

Demgegenüber werden im Bereich der automatisierten Optimierung hoch spezialisierte Programme zur Optimierung eingesetzt. Diese können nach Palonen [74] in die Programmgruppen *generisch* und *angepasst* gegliedert werden, welche im Folgenden näher beschrieben werden.

Generische Programme

Unter *generisch* subsumiert man Programme, die ohne die Anpassung durch einen Benutzer, allgemeingültig, für Simulations- oder Optimierungsaufgaben genutzt werden. Diese Programme müssen zur Verwendung in der BPO zunächst aneinander gekoppelt werden. Hierbei wird, wie bei der manuellen Simulation, ein Modell erstellt und im Simulationsprogramm berechnet. Anschließend wird dieses Basismodell, meist händisch, so angepasst, dass es im Optimierungsprogramm verwendet werden kann. Erst nach dieser Anpassung des Modells wird die eigentliche, manuelle Optimierung durchgeführt.

Diese Art der Anbindung an die meist skriptbasierten Optimierungsprogramme bieten ein sehr hohes Maß an Flexibilität, mit dem Nachteil einer schlechten Handhabbarkeit bei einer hohen Komplexität im Rahmen der Anbindung.

Angepasste Programme

Als *angepasst* gelten Programme, die durch eine Anpassung eines Benutzers direkt gekoppelt sind. Hierbei ist es möglich, dass durch Anpassung eines Optimierungswerkzeuges eine oder mehrere Simulationsprogramme angekoppelt sind, oder die Optimierungsalgorithmen in ein Simulationsprogramm integriert wurden. Diese Programme sind meist einfacher in der Handhabung, da die Anbindung zwischen Optimierungsprogramm und Simulation bereits durchgeführt ist, bieten aber auf der anderen Seite eingeschränkte Möglichkeiten bei der Optimierung selbst.

Tabelle 1: Angepasste und generische Optimierungswerkzeuge im Bereich der energetischen und ökonomischen Gebäudesimulation aus [17],[70, S. 1049],[74, S. 2568]

Name	Multiobjective	Parallel-computing	Diskrete und Continuous Variables simult.	angepasst Generic
DAKOTA	+	+	+	G
GenOpt	-	+	+	G
LionSolver	+	-	-	G
MatLab toolbox	+	+	+	G
MOBO	+	+	+	G
modeFRONTIER	+	+	+	G
ParadisEO	+	?	+	G
BEopt	+	+	+	C
DER-CAM	-	-	-	C
GENE_ARCH	+	+	+	C
Homer	-	-	-	C
MIT DesignA Plug	-	-	-	C
Opt-E-Plus	+	+	+	C
TRNOPT	-	-	+	C

Beispiele aktuell verwendeter Programme

Eine nach dieser Kategorisierung gegliederte Liste von aktuell auf der Seite der IBPSA „Building Energy Software Tools Directory“ [1] gelisteten Werkzeuge ist in Tabelle 1 dargestellt.

Die Liste gibt zusätzlich zur Kategorisierung in „angepasst“ und „generisch“ auch Informationen über die Möglichkeiten der Berechnung von mutiobjektiven Problemen, parallelen Berechnungen von Simulationen und die Möglichkeit zur Berücksichtigung von diskreten und kontinuierlichen Variablen gleichzeitig der einzelnen Programme an. Ein „+“ Zeichen symbolisiert die jeweilige Möglichkeit, ein „-“ Zeichen, dass die Möglichkeit nicht besteht. Ist ein „?“ eingefügt, konnte die jeweilige Information nicht eindeutig gefunden werden.

Es zeigt sich, dass in beiden Kategorien jeweils ca. 50 % der betrachteten Programme in allen Bereichen ein „+“ Zeichen führen. Nach einer Untersuchung von [70] sind die in dieser Liste aufgeführten Programme jene Programme, welche aktuell am häufigsten verwendet werden. Hierbei sind die generischen Optimierungsprogramme GenOpt [90], MatLab toolbox [65] und DAKOTA [9] die aus dieser Liste am häufigsten verwendeten Werkzeuge im Rahmen von BPO. Bei den hier nicht explizit aufgeführten reinen Simulationstools werden EnergyPlus [68], TRNSYS [83], DOE-2 [50], ESP-r [85], EQUEST [51] und ECOTECT [64] am häufigsten verwendet. „Angepasste“ Programme finden sich in der von Nguyen et. al. veröffentlichten Studie zu häufig verwendeten Werkzeugen nicht.

Das Ergebnis der Untersuchung zeigt somit, dass Programme vorhanden sind, welche Simulation und Optimierung vereinen und auch in der Lage sind, alle notwendigen Berechnungen durchzuführen, aber auch, dass diese Werkzeuge im alltäglichen Gebrauch nicht als erste Wahl gelten, sondern vielmehr spezialisierte, generische Programme verwendet werden. Gründe hierfür können darin gefunden werden, dass diese Werkzeuge vornehmlich von professionellen Anwendern verwendet werden, die mehr Wert darauf legen möglichst viele Freiheiten bei der Programmnutzung als eine einfache Bedienbarkeit zu haben.

Neben den hier dargestellten Werkzeugen, welche als alleinstehende Simulations- oder Optimierungswerkzeuge dienen, wird im folgenden Kapitel auf die verwendeten Methoden einer Kombination aus Simulation und Optimierung eingegangen.

5 Thermisch-energetisch-ökonomische Optimierung – Stand des Wissens

5.1 Hintergrund und Problemstellung

Wie bereits im Kapitel 1 beschrieben, erfuhr die Beschäftigung mit dem Thema Optimierung in Verbindung mit thermischer Simulation in einer mehrdimensionalen Zieldomäne in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung.

Schon seit Beginn der Beschäftigung mit dem Thema BPO werden die einzelnen Methoden nach unterschiedlicher Art klassifiziert. Häufig finden hierbei die Klassifikationen nach Art der Werkzeuge, zur Optimierung verwendeter Algorithmen, Variablenart, Art der Optimierung und Art der Zielgrößen Anwendung.

Allen diesen Klassifizierungsmethoden ist dabei gemein, dass lediglich ein Teilbereich betrachtet wird und nur auf dieser Grundlage ein Vergleich zwischen den Methoden gezogen werden kann.

Eine Klassifizierung zum Vergleich der verwendeten Methoden wurde bislang jedoch noch nicht dokumentiert. Diese Klassifizierung mit dem Ziel, Unterschiede in den Herangehensweisen an das Thema BPO auf Methodenebene zu beschreiben, wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und wird im Folgenden dargestellt.

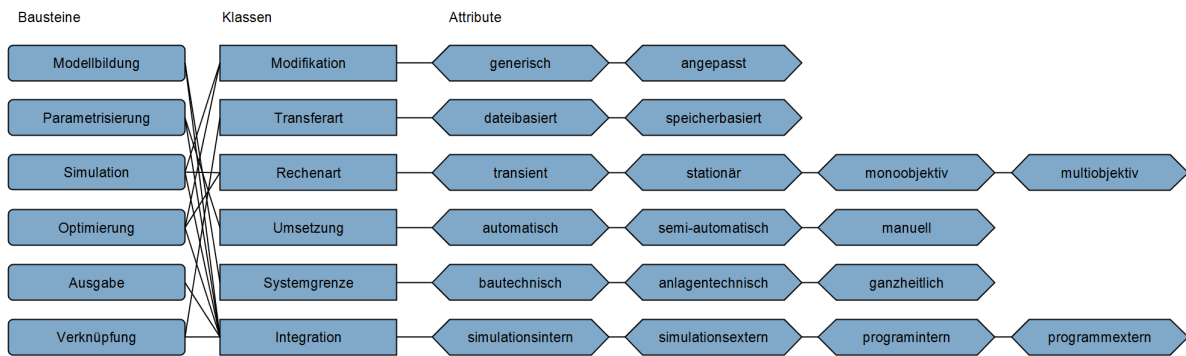


Abbildung 10: Graphische Darstellung der Klassifikation der den Methoden zu Grunde liegenden Bausteine, Klassen und Attribute

5.2 Klassifikation der Methoden

Auf Basis der Veröffentlichungen von Evins. et.al. [35] und Nguyen et.al. [70] wurde eine aufbauende Literaturrecherche zum Thema thermisch-energetisch-ökonomische Optimierung durchgeführt. Ziel dieser Recherche war, Gemeinsamkeiten in den verwendeten Methoden zu finden, um anschließend eine Klassifizierung zu erstellen.

Klassifikation

Die Basis hierfür bildeten die von den Autoren veröffentlichten graphischen Darstellungen der Methoden. Die Auswertung dieser Darstellungen ergab, dass sich alle Methoden in sechs Grundbausteine, *Modellentwicklung*, *Parametrisierung*, *Simulation*, *Optimierung*, *Ausgabe* und der *Verknüpfung* der Bestandteile, gliedern lassen. Werden diese mit den sechs Klassen Modifikation, Transferart, Rechenart, Umsetzung, Systemgrenze und Integration und insgesamt achtzehn Attributen erweitert, ist es möglich jede Methode so zu klassifizieren, dass diese vergleichbar werden. Die einzelnen Bestandteile der Methodenklassifikation sind in Abbildung 10 dargestellt.

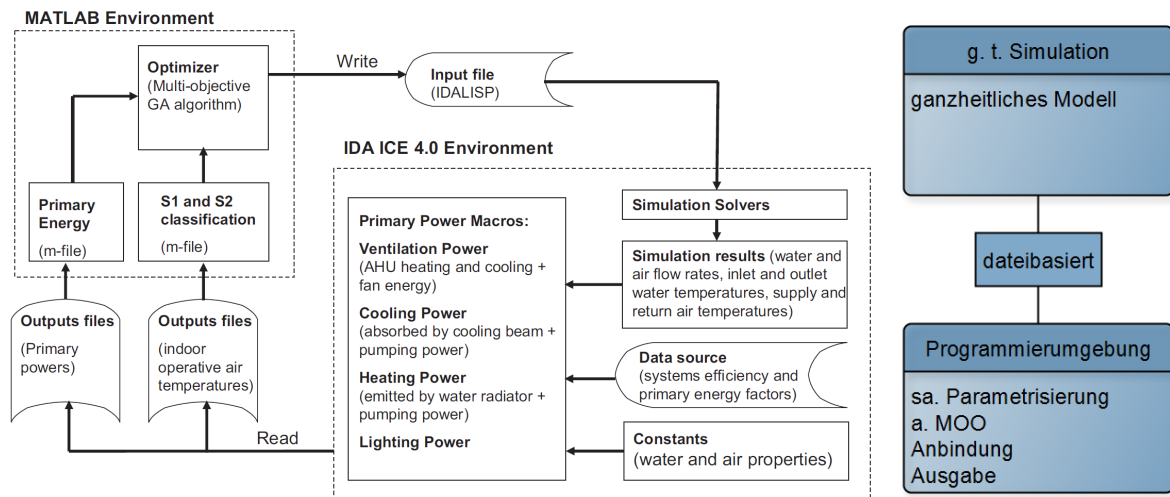


Abbildung 11: Beispielhafte Umsetzung der Bausteine und zugehörige Spezifikation einer BPO-Methode nach Hamdy [45]

Beispielhaft ist hier die von Hamdy et. al. [45] beschriebene Methode klassifiziert. Es handelt sich hierbei um ein simulationsintern erstelltes ganzheitliches Modell, das mittels eines nicht in die Programmierung integrierten, generischen Simulationprogramms transient berechnet wird. Die für die verwendete, in der Programmierung integrierte, multiobjektive, angepasste Optimierung notwendige semiautomatische Parametrisierung des Modells läuft dabei ebenfalls innerhalb der Programmierung ab. Die dateibasierte Verknüpfung der Optimierung und der Simulation wird, ebenso wie die Ausgabe der Ergebnisse, innerhalb der Programmierung durchgeführt.

Für die weiteren Betrachtungen der verwendeten Methoden ist es zielführender, diese verbale Klassifizierung in eine graphische zu überführen. Dies ist in Abbildung 11 für die eben betrachtete Methode dargestellt.

Werden die weiteren Methoden nach der gleichen Weise klassifiziert, ergeben sich je nach deren Zusammensetzung unterschiedliche graphische Darstellungen. Beispielhaft sei dies für die Methoden von [6] und [88] hier dargestellt.

Die Methode nach Verbeeck und Hens [88]

Verbeeck und Hens beschreiben eine Methode, die ebenso wie die von Hamdy et.al. beschriebene, ein ganzheitliches Modell, das mittels eines nicht in die Programmierumgebung integrierten, generischen Simulationsprogramms transient berechnet wird, verwendet. Unterschiede hinsichtlich der beiden Methoden ergeben sich auch bei den weiteren Komponenten nicht, so dass sich die Methode ebenso wie diese Methode nach Hamdy u.a., graphisch nach Abbildung 11 (links) darstellen lässt.

Die in der praktischen Ausführung unterschiedlichen Herangehensweisen der beiden Methoden, beispielsweise hinsichtlich der verwendeten generischen Simulationwerkzeuge, TRNSYS und IDA ICE, werden in der Methodendarstellung nicht berücksichtigt, da beide Methoden ein generisches Simulationswerkzeug verwenden. Aus der nach der Klassifizierung erzeugten Darstellung kann abgelesen werden, dass das grundsätzliche Vorgehen der beiden Methoden identisch ist.

Die Methode nach Ascione [6]

Ebenso wie Hamdy und Verbeeck verfährt Ascione [6]. Es ergibt sich aus der Klassifikation der Methode jedoch der Unterschied, dass die Methode, die er anwendet, nicht mittels einer semiautomatischen Parametrisierung arbeitet, sondern eine manuelle Parametrisierung vornimmt. Die Methode bedient sich demnach einer zusätzlichen Komponente. Die graphische Darstellung dieser Methode ist in Abbildung 12 dargestellt und gegenüber Abbildung 11 (links) um die Komponente manuelle Parametrisierung erweitert. Durch diese Darstellung ist sofort ersichtlich, wie sich die Methoden unterscheiden.

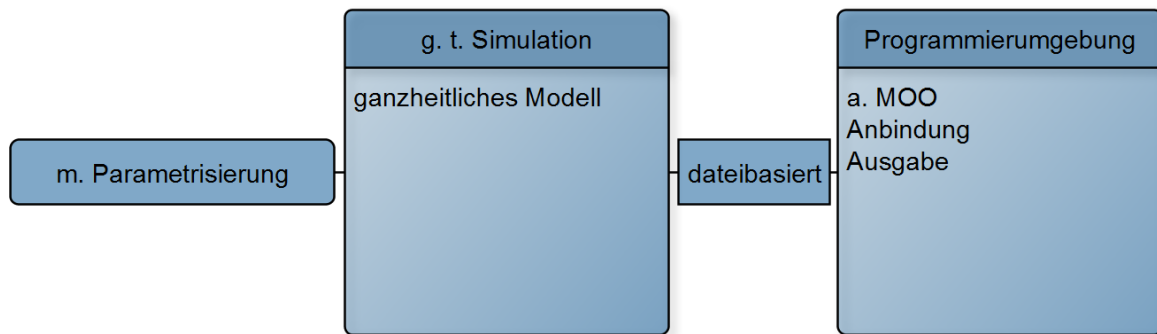


Abbildung 12: Beispielhafte Umsetzung der Bausteine und zugehörigen Spezifikation einer BPO-Methode nach Ascione [6]

Die Building Performance Optimization - Methodenlandschaft

Die weiteren untersuchten Methoden wurden auf die gleiche Weise klassifiziert und graphisch dargestellt. Ordnet man die Methoden mit möglichst vielen Übereinstimmungen in einer Matrix nahe beieinander an, so ergibt sich eine Darstellung, in der nur geringfügig voneinander abweichende Methoden zu Gruppen zusammengefasst werden können. Ein Beispiel für eine solche Gruppe bilden die drei zuvor dargestellten Methoden nach [6], [45] und [88], welche alle in der Gruppe der Methoden mit *angepasster Optimierung* zusammengefasst werden können. Jede Methode kann bei dieser Betrachtung in mehreren Gruppen eingeteilt werden, je nach dem welcher Grundbaustein der Methode als Gruppenkriterium definiert wird. So ist beispielsweise die Methode nach [6] auch in den Gruppen *interne Modellierung*, *generische Simulation* und *händische Parametrisierung* vertreten.

Für die betrachteten Methoden ergeben sich insgesamt neun einzelne Gruppen, bei denen sich die Zugehörigkeit zu einzelnen Gruppen teilweise ausschließen. Diese sind die Gruppen der *angepassten* und *generischen Optimierung*, die Gruppen der *internen* und *externen Modellierung*, die Gruppen der *automatischen*, *semiautomatischen* und *händischen Parametrisierung* und die Gruppen der *angepassten* und *generischen Simulation*. Theoretisch ergibt sich für jede Kombination aus einem Grundbaustein und einem Attribut nach Abbildung 10 eine Gruppe.

Die graphische Darstellung der analysierten Methoden kann als BPO-Methodenlandschaft beschrieben werden, anhand derer die methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen der einzelnen Autoren abgelesen werden können. Eine zweidimensionale Darstellung der BPO-Methodenlandschaft ist in Abbildung 13 gegeben. Die Gruppen sind farbig markiert dargestellt.

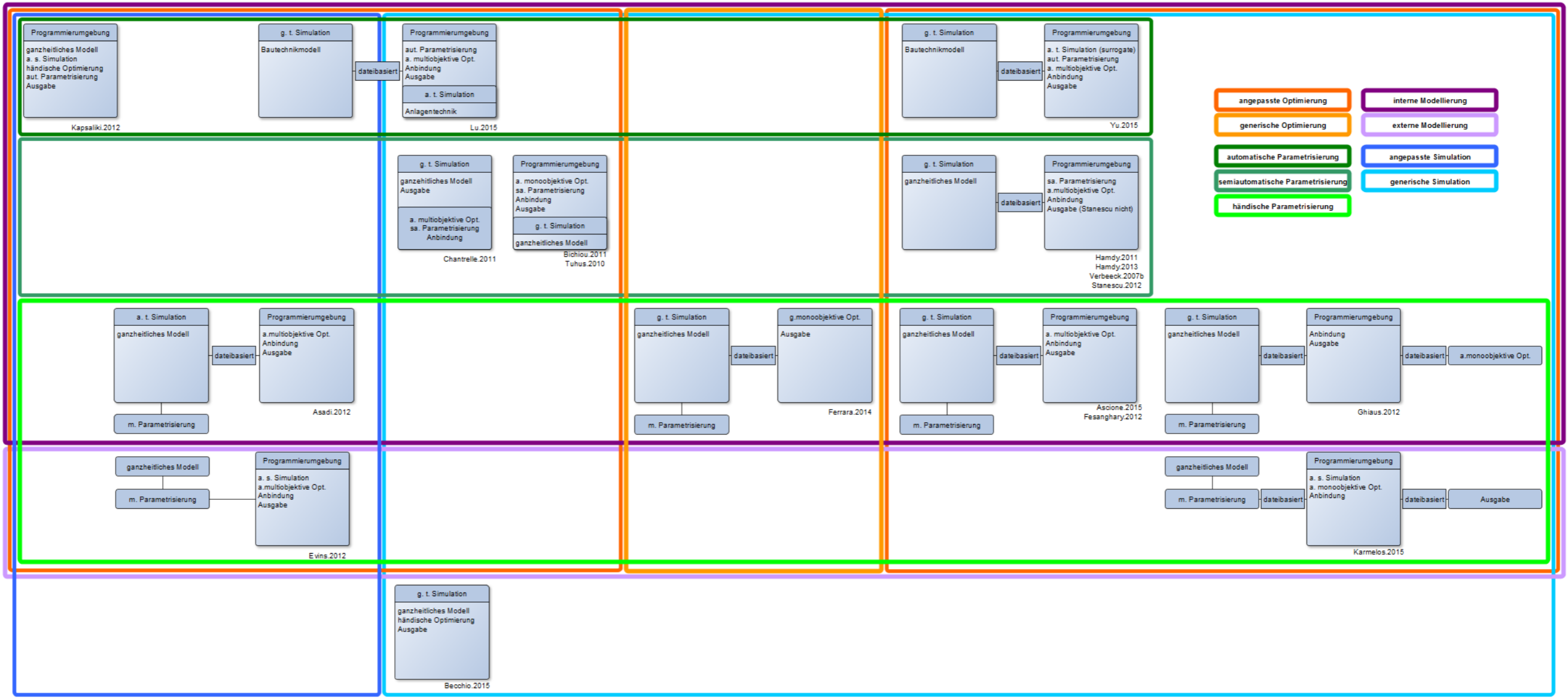


Abbildung 13: Graphische Darstellung der BPO-Methodenlandschaft auf Grundlage der Methoden von [5],[6],[10],[13],[23],[36],[38],[39],[43],[44],[45],[54],[56],[63],[82],[84],[88],[92]

Interpretation der BPO–Methodenlandschaft

Betrachtet man die BPO-Methodenlandschaft, so zeigt sich, dass lediglich sechs Methoden eine speicherbasierte Anbindung ihrer Komponenten besitzen und lediglich fünf dieser Methoden vollständig integrierte Methoden sind. Zwölf Methoden verwenden die dateibasierte Verbindung der Komponenten.

Eine ähnliche Verteilung lässt sich hinsichtlich der verwendeten Parametrisierung erkennen. Lediglich drei Methoden verwenden eine automatische, sieben eine semiautomatische und sieben eine händische Parametrisierung. Hierbei lässt sich erkennen, dass die händische Parametrisierung immer extern durchgeführt wird.

Hinsichtlich der Modellierung verwenden lediglich vier Methoden eine externe Modellierung. Die Art des verwendeten Simulationsprogramms, generisch oder angepasst, hat keinen Einfluss auf die Art der Modellierung. Auch ist keine zeitliche Komponente bei der Wahl der Einbindung der Modellierung zu erkennen.

Lediglich auf die Umsetzung der Parametrisierung scheint die zeitliche Komponente Einfluss zu haben. Zwei der betrachteten Methoden, deren Grundlage Veröffentlichungen aus dem Jahre 2015, verwenden automatische Parametrisierung. Daneben wird nur noch in der von Kapsalaki 2012 [55] vorgestellten Methode eine automatische Parametrisierung verwendet.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass innerhalb der BPO-Methodenlandschaft die meisten Methoden im mittleren rechten Bereich liegen. Klassifiziert werden können diese Methoden durch die Verwendung einer angepassten Optimierung. Eine weitere Klassifizierung lässt sich nicht vornehmen, da nahezu alle anderen Merkmale vorhanden sind.

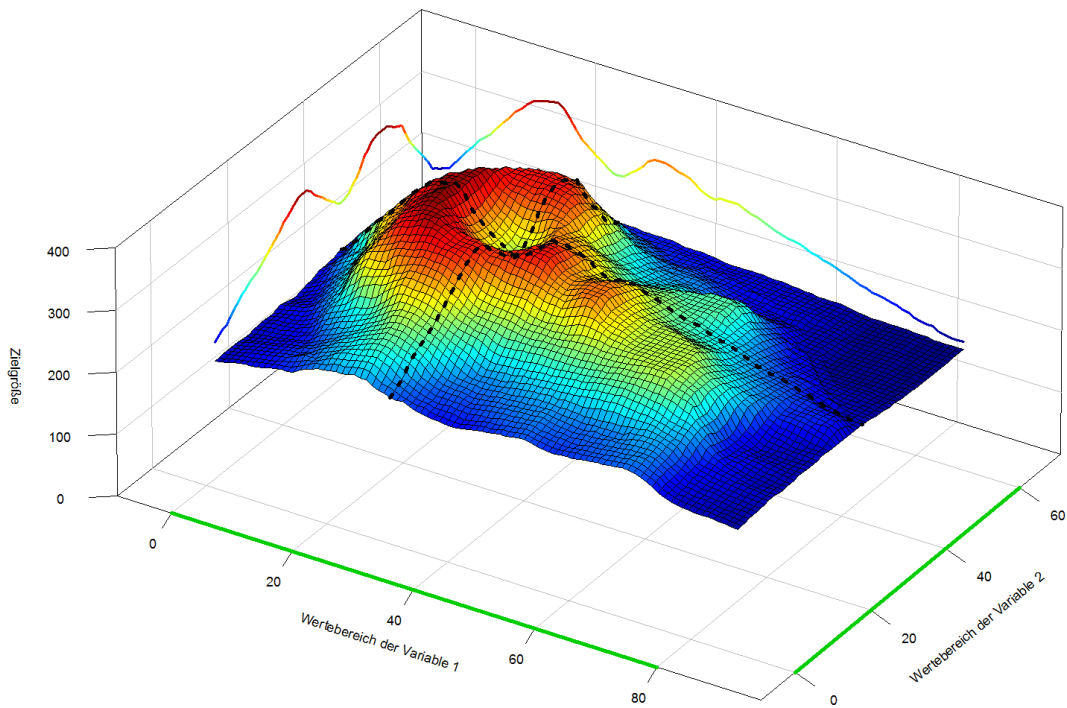


Abbildung 14: Graphische Darstellung eines zweidimensionalen Optimierungsproblems

Allen untersuchten Methoden gemein ist, neben der Einordnung in die BPO-Landschaft, dass außer den Methoden nach Chantrelle [23] alle Methoden als Prototypen erstellt wurden und für eine Anwendung auf ein anderes als das ursprüngliche Optimierungsproblem zunächst an die neue Anforderung angepasst werden müssen. Die Methode nach Chantrelle ist demgegenüber als sog. Plugin für ein generisches Simulationsprogramm entwickelt und kann somit relativ einfach innerhalb dieses Simulationsprogramms verwendet werden. Eine Anwendung in Verbindung mit einem anderen Simulationswerkzeug ist jedoch nicht möglich.

Viele der anderen vorgestellten Methoden verwenden sehr spezifisch angepasste Simulations- und oder Optimierungsverfahren oder -algorithmen, die nicht ohne weiteres im Rahmen anderer als der verwendeten Fragestellungen verwendet werden können.

5.3 Zielgrößenbetrachtung

Ebenso wie bei der Klassifizierung der Methode lassen sich für die Zielgrößenbetrachtungen Grundbausteine festlegen. Diese sind die *Zielgrößen*, die *Randbedingungen* und die *Variablen*. Definiert man die Zielgröße als z-Achse und zwei Variablen als x- und y-Achse, so spannt der Wertebereich der Variablen den Raum der Randbedingungen auf. Die maximale Anzahl der zu berechneten Varianten wird durch die Schnittpunkte der Gitterlinien auf dem Optimierungsraum definiert. Je nach Art der verwendeten Variablen, ist der Abstand der Gitternetzlinien unterschiedlich. Die Berechnung der Zielgrößen je Variablenkombination wird hierbei mittels der Zielfunktion durchgeführt. Das Optimum zeigt sich graphisch durch den niedrigsten oder höchsten Punkt der sich ergebenden Fläche aller Zielgrößen. Eine Darstellung eines zweidimensionalen Optimierungsproblems mit einer Zielgröße ist in Abbildung 14 gegeben.

Die am häufigsten im Rahmen einer BPO betrachteten Zielgrößen sind die Energiebedarfswerte, Behaglichkeitsparameter und Kosten (Abbildung 15). Die dabei verwendeten Parameter Nutzenergie-, Endenergie-, Primärenergiebedarfswert, PMV, PPD, Übertemperaturgradstunden, Herstellungs-, Nutzungskosten oder Life cycle costs (LCC) zur Klassifizierung der Zielgrößen werden je nach Fragestellung adressiert und kombiniert.

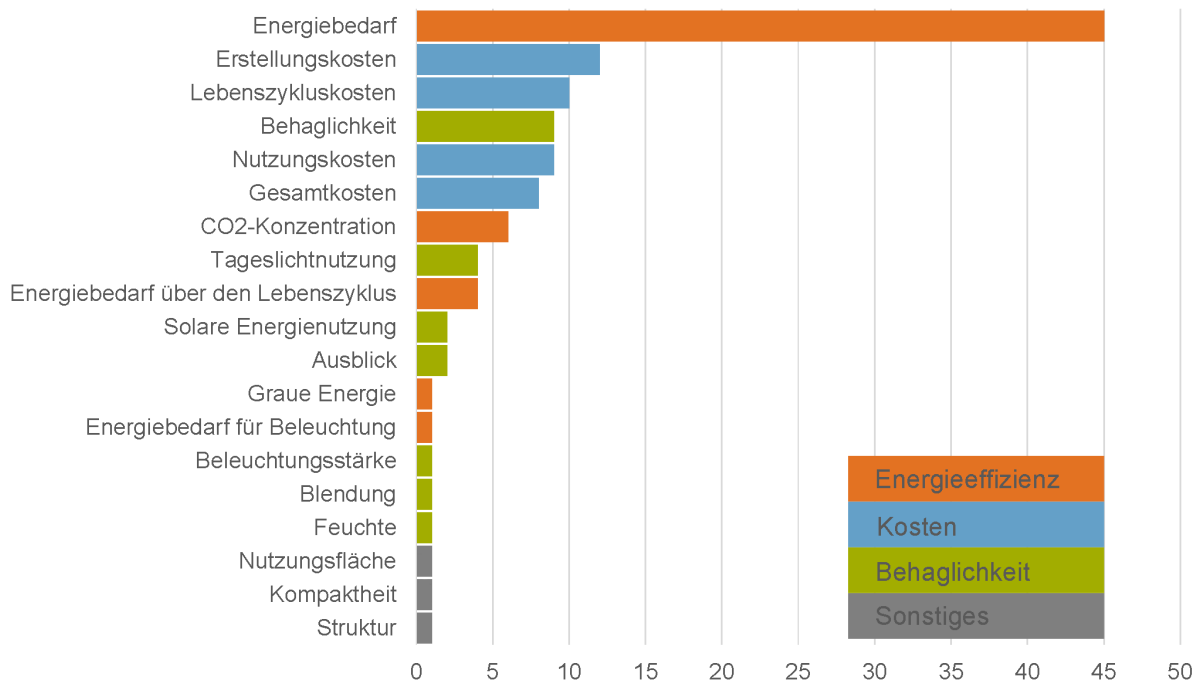


Abbildung 15: Häufigkeit der im Rahmen von BPO verwendeten Zielgrößen [35, S. 241]

Meist werden auf Grundlage eines bestimmten Zielenergiestandards die Kosten mittels SOO optimiert, wie dies beispielsweise von [10] und [55] durchgeführt wurde. Daneben werden in dieser Kombination auch häufig MOO eingesetzt, um Optima für Kosten und Energieeffizienz zu finden. Beispiele hierfür bieten [56] und [79]. Neben diesen beiden Zielgrößen werden auch Fragestellungen zur Energieeffizienz mit Behaglichkeitsparametern verknüpft, wie dies beispielsweise von [92] gezeigt wird. Kombinationen aller drei Zielgrößen untersucht lediglich [5] für eine Sanierungsfragestellung mittels MOO.

Abbildung 16 abstrahiert die aktuellen Vorgehensweisen für die Zielgrößen Energieeffizienz, Kosten und Behaglichkeitskriterien. Die Rubrik Kombinationen verdeutlicht dabei das aktuelle Vorgehen, in welchem durch SOO oder MOO meist zwei Größen betrachtet werden. Die Verknüpfung der Zielgrößen zeigt hierbei eine Anbindung beider mit lediglich einer Einschränkung des Randbedingungsraumes.

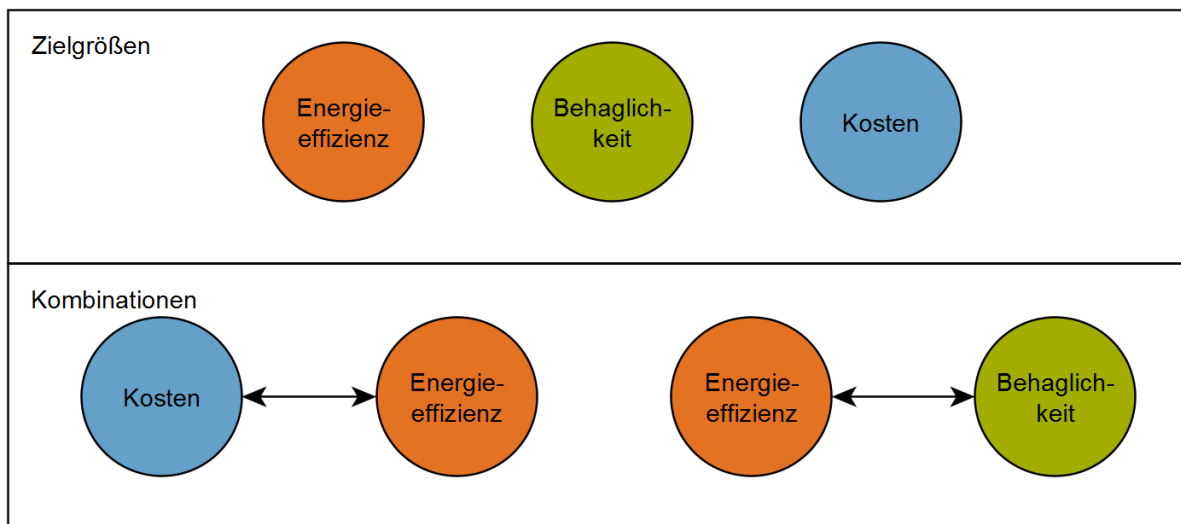


Abbildung 16: Darstellung der im Rahmen der aktuellen BPO-Betrachtung verwendeten häufigsten Zielgrößen und Zielgrößenkombinationen

Die Optima werden, basierend auf der Definition, die in Kapitel 4.1.1 beschrieben ist, gesucht. Es ergeben sich dadurch die besten Lösungen für die jeweiligen Probleme.

5.4 Optimierungsalgorithmen und Variablenanzahl

Neben der Klassifikation der Methoden und der Betrachtung der verwendeten Zielgrößen beschäftigten sich sehr viele Autoren im Bereich der BPO mit Themen der Reduktion der Variablenanzahl und den verwendeten Optimierungsalgorithmen. Dies ist hauptsächlich auf die Spezifika von simulationsbasierter Optimierung zurückzuführen, wie diese in Kapitel 4.3 beschrieben wurden.

Im Rahmen von simulationsbasierter Optimierung, in dem die BPO lediglich einen Teilbereich ausmacht, kommt es häufig vor, dass sich die Zielfunktionen unstetig verhalten, relativ große Optimierungsräume mit unterschiedlichen Arten von Variablen betrachtet werden und im Gegensatz zu vielen anderen Optimierungen, die Analyse der Zielfunktion durch Simulation gegenüber der Auswertung des Zielwertes sehr zeitaufwändig ist. [90]

Ausgehend von diesen Spezifika entwickelten sich unterschiedliche Herangehensweisen. Um beispielsweise die Optimierungsräume zu verkleinern, werden Sensitivitätsanalysen oder mehrstufige Verfahren zur Reduktion der zu betrachteten Varianten verwendet. [45]

Ersatzmodelle werden verwendet, um neben dem Zeitaufwand für die Analyse auch die Unstetigkeiten der Zielfunktion zu verbessern. Daneben kann durch die Verwendung von geeigneten Ersatzmodellen auch das Problem der unterschiedlichen Variablenarten gelöst werden. [33]

Der weitaus größte Bereich, mit dem sich die Autoren beschäftigen ist jedoch die Anpassung und Weiterentwicklung von Optimierungsalgorithmen. Ein Grund hierfür liegt darin, dass hierdurch allen Schwierigkeiten im Bereich der simulationsbasierten Optimierung Rechnung getragen werden kann. Untersuchungen wie die von Evins et. al [35] zeigen, dass sich in diesem Bereich die Verwendung von evolutionären Algorithmen durchgesetzt hat.

Neben diesem häufigen Vorgehen existieren noch weitere Verfahren, um mit den Schwierigkeiten der simulationsbasierten Optimierung umzugehen. Beispielhaft seien hier das von Tuhus–Dubrow [84] verwendete Vorgehen, lediglich diskrete oder binäre Variablen einzusetzen, um den Optimierungsraum grober zu rastern, genannt. Ein weiteres Beispiel ist die von Ferrara et. al. [38] angewandte Methode zur Reduktion der zu betrachtenden Varianten. Er schränkt den Optimierungsraum ein, indem er lediglich vordefinierte Kombinationen an Variablen zur Optimierung zulässt.

5.5 Aktuelle Forschungsschwerpunkte

Alle diese genannten Aspekte finden sich zum aktuellen Zeitpunkt in zwei wesentlichen Forschungsschwerpunkten repräsentiert. Einerseits die Weiterentwicklung der Optimierungsalgorithmen und andererseits die Verbesserung der Akzeptanz der Werkzeuge und Methoden durch die Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit.

Wie bereits in Kapitel 5.4 angesprochen, werden mittels der direkten Weiterentwicklung der Optimierungsalgorithmen alle Schwierigkeiten, die sich im Rahmen einer simulationsbasierten Optimierung ergeben, adressiert. Beispielhaft seien hier die Weiterentwicklungen im Bereich der multiobjektiven Optimierung [47] und die Weiterentwicklungen im Bereich des generischen Algorithmus, NSGA und NSGA II genannt [92]. Aber auch die Reduktion der Variablenanzahl durch vorgeschaltete Sensitivitätsanalysen oder mehrstufige Verfahren zählen zu diesem Forschungsschwerpunkt [36] [52].

Im Bereich der Nutzerfreundlichkeit wird versucht, durch die Verbesserung der Eingabemöglichkeiten, einen einfacheren Einstieg in den Bereich BPO anzubieten. Daneben wird sowohl mit der Entwicklung von integrierten Programmkombinationen als auch von Weboberflächen [75] und Plugins, wie beispielsweise TRNOPT [83], versucht, das Zusammenspiel von Simulation und Optimierung zu verbessern. Viele weitere Entwicklungen, wie beispielsweise die engere Verknüpfung zwischen Simulations- und Optimierungswerkzeugen, oder auch die Erweiterung der Möglichkeiten durch zusätzliche Zielgrößenauswahl sind primär nicht direkt mit dem Forschungsschwerpunkt der Nutzerfreundlichkeit verknüpft, zielen jedoch darauf ab.

6 Darstellung der neuen Methode

6.1 Klassifikation der neuen Methode

Auf Basis des in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Stand des Wissens und vor dem Hintergrund der in Kapitel 2 definierten Zielsetzung wurde eine neue Methode entwickelt, um die energetische und ökonomische Qualität eines Gebäudeentwurfes zu quantifizieren, und diese beispielhaft umgesetzt. Wird die neue Methode nach dem in Kapitel 5.2 erläuterten Verfahren klassifiziert, ergibt sich die in Abbildung 17 gezeigte graphische Darstellung der neuen Methode.

Ebenso wie bei den bislang betrachteten Methoden, besteht die neue Methode aus den vier Grundbausteinen *Modell*, *Simulation*, *Optimierung* und *Ausgabe*, welche durch die *Parametrisierung* und *Verknüpfung* der einzelnen Bausteine komplettiert wird. Explizit wird im Rahmen der neuen Methode ein generisches Simulationswerkzeug über eine dateibasierte Anbindung in einer Java-Programmierungsumgebung mit einem generischen Optimierungswerkzeug verbunden. Mittels der Verwendung der Programmierungsumgebung ist es möglich, die Anbindung der beiden generischen Werkzeuge derart zu gestalten, dass eine nachträgliche Ankopplung weiterer, unterschiedlicher Werkzeuge möglich ist.

Die schematische Darstellung der neuen Methode gliedert sich ebenso wie die graphische Abbildung der Klassifikation in die beschriebenen Hauptbestandteile und wird im folgenden als Grundlage zu einer detaillierten Beschreibung der neu entwickelten Methode verwendet. Die schematische Darstellung ist in Abbildung 18 gezeigt.

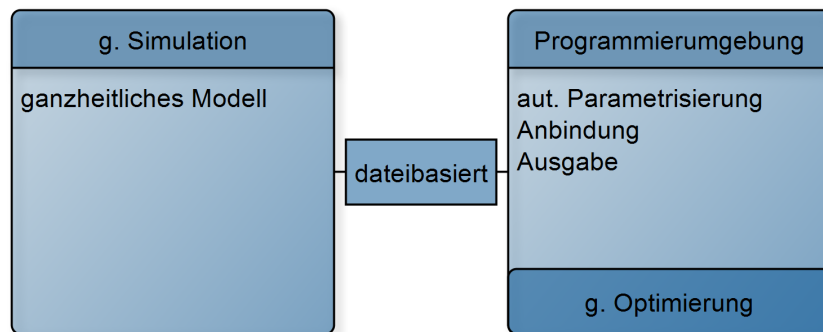


Abbildung 17: Graphische Darstellung der Klassifizierung der neuen Methode

Implementierung des thermischen Modells

Um im Rahmen der Methode ein Modell nutzen zu können, muss es zunächst erzeugt werden. Hierzu ist das Modell im jeweils verwendeten Simulationsprogramm zu erstellen und durch Kopieren in den Arbeitsordner der Methode zu speichern. Die Anforderungen an das Modell bestehen darin, dass es sich um ein textbasiertes und lauffähiges Modell handelt, so dass die Datei eingelesen und weiterverarbeitet werden kann. Zur Parametrisierung wird das Modell daraufhin eingelesen und analysiert. Hierzu wird ein in der Programmierungsumgebung implementierter programmspezifischer *Interpreter* verwendet, mit dessen Hilfe das textbasierte thermische Modell eingelesen und auf mögliche Variablen hin analysiert und anschließend parametrisiert wird. Neben der automatischen Parametrisierung des Modells werden durch den Interpreter Basisinformationen zum eingelesenen Modell gesammelt, die als Grundlage für die anschließende Veränderung des Modells im Rahmen der Optimierung und die Betrachtung der Ökonomie benötigt werden.

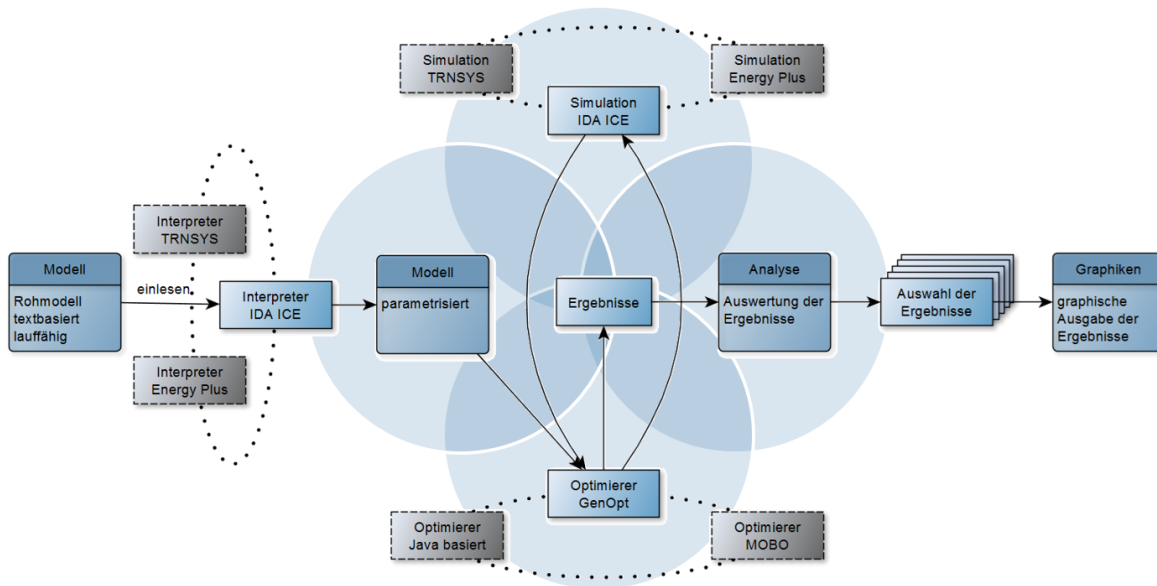


Abbildung 18: Schematische Darstellung der neuen Methode

Implementierung des generischen Optimierungswerkzeugs

Das Optimierungs- bildet zusammen mit dem Simulationswerkzeug das zentrale Element einer BPO. In der neuen Methode wird dabei ein generisches Werkzeug innerhalb der Programmierumgebung verwendet. Die Anbindung an die Programmierumgebung erfolgt über ein *Interface*, mit dessen Hilfe eine sehr enge Verknüpfung geschaffen wird. Hierdurch ist es möglich, Daten schnell und effizient auszutauschen. Zudem können durch Anpassungen am *Interface* weitere generische oder angepasste Optimierungswerkzeuge verwendet werden.

Durch die Anbindung eines generischen Werkzeugs bietet sich der Vorteil, dass Verbesserungen und Weiterentwicklungen des verwendeten Werkzeugs ohne Anpassung der Methode abbildbar sind. Neben diesem Vorteil entfällt durch die Verwendung eines generischen Werkzeugs die aufwändige Validation der zur Anwendung kommenden Optimierungsalgorithmen.

Die Übergabe der Ergebnisse des Optimierungswerkzeugs erfolgt ebenfalls mittels des *Interface*. Die so an die Programmierumgebung übermittelten Daten werden textbasiert gespeichert und für die spätere Analyse bereit gehalten.

Implementierung des generischen Simulationswerkzeugs

Ebenso wie bei der Implementierung des Optimierungswerkzeugs wird in der neuen Methode ein generisches Simulationswerkzeug verwendet, woraus sich die gleichen Vorteile, wie die im Kapitel 6.1 genannten, ergeben. Die Anbindung des generischen Simulationswerkzeugs erfolgt ebenfalls über ein *Interface*. Ein Austausch durch jedes andere Script-basierte Simulationswerkzeug ist durch Anpassung des *Interface* möglich. Neben der Anpassung des *Interface* ist zudem die Änderung des unter Kapitel 6.1 beschriebenen *Interpreters*, der zur jeweiligen Simulationsumgebung passen muss, notwendig. Eine Anpassung des Optimierungswerkzeugs ist nicht notwendig, da alle Veränderungen am Modell innerhalb der neuen Methode durchgeführt werden.

Der Austausch der Daten zwischen dem Optimierungs- und Simulationswerkzeug erfolgt über das *Interface* in der Art, dass Ergebnisse aus der Simulation textbasiert übergeben werden und Variationen am thermischen Modell aus dem Optimierungswerkzeug über die Programmierumgebung am parametrisierten Modell vorgenommen und dem Simulationswerkzeug ebenfalls textbasiert zugeführt werden.

Dieses Vorgehen bietet die Möglichkeit, über die Programmierumgebung Änderungen am Modell vorzunehmen, die an unterschiedlichen Stellen im Modell eingreifen. Beispielhaft sei hier die Veränderung der Bauteilsschwere des Modells genannt, hier sind Änderungen sowohl an der Wand als auch am Fenster notwendig, die anhand einer Berechnung der resultierenden Schwere aller Raumkomponenten verifiziert werden müssen, bevor die Änderungen ins Modell geschrieben werden kann.

Implementierung der Ergebnisausgabe

Die Ergebnisausgabe erfolgt vollständig innerhalb der Programmierumgebung. Hierbei werden zunächst die textbasiert gespeicherten Ergebnisse nach den vom Nutzer vorgegebenen Zielgrößen analysiert und hinsichtlich vordefinierter Größen ausgewertet. Je nach nutzerspezifischer Auswahl der Ergebnisse werden diese anschließend programmierumgebungsintern graphisch ausgegeben.

Die Umsetzung dieser beschriebenen, neuen Methode ist anhand unterschiedlicher Beispielberechnungen in Kapitel 9 dargestellt.

6.2 Zielgrößenbetrachtung im Rahmen der neuen Methode

Die in der Methode verwendeten Zielgrößen sind die nach Kapitel 5.3 gefundenen, am häufigsten verwendeten Zielgrößen, *Energieeffizienz*, *Ökonomie* und *thermische Behaglichkeit*. Hierfür sind die Nutz- und Endenergiewerte aus den Simulationsrechnungen, Lebenszykluskosten auf Basis des Steckbriefs 2.1.1 (BNB_BN 2.1.1) [20] und Übertemperaturgradstunden auf Basis von Operativtemperaturen aus Simulationsrechnungen als Parameter implementiert.

Die sich aus diesen Zielgrößen ergebenden neuen Betrachtungskombinationen sind in Abbildung 19 dargestellt. Doppelpfeile verbinden hierbei die Zielgrößen, die vom Optimierungswerkzeug optimiert werden, direkte Zielgrößen genannt. Nebenstehende Zielgrößen symbolisieren Nebenbedingungen, die sich direkt auf die Optimierung auswirken und den Optimierungsraum einschränken, indirekte Zielgrößen genannt.

Diese neuen Betrachtungskombinationen erweitern die bislang meist verwendeten Kombinationen dahingehend, dass nicht mehr die Definition der Optima, wie in Kapitel 4.1.1 dargestellt, sondern eine erweiterte Definition der Optimierung angewendet wird.

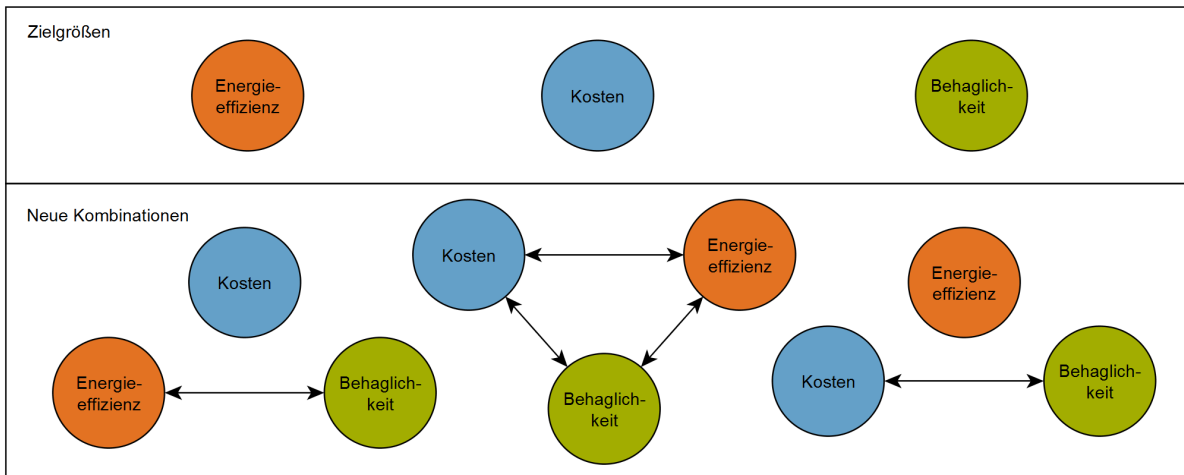


Abbildung 19: In der neuen Methode implementierte Zielgrößen und Zielgrößenkombination

Optimierung ist demnach

der (automatisierte) Prozess, die *beste Übereinstimmung* des Ergebnisses mit den *Wünschen und Anforderungen* des *Bauherrn*, die mittels Simulation aus allen möglichen Alternativen bestimmt werden kann, zu finden .

Energieeffizienz

Die Energieeffizienz als direkte Zielgröße wird im Rahmen der Methode einerseits mittels der Bestimmung der Nutzenergie aus der dynamischen Simulation ermittelt, andererseits durch die programminterne Weiterverarbeitung der Nutzenergiebedarfswerte mittels des Verfahrens nach DIN V 18599 [30] in End- und Primärenergiewerte berücksichtigt.

Wird die Energieeffizienz als indirekte Zielgröße verwendet, werden Baustandards nach EnEV [19] durch mittlere Wärmedurchgangskoeffizienten (H_t -Werte) verwendet, um den Betrachtungsraum einzugrenzen.

Tabelle 2: Klassifizierung der Bauteilschwere nach DIN V 4108-6 [31]

leicht	mittel	schwer
$< 20 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K}) \cdot V_e$	$20 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K}) \cdot V_e < x < 40 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K}) \cdot V_e$	$> 40 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K}) \cdot V_e$

mit V_e = Raumvolumen

Ökonomiebetrachtung

Ökonomiebetrachtungen basieren auf dem vom Bundesamt für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung herausgegebenen und an Wohngebäude angepassten Steckbrief 2.1.1 [20]. Als direkte Zielgröße werden die Lebenszykluskosten, berechnet aus den Herstellungs- und Nutzungskosten, basierend auf statistischen und realen Preisen, verwendet.

Als indirekte Zielgrößen werden im Rahmen der Ökonomiebetrachtung vom Nutzer vorgegebene Kostenbereiche oder Maximalkosten verwendet.

Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit als direkte Zielgröße wird mittels der Bestimmung der Übertemperaturgradstunden aus den Stundenmitteln der durch die Simulation berechneten Operativtemperaturen bestimmt. Betrachtet wird dabei der vom Nutzer im thermischen Modell definierte Bezugsraum.

Der Anforderungswert Übertemperaturgradstunden für Wohngebäude, differenziert nach Sommerklimaregionen und Temperaturbezugswerten [28], wird als indirekte Zielgröße der thermischen Behaglichkeit verwendet.

Tabelle 3: Der Berechnung der den Baustandards zu Grunde liegende spezifische Transmissionswärmeverlusten

Baustandard	spezifischer Transmissionswärmeverlust [W/m^2K]
EnEV-Standard	0,40
KfW70-Standard	0,34
KfW55-Standard	0,28
KfW40-Standard	0,22

6.3 Darstellung der Implementierung der Bauteilschwere und des Baustandards in der neuen Methode

Beispielhaft für die Implementierung einer Variablen ist im Folgenden die Implementierung der Bauteilschwere und des Baustandards in die neue Methode dargestellt.

Die Auswahl der Bauteilschwere und des Baustandards, als zu betrachtende Variable, erfolgt durch die Eingabe des Nutzers. Aus dieser Auswahl des Nutzers ergeben sich die Anforderungen an die jeweiligen Bauteile. Die Bauteilschwere c_{wirk} ist, wie in Tabelle 2 dargestellt, nach DIN V 4108-6 [31] klassifiziert. Der Baustandard wird auf Grundlage der Berechnung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes der Gebäudehülle H_T' definiert. Die zu Grunde gelegten maßgeblichen Werte sind in Tabelle 3 dargestellt.

Beschreibung der Verfahrens zur Berechnung der Bauteilschwere

Die Bauteilschwere c_{wirk} ist nach dem normalen Verfahren nach DIN EN ISO 13786 [29] berechnet. Das Verfahren beruht auf der Wärmeleitung in Bauteilen, die aus mehreren ebenen, planparallelen, homogenen Schichten besteht. Mittels der Lösung der sich aus den Einwirkungen auf ein Bauteil ergebenden Temperatur- und Wärmestromgleichungen, der Wärmeübergangsmatrix, können anschließend

die dynamisch-thermischen Kenngrößen, die flächenbezogenen wirksamen Wärmekapazitäten, bestimmt werden (Gleichung 1). Zur Berechnung der Gleichungen ist es notwendig, die komplexen Temperatur- und Wärmestromamplitudenfaktoren, die komplexe Amplitude der Temperatur, sowie das Verhältnis der Schichtdicke zur Eindringtiefe und die periodische Eindringtiefe zu berechnen.

$$\chi_1 = \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{und} \quad \chi_2 = \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right| \quad (1)$$

mit

χ_1 Innenseite $\text{J}/(\text{m}^2\text{K})$

χ_2 Außenseite $\text{J}/(\text{m}^2\text{K})$

Die Berechnungen der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes erfolgt dann mittels Gleichung 2. Hierzu wird für jedes Bauteil der dem Gebäudeinneren zugewandte Ξ_i -Wert berechnet und mit der zugehörigen Wandfläche multipliziert. Die Summe aller Produkte wird anschließend durch die Gesamthüllfläche des Gebäudes geteilt, um die wirksame Speicherfähigkeit zu bestimmen.

$$c_{\text{wirk}} = \sum \chi_i \cdot A_i \cdot \frac{1}{A_{\text{wärmetauschend}}} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (2)$$

Beschreibung der Verfahrens zur Berechnung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes

Die Berechnungen des spezifischen Transmissionswärmeverlustes H_T' eines Gebäudes erfolgt mittels Gleichung 3. Hierzu wird für jedes Bauteil der Wärmedurchgangskoeffizient, U_i -Wert, berechnet und mit der zugehörigen Wandfläche A_i und Temperaturkorrekturwert $F_{x,i}$ multipliziert. Die Summe aller Produkte wird anschließend durch die Gesamthüllfläche des Gebäudes $A_{w\ddot{a}rmetauschend}$ geteilt. Um den spezifischen Transmissionswärmeverlustes zu bestimmen, wird je nach Nutzerangabe ein normativer oder berechneter Wärmebrückenverlustkoeffizient $\Delta U_{WB,i}$ aufaddiert.

$$H_T' = \frac{\sum F_{x,i} \cdot U_i \cdot A_i}{A_{w\ddot{a}rmetauschend}} + \Delta U_{WB,i} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (3)$$

Implementierung der Bauteilschwere und des Baustandards in die neue Methode

Die Implementierung der Bauteilschwere und des Baustandards in die neue Methode ist graphisch in Abbildung 20 dargestellt.

Nach der Auswahl der Variablen werden zunächst, aus einer Datenbank, alle möglichen Wand-, Boden-, Decken- und Dachkonstruktionen ausgewählt und die zugehörigen wirksamen Wärmekapazitäten und U-Werte bestimmt. Zur Bestimmung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit und des spezifischen Transmissionswär-

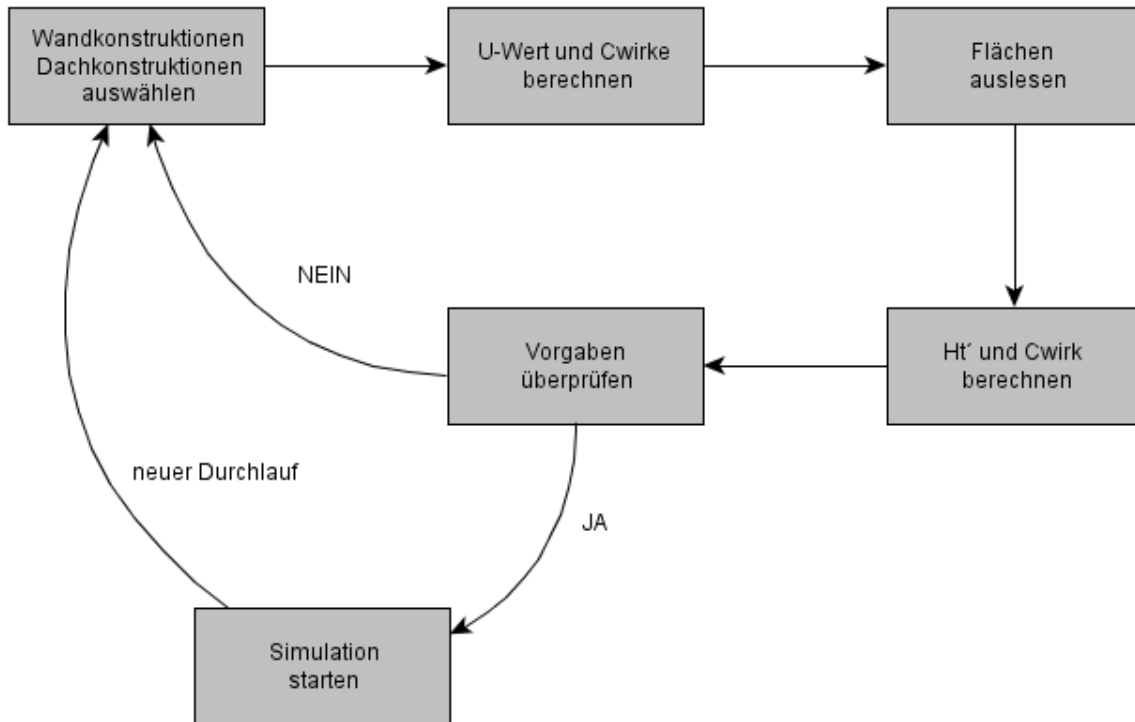


Abbildung 20: Skizze der Implementierung der Bauteilsschwere und des Baustandards in die neue Methode

meverlustes des Gebäudes werden anschließend die Bauteilflächen aus dem thermischen Modell ausgelesen. Die so berechneten Werte von c_{wirk} und H_T' werden anhand der Vorgaben aus Tabelle 2 und 3 überprüft. Fällt die Überprüfung positiv aus, werden die Konstruktionen in das parametrisierte Modell geschrieben und die Simulation gestartet.

Neben der Überprüfung der Vorgaben der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit, wird zusätzlich für jede Konstruktion eine Überprüfung des Mindestwärmeschutzes nach DIN 4108-2 [28] durchgeführt.

7 Beschreibung des Basismodells

Um die im Kapitel 6 beschriebene Methode an einem Praxisbeispiel zu überprüfen, wird ein Basismodell erstellt, validiert und anschließend untersucht. Im Folgenden werden das Basismodell und alle für die Validation des Modells notwendigen Randbedingungen beschrieben. Die Beschreibung der Validationsergebnisse erfolgt in Kapitel 8 auf Seite 64.

Als Grundlage für die Berechnungen wird das Standardgebäude für die Simulation aus [49] verwendet. Es handelt sich um ein Einfamilienhaus in Leichtbauweise mit einem Satteldach der Neigung 45° (Kniestockhöhe 0,8 m), einem Seitenverhältnis, Länge zu Breite, von eins und einer Wohnfläche, nach DIN 277 [27], von 150 m^2 . Das Gebäude besitzt zwei Stockwerke mit einer lichten Raumhöhe von jeweils 2,5 m, wobei die Räume des ersten Obergeschosses teilweise durch die Dachfläche begrenzt sind. Die U-Werte des Gebäudes sind nach Anlage 2 der Energieeinsparverordnung [19] des Referenzgebäudes festgesetzt und in Abbildung 21 angegebene. Die Fensterfläche des gesamten Gebäudes beträgt $28,3 \text{ m}^2$ und ist mit 46 % nach Süden zentriert. Auf die Himmelsrichtung West entfallen 18 %, auf Nord 9 % und Ost 27 %. Der Rahmenanteil der modellierten Fenster entspricht 30 %. Die verwendete Verglasung besitzt einen U-Wert von $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und einen Gesamtenergiedurchlassgrad von 60 %. Eine Sonnenschutzvorrichtung ist in der Basisvariante nicht implementiert.

Der Infiltrationsluftwechsel beträgt in der Basisvariante 0,10 1/h.

Graphisch ist das Basisgebäude in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21: Skizze des Basismodells zur Validation der BPO aus IDA ICE,
 $U_W = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{AW} = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_D = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$,
 $U_{KD} = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$, $H'_T = 0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$

7.1 Randbedingungen der thermischen Simulation

Neben den eben beschriebenen geometrischen Randbedingungen ist für das Basisgebäude ein Wärmebrückenverlustkoeffizient ΔU_{WB} von $0,05 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und ein Grundluftwechsel von $0,5 \text{ 1/h}$ im Modell implementiert. Die internen Gewinne sind nach [49] Tabelle 4.3 mit $0,85 \text{ kW}$ berücksichtigt. Des Weiteren ist eine Lichtleistung von $1,25 \text{ W/m}^2$ mit einem Einschaltzeitpunkt von 150 lx in der Mitte des Wohnzimmers in der Zeit zwischen 6 und 22 Uhr umgesetzt. Das Heizsystem besteht aus einem idealen Heizer, mit einem Sollwert der Raumlufttemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Für die thermischen Berechnungen wird der Rechenkern des Simulationsprogramms IDA-ICE [78] aktuell in der Programmversion 4.6 verwendet. Die Ergebnisausgabe ist derart umgesetzt, dass detaillierte Ergebnisse hinsichtlich des Energiebedarfs, differenziert nach Energieträgern und Komfortgrößen in Form von Raumluft- und Operativtemperatur gespeichert werden.

Tabelle 4: Auswahl der in GenOpt [90] implementierten und in der beispielhaften Umsetzung der neuen Methode nutzbare Optimierungsalgorithmen (k $\hat{=}$ kontinuierlich, d $\hat{=}$ diskret)

Bezeichnung	Optimierungsdimension	Variablenarten
Golden Section	eindimensional	k
Parametric	parametrisch mehrdimensional	k, d
Parametric on a Mesh		k, d
Simplex	mehrdimensional	k
Generalized Pattern Search (GPS)		
Coordinate search GPS (hybrit GPS)		k
Hooke Jeeves GPS		k
Multi start GPS		k
Multi start Hooke Jeeves GPS		k
Discrete Armijo Gradient		k
Particle Swarm Optimization (PSO)		
PSO with internal weight		k, d
PSO on an Mesh		k, d
PSO hybrit		k, d

7.2 Randbedingungen der Optimierung

Die für die Optimierung verwendeten Randbedingungen gliedern sich in die Anzahl und Art der verwendbaren Variablen und in die möglichen Algorithmen. Zunächst ist die Anzahl der Variablen durch die Ausprägung des Interpreters, wie er in Kapitel 6.1 beschrieben ist, begrenzt. Ein zweiter eingrenzender Faktor ist die Variablenart und der jeweils hinterlegte Wertebereich jeder Variablen.

Als Randbedingungen für die Berechnung eines optimalen Ergebnisses sind alle parametrisierten Variablen, wie sie in Tabelle 6 dargestellt sind, möglich. Daneben können die Zielgrößen *Heizenergiebedarf*, *Kühlkältebedarf*, *LCC-Kosten* und die *Summe der Übertemperaturgradstunden* betrachtet werden.

Durch die Anbindung des generischen Optimierers GenOpt [90], aktuell in der Programmversion 3.1, stehen alle in diesem Programm implementierten Optimierungsalgorithmen zur Verfügung. Diese sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 5: Herstellungs- und Nutzungskostenklassen nach DIN 276-1 [26] und DIN 18690 [25]

Kostenklasse	Herstellungskosten nach DIN 276-1	Nutzungskosten nach. DIN 18960
Nr.	Bezeichnung	Bezeichnung
100	Grundstück	Kapitalkosten
200	Herrichten und Erschließen	Objektmanagementkosten
300	Bauwerk – Baukonstruktion	Betriebskosten
400	Bauwerk – Technische Anlagen	Instandsetzungskosten
500	Außenanlagen	
600	Ausstattung und Kunstwerke	
700	Baunebenkosten	

7.3 Randbedingungen der Ökonomiebetrachtung

Um die Kosten des Gebäudes zu berechnen, wurde die LCC Berechnungsmethode nach Steckbrief 2.1.1 [20] mittels der Kostenklassen für Herstellungskosten nach DIN 276-1 [26] und für Nutzungskosten nach DIN 18560 [25] verwendet. Die in Ansatz gebrachten Kostenklassen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die zur Berechnung notwendigen statistischen Preise sind aus den BKI Kostendaten [14] entnommen und programmintern in einer Datenbank gespeichert.

Als Informationsgrundlage für die Berechnungen der Herstellungskosten dienen die Informationen aus dem Basismodell. Für die Berechnung der Nutzungskosten werden zusätzlich zu den Informationen aus dem Basismodell Berechnungsergebnisse aus der thermischen Simulation zu Energiebedarfswerten verwendet. Als Berechnungsgrundlage ist eine Nutzungszeit von 50 Jahren mit einer Discountrate von 2 % und einer Inflationsrate von 5 % nach BNB-Steckbrief in Ansatz gebracht. Hierbei werden alle notwendigen Berechnungen innerhalb der Programmierumgebung der neuen Methode durchgeführt.

Tabelle 6: Beschreibung der in der beispielhaften Umsetzung der neuen Methode nutzbaren Variablen mit zugehörigen Wertebereichen

Name	Kürzel	Wertebereich	Einheit
<i>Kontinuierliche Variablen</i>			
Grundfläche	Gf	[50;250]	m ²
Dachneigung	Dn	[15;35]	°
Seitenverhältnis	Sv	[0,5;1,5]	-
Wärmebrücken	Wb	[0,01;0,5]	W/(m ² K)
Infiltration	Inf	[0,01;1,5]	1/h
FFA der Terrassenfassade	Ffa	[19;100]	%
Nutzeranzahl	Na	[0;16]	-
Schließkriterium Sonnenschutz	SkS	[100;350]	W/m ²
Art des Sonnenschutzes (F _c)	SkA	[0,14;0,8]	-
Minimum des Luftwechsels	LwM	[0;500]	m ³
Regelung des Luftwechsels	LwR	[ohne;ganz]	-
<i>Diskrete Variablen</i>			
Dachform	Df	Flach-, Sattel-, Pultdach	-
Lokalität	Lok	Regionen DWD TRY	-
Fensterverteilung	Ffv	gleichmäßig, zentriert	-
Baustandard	Bst	EnEV, KfW 70, KfW 55, KfW 40	-
Bauteilschwere	Bts	leicht, mittel, schwer	-

Preise

Die für die beispielhafte Umsetzung verwendeten Preise stützen sich auf die BKI Baukosten und Angaben des Steckbriefes 2.1.1. Die BKI Baukostentabellen bieten für alle Kostenklasse nach Norm statistische Preise an. Diese sind für die meisten Preise in einen Bereich von - bis mit einem mittleren Wert je Einheit unterteilt. Zusätzlich bieten die Tabellen des BKI auch von - bis Prozentangaben der jeweiligen Preise in Abhängigkeit einer oder mehrerer Kostenklassen an. Es können hierdurch auch Preise relativ berücksichtigt werden, für die keine genaueren Daten vorhanden sind. Im Rahmen der Beispielrechnung wurden die von - bis und durchschnittlichen Preise des BKI verwendet. Hierdurch kann eine Preisspreizung abbildet werden.

8 Überprüfung des Basismodells

8.1 Funktionsüberprüfung des thermischen Modells

Die Gültigkeit des zu Grunde gelegten thermischen Modells wird mittels eines zweistufigen Verfahrens überprüft. In der ersten Stufe werden die Ergebnisse aus dem im Simulationsprogramm erzeugten thermischen Modell mit Literaturwerten verglichen. Hierdurch kann die Gültigkeit des erzeugten Modells sichergestellt werden. Im Rahmen der zweiten Stufe wird das Modell zunächst mittels des Interpreters in die Programmierumgebung der neuen Methode eingelesen. Anschließend werden die durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Variablen erzeugten Ergebnisse aus der Umsetzung der neuen Methode, mit denen aus dem alleinstehenden Simulationsprogramm verglichen. Hierdurch wird sichergestellt, dass innerhalb der neuen Methode valide Ergebnisse erzeugt werden.

8.1.1 Vergleich zwischen Literatur und Implementierung

Um das thermische Modell zu validieren, werden alle Parameter in das Simulationsprogramm IDA ICE eingegeben und beispielhaft der spezifische Jahres-Heizwärmebedarf berechnet. Die sich ergebenden Werte werden anschließend mit den Werten aus [49] verglichen. Da das in IDA ICE verwendete Berechnungsmodell gegenüber dem im angesprochenen Bericht weiterentwickelt ist und einige Randbedingungen nicht übernommen werden konnten oder unbekannt sind, ergibt sich eine abweichende Berechnungsgrundlage. Die Überprüfung der Ergebnisse erfolgt deshalb mittels eines Vergleichs der absoluten Abweichung und der maximalen Schwankungsbreite.

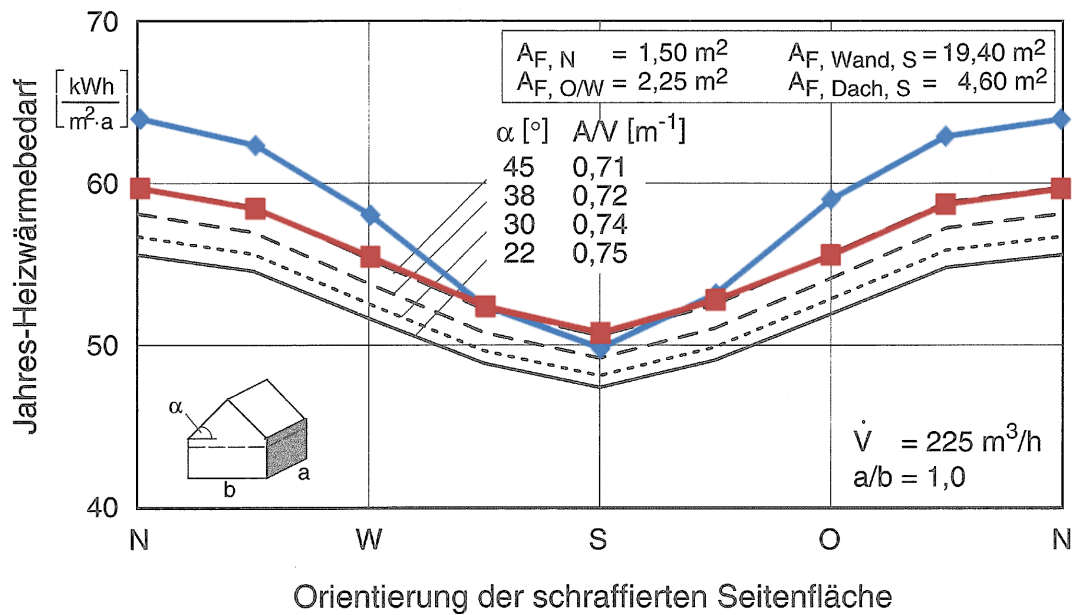


Abbildung 22: Validierung des Basismodells Niedrigenergiehaus (rot Berechnung [49]; blau Berechnung IDA ICE); Delta absolut rot-blau -20,8

Graphisch ergeben sich die in Abbildung 22 dargestellten Verläufe. In rot, die aus der Literatur entnommene Kurve, in blau die mittels IDA ICE berechneten Ergebnisse. Die maximale Abweichung zwischen den beiden Kurven beträgt bei der Nordausrichtung des Gebäudes 4,5 kWh/(m²a), demnach 0,8 % des gesamten Bedarfswertes bei dieser Ausrichtung. Neben der maximalen Abweichung wird in [49] die maximale Schwankungsbreite des Jahres-Heizwärmebedarfs angegeben. Diese berechnet sich aus der Änderung des Bedarfswertes bei Rotation des Gebäudes im Verhältnis zum Bedarfswert des Gebäudes bei Südausrichtung. Hauser gibt diese mit ca. 20 % (ca. 10,0 kWh/(m²a)) [49] an. Für das hier berechnete Modell ergibt sich dieser Wert zu 23 % (14,8 kWh/(m²a)). Unter Berücksichtigung der angesprochenen Änderungen in der Berechnung und den Randbedingungen, ist das Modell damit als ausreichend gut zu bewerten.

8.1.2 Vergleich zwischen Simulationsprogramm und Implementierung

Zur Überprüfung der Anbindung der generischen Simulation an die Programmierumgebung der neuen Methode wird beispielhaft der spezifische Jahres-Heizwärme- und Kühlkältebedarf berechnet. Hierzu wird zunächst das validierte thermische Modell mittels des Interpreters automatisch parametrisiert und in die Programmierumgebung eingelesen. Anschließend werden für jeden Parameter alle möglichen Varianten berechnet und die Ergebnisse einzeln mit im Simulationsprogramm IDA ICE erzeugten Ergebnissen der gleichen Variante verglichen. Die Überprüfung gilt als erfolgreich, wenn beide Ergebnisse identisch sind.

Beispielhaft wird hier der Vergleich der Variante Baustandard bei unterschiedlichen Dachformen betrachtet. In Abbildung 23 ist der Energiebedarf in Abhängigkeit des Baustandards dargestellt. Es zeigt sich, dass mittels beider Verfahren die berechneten Bedarfswerte mit zunehmendem Standard sinken und sich die Ergebnisse beider Verfahren lediglich um 0,05 bis 0,07 %, bezogen auf die Heizenergiebedarfswerte aus der Simulationsrechnung, unterscheiden. Diese geringen Unterschiede rühren von dem in beiden Modellen leicht unterschiedlich zu Grunde gelegten Volumen her. Die Implementierung ist demnach valide.

8.2 Überprüfung der Optimierung

Die Funktionsfähigkeit der Optimierung wird mittels der Überprüfung der Variantenbildung unter verschiedenen Variablenkombinationen überprüft. Hierbei werden unterschiedliche Kombinationen aus den möglichen Variablen ausgewählt und durch eine vollumfängliche Berechnung ausgewertet. Mittels eines zweistufigen Verfahrens, bestehend aus einer qualitativen und einer quantitativen Überprüfung, wird die Funktionsfähigkeit überprüft. Die qualitative Überprüfung bildet hierbei eine

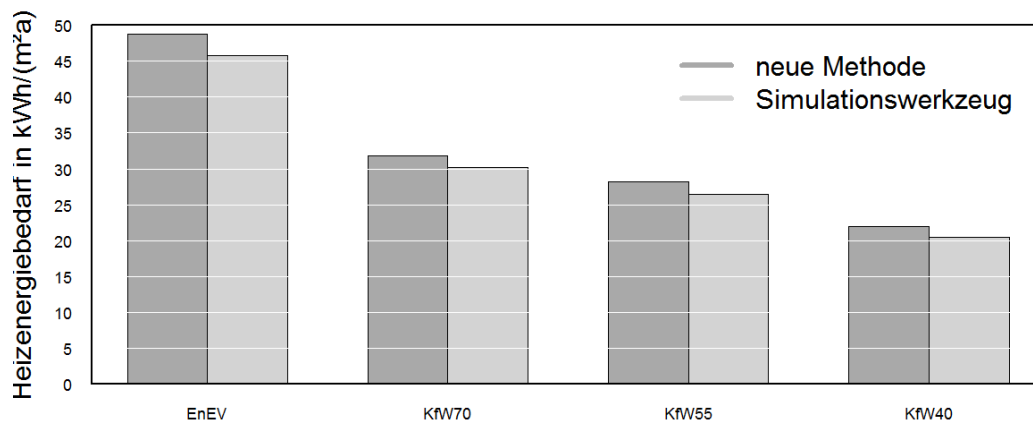


Abbildung 23: Vergleich der Ergebnisse aus der neuen Methode mit Ergebnissen aus dem Simulationsprogramm bei Veränderung des Baustandards für das Satteldachhaus und Betrachtung der Heizenergie in kWh/(m²a)

logisch begründete Vorhersage der zu erwartenden Bedarfswerte auf Grundlage der unter Kapitel 8.1 untersuchten Einzeleinflüsse. Die quantitative Überprüfung wird mittels stichprobenartiger Nachberechnung der Ergebnisse im Simulationswerkzeug durchgeführt.

Eine Überprüfung der verwendeten Optimierung hinsichtlich der gefundenen Optima kann demgegenüber nicht global durchgeführt werden. Dies liegt darin begründet, dass mittels der aktuell zur Verfügung stehenden Optimierungsmethoden nicht endgültig bewiesen werden kann, dass ein globales Optima gefunden wurde [53]. Ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Algorithmen, angewendet auf das gleiche Problem, wird allerdings in Kapitel 9 durchgeführt.

8.2.1 Qualitative Überprüfung der Optimierung

Beispielhaft wird die Überprüfung anhand der Variablen Dachneigung (D_n), Baustandard (B_{st}) und Fensterflächenanteil der Südfassade (F_{fa}) durchgeführt. Betrachtet wird dabei der berechnete Heizenergiebedarf.

Bei der Berechnung der Heizenergie ist im Rahmen der Einzelbetrachtung der Dachneigung ein leichter Anstieg des Bedarfs bei Erhöhung des Neigungswinkels zu beobachten. Demgegenüber reduziert sich der Heizenergiebedarf bei einer Verbesserung des Baustandards zunächst stark (ca. 2000 kWh), dann linear (ca. 500 kWh). Wird der Fensterflächenanteil der Südfassade verändert, so ergibt sich ein nahezu horizontaler Verlauf des Heizenergiebedarfs bei Erhöhung des Anteils von 19 % auf 100 % .

Ausgehend von diesen Betrachtungen ist zu erwarten, dass sich bei einer Berechnung aller möglichen Varianten bei Erhöhung der Dachneigung der Energiebedarf langsam, aber stetig erhöhen müsste. Der aus der Berechnung des Fensterflächenanteils resultierende Verlauf des Heizenergiebedarfs müsste bei der Erhöhung der Dachneigung stetig auf eine erhöhte Basis gehoben werden, ansonsten jedoch den nahezu konstanten Verlauf beibehalten.

Eine Veränderung des Baustandards sollte mit einer diskreten Reduktion des Energieniveaus einhergehen, die eben beschriebenen Verläufe jedoch nicht verändern. Lediglich der Einfluss des Fensterflächenanteils sollte sich je nach Baustandard leicht verändern, da hierdurch auch die Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle verändert werden.

Betrachtet man die sich aus den Berechnungen ergebenden Graphen, so zeigt sich das eben beschriebene Verhalten. Je nachdem, in welcher Reihenfolge dabei die Variablen ausgewählt wurden, ergeben sich leicht unterschiedliche Verläufe der Graphen. Das grundlegende Verhalten ist jedoch identisch. Beispielhaft ist der Graph der Veränderung des Heizenergiebedarfs bei Veränderung des Fensterflächenanteils, der Dachneigung und des Baustandards, in Abbildung 24 dargestellt. Im oberen Bild sind dabei die Graphen einzeln, jeweils für eine Dachneigung eingezeichnet. Während die Dachneigung je Graph konstant gehalten ist, wird der Fensterflächenanteil verändert. Die korrespondierenden Graphen, der Änderung der Dachneigung und des Fensterflächenanteils sind im unteren Diagramm in grau, respektive hellblau dargestellt. Alle Graphen im oberen Diagramm mit gleichem Baustandard sind dabei in der gleichen Farbe dargestellt.

Abbildung 24 zeigt somit den im ersten Abschnitt diese Kapitels beschriebenen Verlauf.

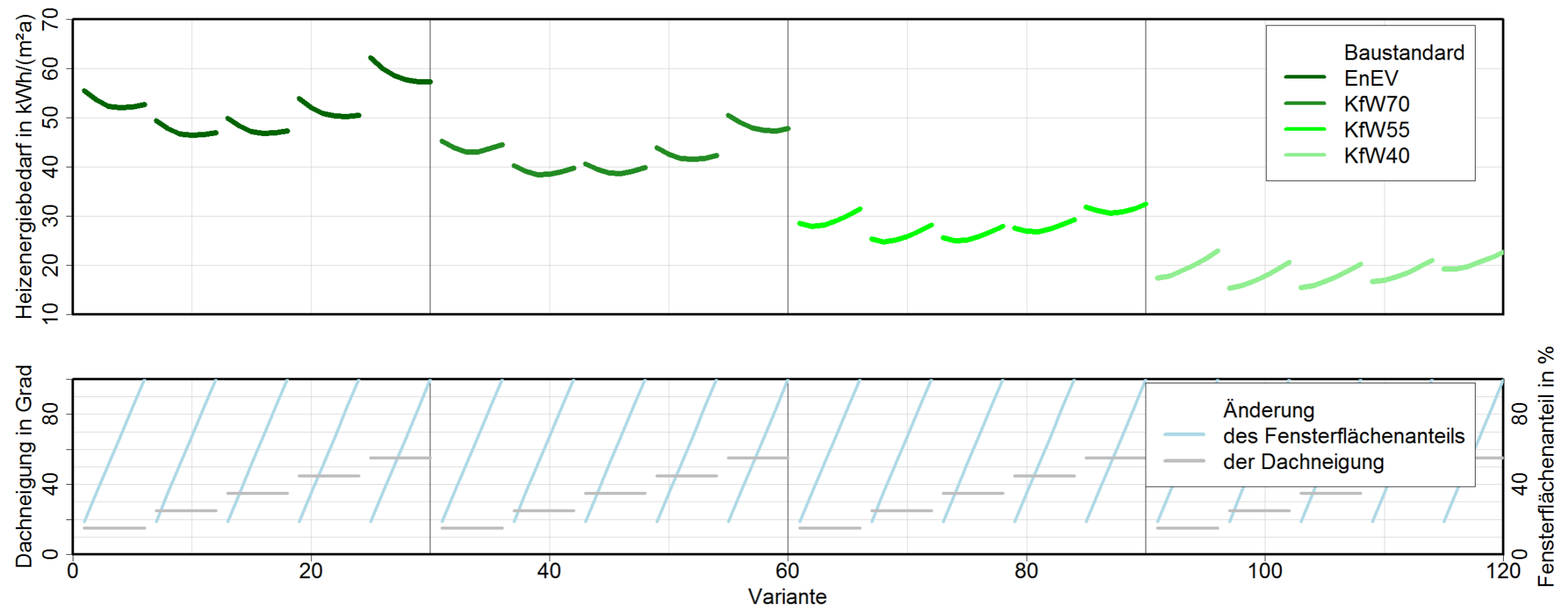


Abbildung 24: Verlauf des Heizenergiebedarfs bei Veränderung der Fensterflächenanteile, des Baustandards und der Dachneigung

8.2.2 Quantitative Überprüfung der Optimierung

Die quantitative Überprüfung der Berechnungen wird mittels Vergleichsrechnungen in IDA ICE durchgeführt. Hierzu werden stichprobenartig Einzelvarianten in IDA ICE nachmodelliert und die Berechnungsergebnisse mit denen aus der beispielhaften Umsetzung der neuen Methode verglichen. Die stichprobenartige Betrachtung von Einzelvarianten ist in diesem Fall ausreichend, da durch die Funktionsüberprüfung in Kapitel 8.1 gezeigt werden konnte, dass die Implementierung des thermischen Modells in die neue Methode gelungen ist.

Die Variante, welche beispielhaft überprüft wird, ist die Variante mit einer Dachneigung von 45° , einem Fensterflächenanteil der Südfassade von 67 % und einem KfW55 Baustandard. IDA ICE berechnet dabei einen Energiebedarf von $4,9 \cdot 10^3$ kWh/a. Bei beiden Variantenkombinationen, Dn-Bst-Ffa und Ffa-Bst-Dn, werden mittels der Optimierung Bedarfswerte von $4,9 \cdot 10^3$ kWh/a errechnet. Die Berechnungen weichen absolut um lediglich -40,4 kWh/a voneinander ab und gelten dadurch als valide.

Die Überprüfung der Optimierung liefert demnach sowohl qualitativ als auch quantitativ positive Ergebnisse.

8.3 Überprüfung der Ökonomiebetrachtung

Neben der eben beschriebenen Validation des thermischen Modells und der Überprüfung der Optimierung wird an dieser Stelle noch eine Überprüfung der Ökonomiebetrachtung durchgeführt. Dies ist notwendig, damit die Berechnungsgrundlagen vollständig in der Umsetzung der neuen Methode integriert sind und somit kein validiertes Verfahren in Form eines generischen Programms verwendet wird.

Die Überprüfung wird auf Basis der Herstellungskosten und Nutzungskosten durchgeführt. Ebenso wie bei der Betrachtung der Optimierung werden die Herstellungskosten sowohl qualitativ durch Logik als auch quantitativ durch Vergleich mit Literaturangaben betrachtet. Die Nutzungskosten werden lediglich durch Vergleichsrechnung überprüft.

8.3.1 Überprüfung der Herstellungskosten

Die Berechnung der Herstellungskosten wird auf Grundlage der in Kapitel 7.3 dargestellten Randbedingungen durchgeführt. Als Basis für die Berechnung wird ein Einfamilienhaus mit EnEV Gebäudestandard in Satteldachbauweise mit einer Wohnfläche von 150 m² verwendet.

Qualitative Überprüfung der Herstellungskosten

Die Überprüfung der Ergebnisse erfolgt durch die Überprüfung der Entwicklung der Kosten bei Veränderung des Baustandards. Wird der Baustandard erhöht, ist zu erwarten, dass sich die Herstellungskosten erhöhen.

In Abbildung 25 ist die Kostenentwicklung der Herstellungs- und Nutzungskosten über die Veränderung des Baustandards aufgetragen. Die abgebildeten Säulen verdeutlichen hierbei die auf der Datengrundlage der statistischen BKI-Kostenkennwerte berechneten mittleren Kosten. Zusätzlich zu diesen Kosten sind mit Fehlerbalken die jeweiligen Minimal- und Maximalkosten angegeben.

Es zeigt sich, dass sich die Kosten wie erwartet verhalten und eine Zunahme der Herstellungskosten bei einer Erhöhung des Baustandards zu erkennen ist. Lediglich

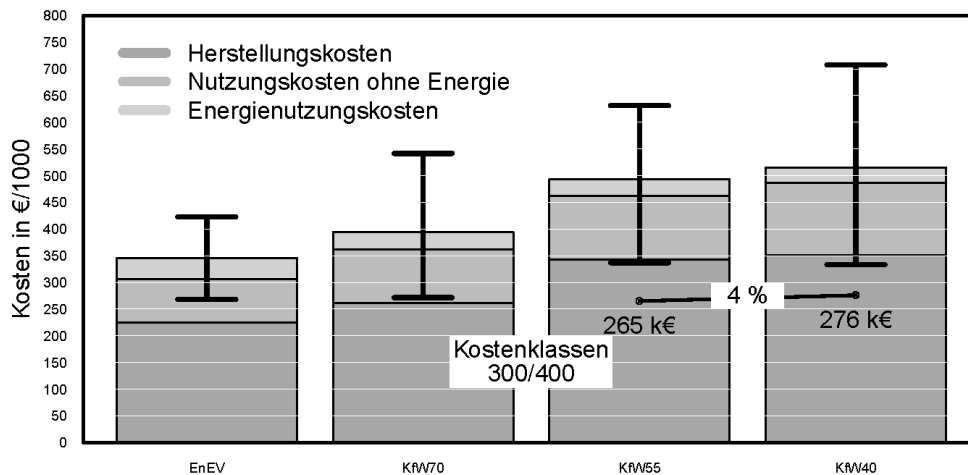


Abbildung 25: Veränderung der Life cycle kosten bei Veränderung des Gebäudestandards

bei Erhöhung des Baustandards von KfW 55 zu KfW 40 ist ein geringerer Anstieg der Kosten zu erkennen. Der Grund hierfür liegt in der Gliederung der verwendeten statistischen Kostenkennwerte. Der Trend der Kosten ist jedoch wie erwartet.

Quantitative Überprüfung der Herstellungskosten

Zur quantitativen Überprüfung der Herstellungskosten wird ein Vergleich zwischen Herstellungskosten aus Literaturangaben und aus der Implementierung gewonnenen Werten gezogen.

Im Rahmen der ILS Studie [12] wurden Baukosten (Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276) von Gebäuden unterschiedlicher Standards verglichen. Die Studie zeigt, dass der Kostenunterschied zwischen einem Gebäude mit einem dem KfW 40 Standard vergleichbaren Baustandard lediglich 5 % bis 20 % teurer ist als ein dem KfW 50 Standard ähnlichem Gebäude.

Tabelle 7: Ergebnisse der Überprüfung der ökonomischen Berechnungen anhand eines Vergleiches mit den Ergebnissen des Instruments zur Abschätzung von Lebenszykluskosten nach [3]

betrachtete KG nach DIN 18960	Beschreibung	Barwert [€]		Delta
		LCC-TOOL	neue Methode	
regelmäßige Kosten				
311 und 321	Barwert ohne Preisanpassung	17 667,16	17 667,25	- 0,09
352 und 410	mit 410 (+ Instandsetzung 0,6%)	24 317,93	24 317,93	0,00
353 und 420	Wartung und Instandsetzung	9 473,45	9 473,45	0,00
		51 458,54	51 458,63	-0.09
unregelmäßige Kosten				
410	pauschal 0,6 %	20 681,49	20 681,49	0,00
420	detailliert	8 770,85	8 770,84	0.01
		13 009,66	-4 238,81	
		29 452,34	29 452,33	0,01
		80 910,88	80 910,96	-0.08

Die durch die Implementierung berechneten mittleren Baukosten belaufen sich für ein Gebäude nach KfW 55 Standard auf 265.000 € und für ein Gebäude nach KfW 40 Standard auf 276.000 €. Hieraus ergibt sich ein Kostenerhöhung von 4 %, welche vergleichbar mit der Kostenerhöhung der Referenz aus der Literatur ist.

8.3.2 Überprüfung der Nutzungskosten

Die Überprüfung der Nutzungskosten wird auf Grundlage der mittleren Herstellungskosten durchgeführt. Diese Herstellungskosten werden dann zunächst nach dem beschriebenen Vorgehen berechnet, parallel dazu werden die so berechneten Herstellungskosten in das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit herausgegebene Instrument zur Abschätzung von Lebenszykluskosten [3] eingetragen und abschließend die Zwischen- und Endergebnisse beider Vorgehen miteinander verglichen. Die Ergebnisse werden als valide angenommen, wenn die Abweichung der sich ergebenden Nutzungskosten kleiner als 1 % ist.

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Betrachtung dargestellt. Die Auswertung ergibt, dass die Berechnung mittels der neuen Methode, bei gleichen Randbedingungen gleiche Ergebnisse liefert. Es ergibt sich bei der Betrachtung der gesamten Nutzungskosten, unter Verwendung der gleichen Randbedingungen, kein Unterschied. Die Berechnungen unter gleichen Randbedingungen sind somit valide.

9 Überprüfung der Funktionsweise der Methode

Nachdem im vorherigen Kapitel die Überprüfung des Basismodells dargestellt ist, wird im folgenden Kapitel beispielhaft die Berechnung auf Grundlage der neuen Methode dargestellt. Ziel dieser Darstellung ist, die Funktionsfähigkeit der Methode zu überprüfen.

Hierzu sind zunächst die Einzeleinflüsse der untersuchten Variablen auf die drei implementierten Zielgrößen dargestellt. In einer darauf folgenden Untersuchung sind die Kombinationseinflüsse auf Grundlage der in Kapitel 6 dargestellten Zielgrößenbetrachtung untersucht.

9.1 Einzeleinflüsse

Um die Vorgehensweise bei der Untersuchung der Einzeleinflüsse darzustellen, sind an einem Satteldachhaus alle Variablen verändert worden. Hierzu wurde das thermische Modell in der Basisvariante in die neue Methode eingelesen und mittels der angekoppelten Optimierung in Verbindung mit dem Simulationswerkzeug jeweils für eine Variable über den gesamten Wertebereich vollumfänglich berechnet. Die so gewonnenen Ergebnisse sind anschließend, vor dem Hintergrund der drei implementierten Zielgrößen, ausgewertet und analysiert worden. Resultat dieser Untersuchung ist die Darstellung der jeweiligen Einflüsse der Einzelvariable auf die betrachteten Zielgrößen.

In Abbildung 26 sind beispielhaft der Einfluss der Variable Mindestluftwechsel auf den Heiz- und Kühlkältebedarf und die Nutzungskosten für das Basismodell dargestellt.

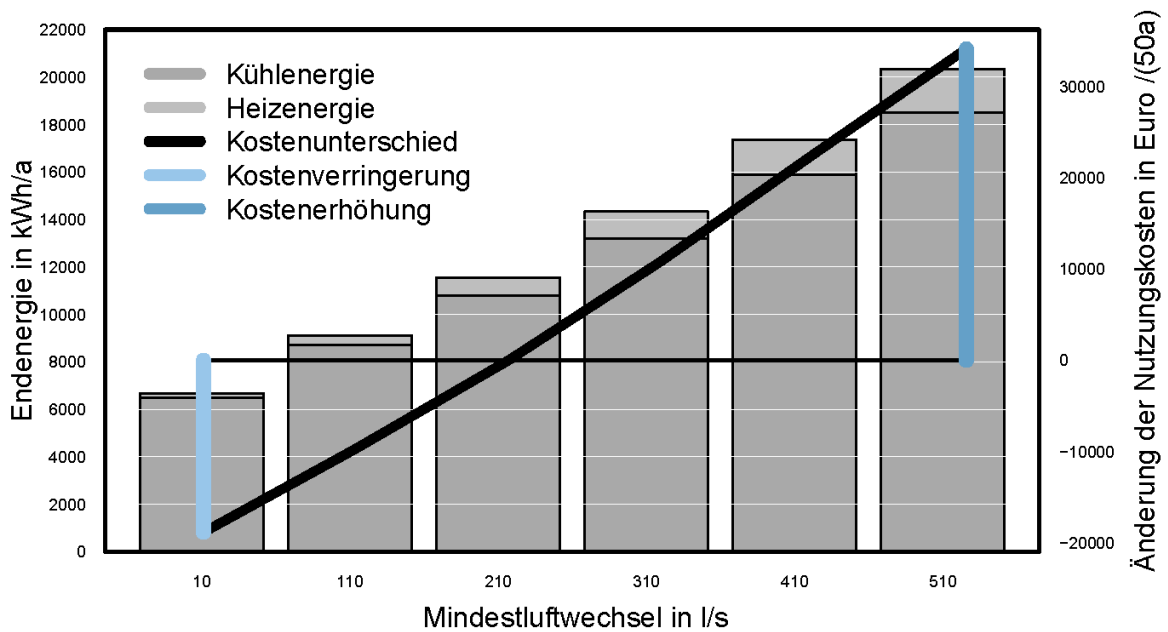


Abbildung 26: Darstellung der Ergebnisse für Heiz- und Kühllastbedarf und Nutzungskosten der Einzeleinflussbetrachtung für die Veränderung des Mindestluftwechsels

Ausgehend vom Basiswert der Variable, 210 l/s, zeigt sich für beide dargestellten Zielgrößen eine Reduktion bei Verringerung des Basiswertes und eine Erhöhung bei Vergrößerung. Das Kriterium der thermischen Behaglichkeit, die Übertemperaturgradstunden, ist in dieser Darstellung nicht gezeigt, für die Berechnungen jedoch auf einen Wert unterhalb von 1200 Kh gehalten. Die jeweilige Veränderung der Energie- und Kostenwerte wird als Delta zum Basiswert berechnet. In Abbildung 26 ist dieser Wert beispielhaft für die Nutzungskosten in hellblau als Kostenverringerung und in türkis als Kostenerhöhung dargestellt.

In gleicher Weise sind alle weiteren in Tabelle 6 aufgelisteten Variablen berechnet. Die sich für die Änderung der Nutzungskosten ergebenden quantitativen Einflüsse sind in Abbildung 27 dargestellt.

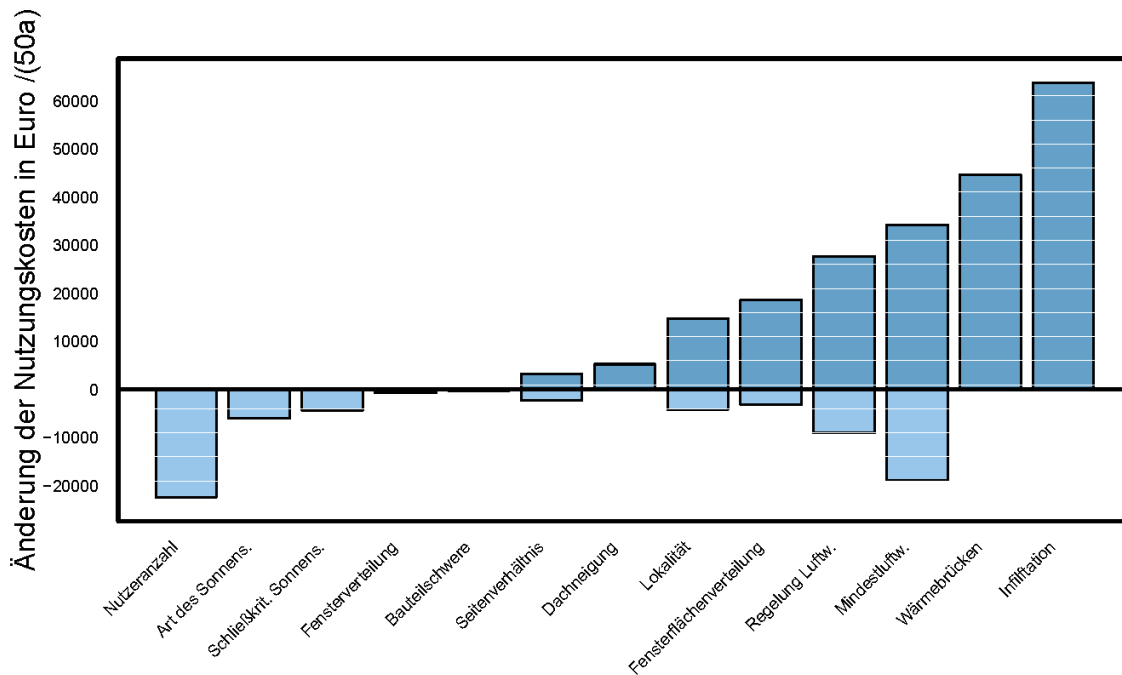


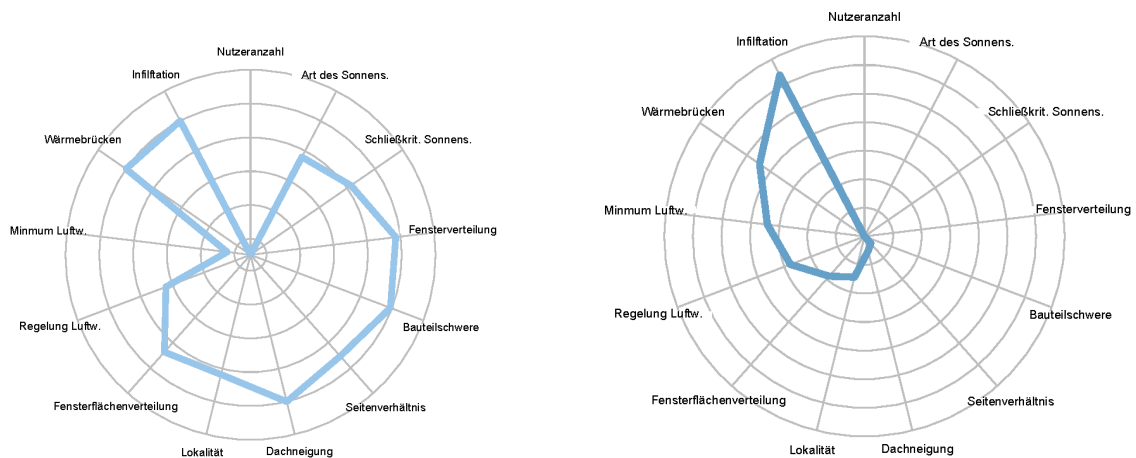
Abbildung 27: Änderung der Nutzungskosten der einzelnen Variablen bei Betrachtung der Einzeleinflüsse

Qualitativ können diese Ergebnisse mittels eines Spinnendiagramms dargestellt werden. Diese sind für die Veränderung der Nutzungskosten in Abbildung 28 dargestellt.

In gleicher Weise ist es auch möglich, die Einzeleinflüsse weiterer Variablen darzustellen und zu analysieren.

9.2 Kombinationseinflüsse

Das Hauptanwendungsgebiet der neuen Methode liegt jedoch in der Optimierung der genannten Zielgrößen unter Berücksichtigung mehrerer Variablen. Wie bereits in Kapitel 5 dargestellt, liegt ein Forschungsschwerpunkt des Bereich BPO in der Verbesserung und Anpassung der Optimierungsalgorithmen und der Eingrenzung des Optimierungsraumes. Da im Rahmen der Entwicklung der neuen Methode ein generisches Optimierungsprogramm an die verwendete Programmierumgebung



(a) Maximale Reduktion der Nutzungskosten je Variante
 (b) Maximale Erhöhung der Nutzungskosten je Variante

Abbildung 28: Qualitative Betrachtung des Einflusses der Einzelvariablen auf die Zielgröße Nutzungskosten

angebunden wurde, kann hier auf die explizite Betrachtung dieses Bereichs verzichtet werden. Ziel der Berechnung von Kombinationseinflüssen ist es demnach zu zeigen, dass die neue Methode durch Zuhilfenahme unterschiedlicher Optimierungsalgorithmen Optima finden kann.

Hierzu können die in Kapitel 6.2 beschriebenen Zielgrößenbetrachtungen verwendet werden. Beispielhaft für die gezeigten Kombinationen sind im Folgenden die Ergebnisse der Betrachtung der Zielgrößen Ökonomie und thermische Behaglichkeit unter der einschränkenden Größe der Energieeffizienz dargestellt. Das Ziel der Optimierung ist, die Variante mit den minimalen Lebenszykluskosten und minimalen Übertemperaturgradstunden bei einem Baustandard von mindestens dem nach Energieeinsparverordnung zu finden. Betrachtet werden die Variablen Nutzeranzahl, Dachneigung, Schließkriterium des Sonnenschutzes, Art des Sonnenschutzes, Minimum des Luftwechsels und Regelung des Luftwechsels. Als Grundlage dient das in Kapitel 7 beschriebene Basismodell.

Um den Einfluss des Optimierungsalgorithmus mit in die Betrachtung einzubeziehen und eine Abschätzung über die Güte des gefundenen Optimums zu erhalten, wird die Berechnung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Algorithmen durchgeführt. Ergeben sich dabei nur leichte Abweichungen gilt das Ziel der Betrachtung als erfüllt.

9.2.1 Berechnung mittels des Particle Swarm Algorithmus

Für die erste Berechnung wurde der Optimierungsalgorithmus auf Basis eines Particle Swarm (PSO) nach Kennedy und Eberhart [57] verwendet. Dieser Algorithmus gehört zur Gruppe der populationsbasierten, evolutionsbasierten Optimierungsalgorithmen. Im Rahmen der PSO-Suche werden Gruppen von Lösungen, die sog. Populationen, erzeugt. Innerhalb jeder Population werden die einzelnen Lösungen, Partikel bezeichnet, miteinander und mit den Partikeln der Vorgängerpopulation verglichen. Mittels der jeweils besten Partikel wird dann die Auswahl der Varianten der nächsten Generation bestimmt. Der Vorteil dieses Algorithmus liegt hauptsächlich in der Robustheit gegenüber Unstetigkeiten der Zielfunktion begründet. Zusätzlich hierzu kann unter Verwendung des PSO die Parallelrechnung der neuen Methode verwendet werden.

Im Rahmen des oben beschriebenen Problems wurden unter Verwendung des PSO 800 Varianten berechnet. Durch die Parallelrechnung dauerte die Berechnung lediglich 70 Minuten.

Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abbildung 29 dargestellt.

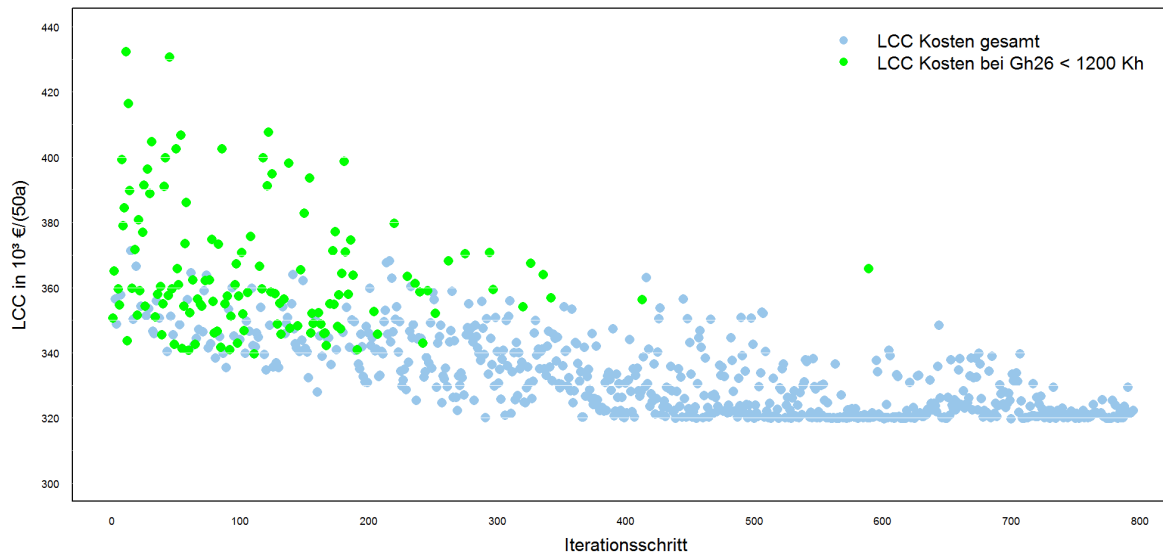


Abbildung 29: Optimierungsverlauf unter Verwendung des Particle Swarm Optimization Algorithmus (PSO), ohne (blau) und mit (grün) Berücksichtigung der Zielgröße thermische Behaglichkeit

Hierbei wurde zunächst der Ansatz der Optimierung aus Kapitel 4.1.1 verwendet und keine Einschränkung hinsichtlich der Übertemperaturgradstunden eingesetzt. Die aus dieser Vorgehensweise berechneten LCC Kosten sind als blaue Punkte, LCC Kosten gesamt, in Abbildung 29 dargestellt. Reduziert man die Ergebnisse hinsichtlich der Zielgröße thermische Behaglichkeit auf lediglich die Ergebnisse mit Übertemperaturstunden nach DIN 4108-2 [28], $G_{h_{26}}$ kleiner 1200 Kh für Wohngebäude ergeben sich die in Abbildung 29 orange dargestellten Punkte.

Die sich hieraus ergebende optimale Variante ist mit den Instanzen der einzelnen Variablen in Tabelle 8 dargestellt. Die minimalen LCC-Kosten belaufen sich demnach auf ca. 340.000,- € bei lediglich 380 Übertemperaturgradstunden.

Eine im Anschluss durchgeführte Validationsberechnung der optimalen Variante im Simulationsprogramm IDA ICE ergab für die Energie- und Übertemperaturgradstundenwerte identische Ergebnisse.

Tabelle 8: Optimales Ergebnis und zugehörige Instanzen der Variablen bei Berechnung mittels des PSO Algorithmus

LCC-Kosten [€]	Gh ₂₆ [Kh]	Nutzeranzahl [-]	Dachneigung [°]
339678	380	1	49
Schließkriterium Sonnenschutz [-]	Art des Sonnenschutzes [-]	Minimum des Luftwechsels [l/s]	Regelung des Luftwechsels [-]
345	0.79	97	16

Im Folgenden wurde diese Optimierung mittels unterschiedlicher Optimierungsalgorithmen wiederholt. Hierbei sollte einerseits untersucht werden, ob das mittels des PSO Algorithmus gefundene Optimum ein lokales oder globales Optimum ist, und andererseits sollten beispielhaft die Unterschiede einzelner Algorithmen gezeigt werden.

9.2.2 Berechnung mittels Multistart Generalized Pattern Search Methode

Im Rahmen der zweiten Berechnung des dargestellten Optimierungsproblems wird eine multistart Generalized Pattern Search Methode, multistart GPS Methode, auf Grundlage von [24] und nach der Verallgemeinerung von [8] verwendet.

Der Algorithmus der multistart GPS Methode gehört zur Gruppe der numerischen Optimierungsverfahren, weshalb mittels der GPS Methode Funktionen betrachtet werden können, die nicht kontinuierlich oder differenzierbar sind. Im Rahmen der Suche wird auf dem zu untersuchenden Variablenraum ein Netz, Pattern, definiert, das entsprechend vordefinierter Regeln untersucht wird. Wird bei dieser Untersuchung keine Abnahme der Ergebniswerte auf den Gitterpunkten errechnet, wird im nächsten Iterationsschritt der Abstand zwischen den Gitterpunkten verringert

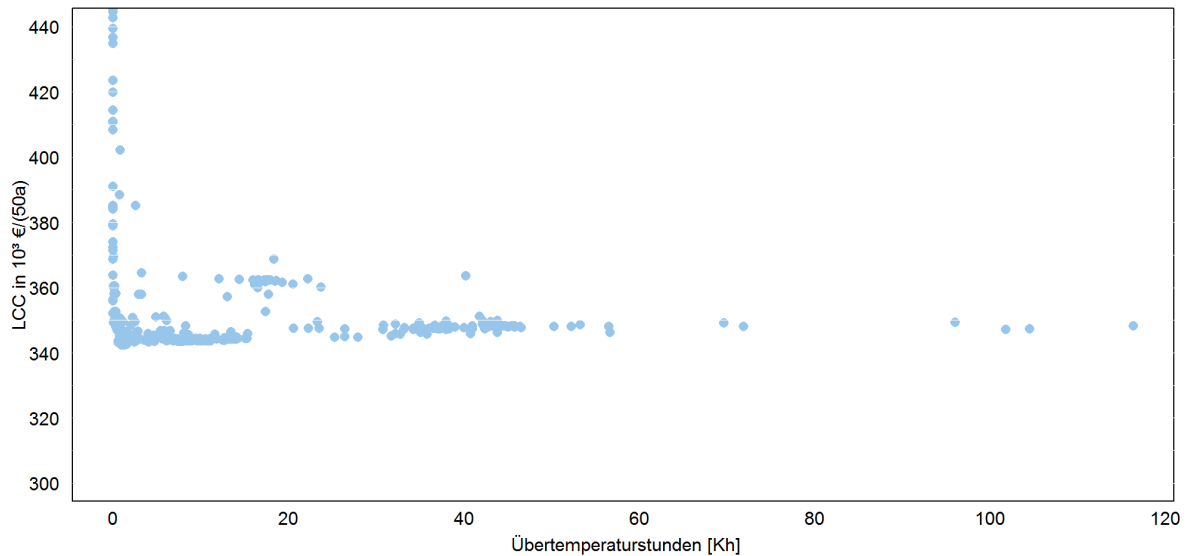


Abbildung 30: Gegenüberstellung der LCC-Kosten und Übertemperaturgradstunden unter Verwendung des multistart Generalized Pattern Search Algorithmus (GPS)

und der Vorgang wiederholt. Der mittels des generischen Optimierers in die neue Methode implementierte multistart GPS Algorithmus nach [90] verwendet zudem unterschiedliche Startpunkte.

Für die Optimierung werden 500 Varianten berechnet. Da im Rahmen dieses Algorithmus keine Parallelrechnung möglich ist, wurden 138 Minuten Rechenzeit benötigt.

In Abbildung 30 sind die Ergebnisse für die LCC-Kosten und Übertemperaturgradstunden gegeneinander aufgetragen. Es ist ein deutliches Optimum der Kosten nahezu ohne Übertemperaturen zu erkennen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass beide Zielgrößen gleichzeitig betrachtet wurden. Als optimale Variante errechnet der Algorithmus 342.000,- € bei lediglich einer Übertemperaturgradstunde.

9.2.3 Berechnung mittels Simplex Algorithmus

Abschließend wird, als dritte Berechnung, die Optimierung mittels des Simplex Algorithmus nach J. A. Nelder und R. Mead [69] mit den Erweiterungen nach R. O'Neil [73] verwendet.

Der Simplex-Algorithmus gehört ebenfalls zur Gruppe der numerischen Optimierungsverfahren und wird zur Lösung linearer Optimierungsprobleme eingesetzt. Im Rahmen der Simplex-Optimierung wird ein n-dimensionalen Simplex in den Variablenraum eingefügt, der durch die unabhängigen Variablen aufgespannt wird. An jedem der Eckpunkte des Simplex, wird der Ergebniswert ausgewertet. In jedem Iterationsschritt wird der Punkt mit dem höchsten Ergebniswert durch einen anderen Punkt ersetzt und neu berechnet. Der Algorithmus besteht dabei aus den drei Hauptfunktionen Punktspiegelung, Kontraktion des Simplex und Erweiterung des Simplex.

Für die Optimierung werden 473 Varianten berechnet. Da im Rahmen dieses Algorithmus ebenfalls keine Parallelrechnung möglich ist, wurden 180 Minuten Rechenzeit benötigt.

Abbildung 31 zeigt, dass mittels des Simplex Algorithmus für dieses Problem keine Lösungen gefunden werden können. Der Algorithmus schwankt lediglich zwischen zwei Varianten hin und her und vermag dadurch kein Optimum zu finden.

Wird das Optimierungsproblem auch mittels der weiteren, im verwendeten Optimierungswerkzeug implementierten Algorithmen berechnet, so zeigt sich auch hier das eben beschriebene Verhalten. Teilweise werden Optima errechnet, die sehr nahe am

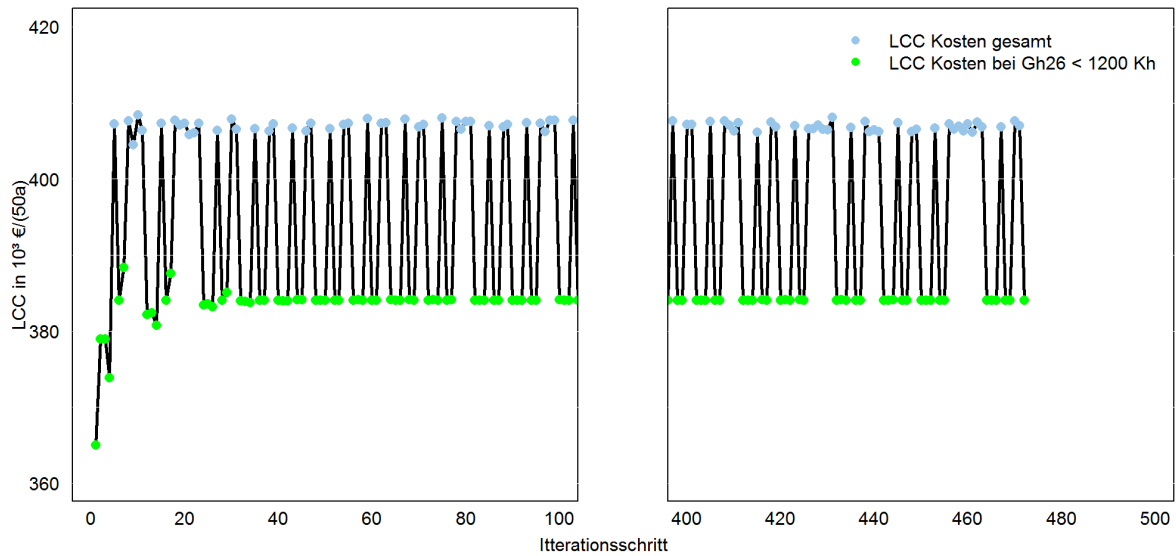


Abbildung 31: Optimierungsverlauf unter Verwendung des Simplex Algorithmus unter Berücksichtigung der Zielgröße thermisch Behaglichkeit

in Tabelle 8 gezeigten Ergebnis liegen, teilweise wird, wie beim Beispiel des Simplex Algorithmus, kein Optima gefunden. Eine weitere Untersuchung hinsichtlich der Verwendung der Algorithmen für unterschiedliche Anwendungsfälle steht demnach noch aus.

Demgegenüber konnte durch die beispielhafte Anwendung der neuen Methode gezeigt werden, dass diese funktionsfähig ist und unter unterschiedlichen Randbedingungen optimale Ergebnisse liefert.

10 Einordnung zum Stand des Wissens

Wurde in den vorangegangenen Kapiteln die neue Methode sowohl theoretisch dargestellt als auch beispielhaft angewendet, so wird sie im folgenden Kapitel mit dem aktuellen Forschungsstand verglichen. Hierzu wird die neue Methode zunächst in die in Abbildung 13 dargestellte BPO-Landschaft eingefügt. Anschließend wird die neue Herangehensweise an die Zielgrößenbetrachtung mit der in Kapitel 5.3 verglichen.

10.1 Eingliederung der neuen Methode in die Methodenklassifikation

Die Eingliederung der neuen Methode in die BPO-Landschaft erfolgt in die Gruppe der generischen Optimierung mit automatischer Parametrisierung, generischer Simulation und interner Modellierung. Sie setzt sich von den anderen Methoden dahingehend ab, dass sie an einer Stelle der BPO-Landschaft eingegliedert ist, die bislang noch nicht belegt war. Die neue Methode ist die einzige Methode, die eine Verbindung zwischen zwei generischen Programmen schafft. Die Einordnung ist in Abbildung 32 als grün hinterlegte Systematik dargestellt.

Die neue Methode beinhaltet die Verwendung eines vollständigen thermischen Modells, das im Rahmen der Untersuchung, mittels des angekoppelten transienten Simulationsprogramms, berechnet wird. Hier unterscheidet sich die Methode grundsätzlich von der beispielsweise von Nielson [71] vorgestellten Methode, die eine vereinfachte Berechnung vornimmt. Darüber hinaus ist die neue Methode derart aufgebaut, dass mit einem Basismodell unterschiedlichste Fragestellungen untersucht

werden können. Durch die Verbindung von generischen Programmen sowohl für die Simulation, als auch für die Optimierung und eine in die Programmierumgebung integrierte automatische Parametrisierung, ist dies möglich.

Des Weiteren wird im Rahmen der hier vorgestellten Methode eine Berechnung der Kosten auf Basis einer vollständigen LCC-Berechnung durchgeführt, die neben den reinen Bauwerks- und Energienutzungskosten auch alle weiteren Kostengruppen der Herstellungs- und Nutzungskosten beinhaltet. In Kombination mit der Möglichkeit der Optimierung des geplanten Gebäudes hinsichtlich der Energiebedarfswerte für Heizen und Kühlen, der thermischen Behaglichkeit sowie der LCC-Kosten, entstand so eine einzigartige, neue Methode zur thermisch-energetischen und ökonomischen Optimierung von Gebäuden.

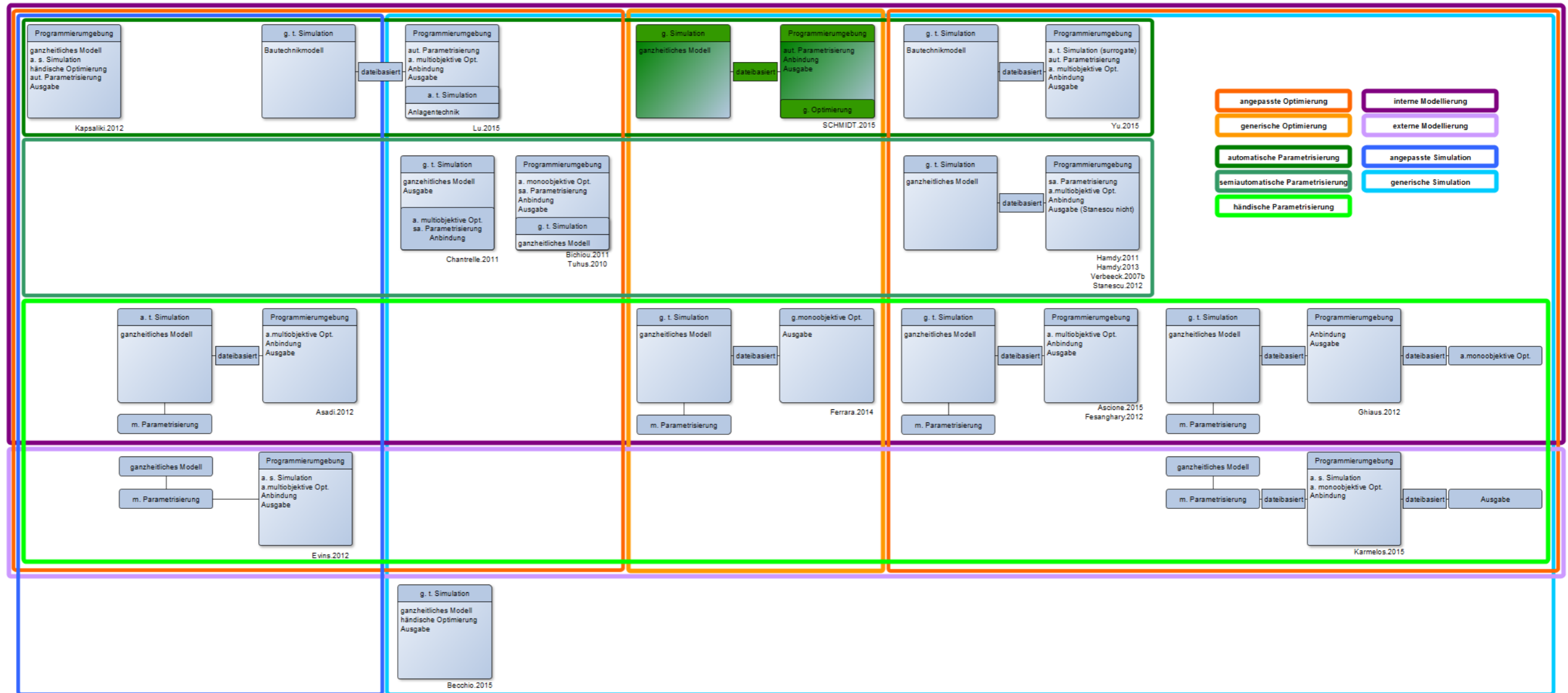


Abbildung 32: Einordnung der neuen Methode in die graphische Darstellung der BPO-Landschaft auf Grundlage der Methoden von [5],[6],[10],[13],[23],[36],[38],[39],[43],[44],[45],[54],[56],[63],[82],[84],[88],[92]

10.2 Unterscheidung hinsichtlich der Zielgrößenbetrachtung

Neben der Belegung des freien Platzes in der BPO-Landschaft unterscheidet sich die neue Methode hinsichtlich der Verwendung der Zielgrößen. Wie in Abbildung 19 dargestellt, in Kapitel 6.2 erläutert und beispielhaft für eine Kombination in Kapitel 9.2 ausgeführt, werden die Zielgrößen nicht wie bislang untersucht.

Im Rahmen der neuen Methode ist es möglich, eine automatische Einschränkung der möglichen Variablen auf ein vordefiniertes Niveau durchzuführen, wie dies in Kapitel 9.2 für den Baustandard gezeigt wurde. In den aktuellen Optimierungen werden meist vorausgewählte Varianten als Betrachtungsraum angesehen. Diese Vorauswahl bezieht sich auf die Verwendung spezifischer Variablenpakete [38], expliziter, beispielsweise auf ein gewisses Energieniveau hin ausgerichteter, diskreter Variablen [92] oder frei gewählter diskreter Variablen [84], nicht jedoch auf die Einschränkung des Baustandards als Gesamtes, bei freien Variablen hinsichtlich der Bautechnik. Dies ist lediglich in der neuen Methode dokumentiert.

Die neue Methode ist demnach sowohl hinsichtlich der verwendeten Vorgehensweise als auch hinsichtlich der möglichen Zielgrößenbetrachtung in neue Gebiete der BPO-Forschung vorgedrungen.

10.3 Selbstkritische Bewertung der Methode

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, sind die in Kapitel 2 formulierten Zielsetzungen von der entwickelten Methode erfüllt. Die Überprüfung der Funktionsweise der Methode in Kapitel 9 bestätigt die Anwendbarkeit dieser. Die Praxistauglichkeit der Anwendung der Methode kann jedoch mit Hilfe der Beispielanwendung nicht belegt werden.

Viele Aspekte wie die Funktionsfähigkeit und die Plausibilität der Ergebnisse sind durch die Anwendung an Beispielen gezeigt, jedoch werden viele der theoretisch angesprochenen Aspekte in dieser Arbeit nicht abgebildet und bleiben für Folgearbeiten offen. Zu nennen sind hier beispielsweise die Anbindung weiterer Simulations- und Optimierungsprogramme.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit konnte gezeigt werden, dass das methodische Vorgehen zielführend ist. Die für die praktische Anwendung notwendige Datengrundlage ist jedoch lediglich für kleinere und mittlere Wohngebäude gegeben. Gerade im Bereich der ökonomischen Berechnung müssen die Daten für eine Erweiterung der Methode auf weitere Gebäudearten eingearbeitet werden.

Grundsätzlich lässt sich die Methode ohne weiteres auf andere Gebäudetypen und Sanierungen anwenden. Die hierzu notwendige Erweiterung der Methode hinsichtlich der zusätzlich zu untersuchenden Variablen sind jedoch ebenfalls, wie die Überprüfung der Praxistauglichkeit, für Folgearbeiten offen.

11 Zusammenfassung

Motivation der Entwicklung der neuen Methode ist es, eine einfache, erweiterbare, zukunftsfähige und nutzerbezogene neue Methode zur thermisch-energetischen und ökonomischen Optimierung zu entwickeln. Hierzu wurde zunächst in den Kapiteln 3, 4 und 5 der aktuelle Stand des Wissens eruiert und eine graphische Darstellung der bis dato verwendeten Methoden, dargestellt in Abbildung 13, entwickelt. Die neue Methode setzt genau an dem noch nicht belegten Feld dieser graphischen Darstellung an und verbindet innerhalb einer Programmierumgebung ein generisches Simulationsprogramm mit einem generischen Optimierungsprogramm.

Die in Kapitel 6 beschriebene Methode, bestehend aus dem Modell, der Simulation, der Optimierung und der Ausgabe der Ergebnisse, setzt durch seine Struktur an den Punkten Einfachheit, Erweiterbarkeit und damit auch an der Zukunftsfähigkeit an. Durch die Verwendung eines automatischen, auf das jeweils angebundene Simulationsprogramm abgestimmten Modellinterpreters, ist es für den Nutzer sehr einfach, ein erstelltes Simulationsmodell der Optimierung zuzuführen. Eine möglichst einfach zu bedienendes Werkzeug ist durch die Verarbeitung aller notwendigen Schritte der Optimierung, wie die Definition der Zielgrößen, die Erstellung der Varianten, die Speicherung und Auswertung der Ergebnisse gegeben. Durch die ebenfalls interne Anbindung des Simulations- und Optimierungswerkzeuges, wird auch bei der Durchführung einer Optimierung dieser Grundsatz erfüllt.

Die Verwendung eines generischen Simulations- als auch Optimierungswerkzeuges führt dazu, dass Programmupdates und Aktualisierungen dieser nahezu ohne Anpassungen der Methode implementiert werden können. Zusammen mit der

Möglichkeit, weitere Simulations- als auch Optimierungswerkzeuge im Rahmen der neuen Methode zu verwenden, ist auch der Grundsatz der Erweiterbarkeit und Zukunftsfähigkeit der neuen Methode gegeben.

Die Nutzerbezogenheit der neuen Methode wird hauptsächlich durch die in Kapitel 6.2 dargestellte Zielgrößenbetrachtung deutlich. Insgesamt sind drei Zielgrößen, Energieeffizienz, als Energiebedarfswerte aus dynamisch instationärer Simulation, Ökonomie, als Lebenszykluskosten und thermische Behaglichkeit, als Übertemperaturgradstunden auf Basis von Operativtemperaturen, im Rahmen der neuen Methode betrachtet. Diese werden, wie in den Berechnungen in Kapitel 9 gezeigt, nach dem Grundsatz der besten Übereinstimmung mit den Wünschen und Anforderungen des Bauherrn nutzerbezogen kombiniert und anschließend optimiert. Dieses Vorgehen beinhaltet, dass nicht die systematisch beste Lösung des gegebenen Optimierungsproblems, sondern eine nach den spezifischen Angaben des Bauherrn beste Lösung gesucht wird.

Durch die Überprüfung der postulierten, neuen Methode mittels einer beispielhaften Umsetzung der Methode, konnte gezeigt werden, dass es mit der neuen Methode gelungen ist, sowohl die vier motivierenden Grundsätze aus Kapitel 2 zu erfüllen, als auch die Möglichkeiten auf dem Gebiet der BPO zu erweitern.

12 Entwicklungsmöglichkeiten und Ausblick

Die enge Anbindung von generischem Simulations- und generischem Optimierungswerzeug innerhalb einer Programmierumgebung, wie diese im Rahmen dieser Arbeit gezeigt wurde, adressiert sehr viele der im Rahmen der Recherche zum Thema BPO gefundenen Forschungsschwerpunkte, wie diese in Kapitel 5.5 beschrieben sind, trotzdem bleiben auch hier noch viele Fragen offen. Diese Entwicklungsmöglichkeiten erstrecken sich sowohl auf die hier dargestellte Methode, als auch auf die nähere und fernere Zukunft der Forschung im Bereich der BPO allgemein.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Methode sollten die nächsten Schritte zunächst auf die praktische Anwendung gerichtet werden. Wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden konnte, ist die vorgestellte Methode grundsätzlich anwendbar, wurde aber bislang noch nicht im praktischen Feldversuch getestet. Aus der Anwendung der Methode im baupraktischen Umfeld ergeben sich zusätzliche Anforderungen und Möglichkeiten der Überprüfung der Methode, gerade mit Blick auf die Nutzer- oder Anwenderbezogenheit. Neben der Verbesserung der Nutzerbezogenheit kann durch die Anwendung in der Baupraxis auch die Datengrundlage der verwendeten Materialien und auch der Preise erweitert werden.

Entwicklungsmöglichkeiten ergeben sich auch mit Blick auf die Anbindung weiterer Simulations- und Optimierungswerkzeuge. Hierdurch könnten neben den Optimierungen der thermischen Modelle auch Vergleiche zwischen unterschiedlichen Werkzeugen durchgeführt werden. Ein sich ergebender Vorteil hierbei wäre, dass beispielsweise durch die Verwendung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge, deren Berechnungsschwerpunkte in verschiedenen Bereichen liegen, IDA-ICE [34] im thermisch-energetischen Bereich, TRNSYS [83] im thermisch-anlagentechnischen

Bereich und WUFI Plus [40] im hygrothermischen Bereich, diese Berechnungsgrundlagen miteinander verglichen werden könnten. Ergebnisse aus diesen Untersuchungen können dazu genutzt werden, um die jeweiligen Anwendungsgebiete der Werkzeuge besser abzugrenzen und Vorschläge für Verbesserungen einzelner Werkzeuge gezielter abgeben zu können.

Auch die Weiterentwicklung der Optimierungsalgorithmen könnte hierdurch vorangetrieben werden, da durch die Anbindung unterschiedlicher Optimierungswerkzeuge ein Vergleich zwischen den implementierten Algorithmen bei gleichen Randbedingungen, jedoch unterschiedlichen Simulationswerkzeugen gezogen werden kann.

Ein Schwerpunkt zukünftiger Forschung auf dem Gebiet der BPO liegt auch in der detaillierten Untersuchung der in der Methode implementierten Varianten. Die aktuell in der beispielhaften Umsetzung der Methode implementierten Varianten, Tabelle 6, könnten einerseits um eine Vielzahl an zusätzlichen Varianten erweitert, andererseits durch weiterführende Untersuchungen noch spezifiziert werden. Beispielhaft sei hier der Baustandard genannt, der aktuell auf das gesamte Gebäude bezogen ist. Hierbei wäre es jedoch durchaus denkbar, unterschiedlichen Orientierungen unterschiedliche Konstruktionsvarianten zuzuordnen, was aktuell noch nicht implementiert ist.

Ausgehend von einem wissenschaftlichen Standpunkt sind zukünftige Untersuchungen mittels der neuen Methode hinsichtlich der Optimierung von Gebäuden in anderen Klimazonen von Interesse. Durch die einfache und umfassende Optimierung der Gebäude ist es lediglich durch die Erweiterung der Klimadaten möglich, Gebäude auch hinsichtlich anderer oder veränderter Klimaeinflüsse zu untersuchen.

2003 postulierte Morbitzer in seiner Dissertation zum Thema „Towards the integration of simulation into the building design process“ [67], dass die Anbindung von Simulation und Optimierung von Werkzeugen der 2. Generation auf die 4. Generation gehoben werden sollte (Abbildung 6). Dies sollte nach seiner Einschätzung mittels besserer Kopplung zwischen den beiden Programmen, einfacherer Eingabe der Probleme, Verwendung allgemeingültiger Vorgehensweisen und der Verwendung der Programme in mehr als einem Problemfall geschehen. Die meisten dieser Punkte wurden durch die vorgestellte Methode umgesetzt, jedoch die Stufe der 4. Generation von Werkzeugen noch nicht erreicht.

Als Fernziel der Entwicklung von Werkzeugen im Rahmen der BPO sollte demnach eine vollständig integrierte Methode, in der alle Eigenschaften der besten thermischen Simulation, Optimierung und Zielgrößendefinition zusammengefasst sind, erreicht werden.

Literatur

- [1] IBPSA-USA (Hrsg.): *Best Directory: Building Energy Software Tools*. 2014.
URL: <http://www.buildingenergysoftwaretools.com/>. – Zugriffsdatum: 06.05.2016
- [2] NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES (Hrsg.): *Energy Analysis Tools: Whole Building Design Guide*. 2015.
URL: <http://www.wbdg.org/resources/energyanalysis.php>. – Zugriffsdatum: 11.02.2015
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSI-CHERHEIT (Hrsg.): *Kriterien - BNB Büro- und Verwaltungsgebäude - Neubau - Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. 2016.
URL: https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/no_cache/bewertungssystem/bnb-buerogebaeude/bnb-bn-2011-1/kriterien-bnb-buero-und-verwaltungsgebaeude-neubau.html. – Zugriffsdatum: 29.04.2016
- [4] ANSYS: *Multiphysics Prgrammsystem*. 2012.
URL: <http://www.ansys.com/de-DE/Products/Multiphysics>. – Zugriffsdatum: 22.06.2016
- [5] ASADI, Ehsan; DA SILVA, MANUEL GAMEIRO; ANTUNES, Carlos H.; DIAS, Luís: A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. In: *Building and Environment* 56 (2012), S. 370–378
- [6] ASCIONE, Fabrizio; BIANCO, Nicola; STASIO, Claudio de; MAURO, Gerardo M.; VANOLI, Giuseppe P.: A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance. In: *Energy and Buildings* 88 (2015), S. 78–90
- [7] ATTIA, Shady; ANDRÉ, De H.: *Early Design Simulation Tools for Net Zero Energy Buildings: A comparison of ten tools*. November 14.-16.
- [8] AUDET, Charles; DENNIS, J. E.: Analysis of Generalized Pattern Searches. In: *SIAM Journal on Optimization* 13 (2002), Nr. 3, S. 889–903
- [9] BAUMANN, Lara; CHAN, Ethan; HOUGH, Patty: *Dakota Programmsystem: Algorithms for design exploration and simulation credibility*. 2015.
URL: <https://dakota.sandia.gov/>. – Zugriffsdatum: 22.06.2016
- [10] BECCHIO, Cristina; DABBENE, Paolo; FABRIZIO, Enrico; MONETTI, Valentina; FILIPPI, Marco: Cost optimality assessment of a single family house: Building and technical systems solutions for the nZEB target. In: *Energy and Buildings* 90 (2015), S. 173–187

- [11] BENKER, Hans: *Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen: Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von MATHEMATICA, MAPLE, MATHCAD, MATLAB und EXCEL*. Berlin [u.a.] : Springer, 2003 (Engineering online library). ISBN 3642629024
- [12] BERNDGEN-KAISER, Andrea: *ILS-Forschung. Bd. 2010, 2: Leben im Passivhaus. Baukonstruktion, Baukosten, Energieverbrauch, Bewohnererfahrungen*. Dortmund : ILS, Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung GmbH, 2010. ISBN 3869340428
- [13] BICHIOU, Youssef; KRARTI, Moncef: Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings. In: *Energy and Buildings* 43 (2011), Nr. 12, S. 3373–3382
- [14] BKI (Hrsg.): *Teil 2 Bauelemente. Bd. 2: BKI Baukosten 2010: Teil 2: Statistische Kostenkennwerte für Bauelemente*. Stuttgart : BKI, 2012. ISBN 978-3-481-02676-9
- [15] BROCKHAUS AG (Hrsg.): *Brockhaus: Enzyklopädie: Wissenswertes über das Wissen der Welt*. Gütersloh : F.A. Brockhaus/wissenmedia in der inmediaONE GmbH, 2012.
URL: <http://www.brockhaus-encyklopaedie.de/>
- [16] BRONSTEIN, Ilya N.; SEMENDJAJEW, Konstantin A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 5. Auflage. Thun [u.a.] : Deutsch, 2001. ISBN 3-8171-2015-x
- [17] BROWN, Carrie; GLICKSMANN, Leon; LEHAR, Matthew: Toward zero energy buildings: optimized for energy use and cost. In: IBPSA-USA (Hrsg.): *Proceedings of 4th National Conference of IBPSA-USA*,
URL: <http://www.ibpsa.us/pub/simbuild2010/papers/SB10-D0C-TS09A-02-Brown.pdf>, 2010, S. 452–457
- [18] BUCHHOLZ, Peter: *Modellgestützte Analyse und Optimierung*. Internet, Technische Universität Dortmund, Dissertation.
URL: http://ls4-www.cs.tu-dortmund.de/cms/de/lehre/vorherige_semester/2011_ss/mao/index.html
- [19] BUND: *Verordnung über einergiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden: EnEV*.
URL: <http://www.bmwi.de/DE/Service/gesetze,did=23820.html>. – Zugriffsdatum: 25.09.2013
- [20] BUNDEMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG ; BMVBS (Hrsg.): *Steckbrief der ökonomischen Qualität: Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus*. 2011.

URL: http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/BNB_Steckbriefe_Buero_Neubau/aktuell/BNB_BN_211.pdf. – Zugriffsdatum: 22.04.2014

- [21] BURKARD, Rainer e.: *Einführung in die mathematische Optimierung*. Graz, Technische Universität Graz, Dissertation, 2007.
URL: <http://www.opt.math.tu-graz.ac.at/~hatzl/Vorlesungen/MathoptSS09/Opt.pdf>
- [22] CELLIER, Francois: *Continuous system modeling*. New York : Springer-Verlag, 1991. ISBN 978-3-540-97502-1
- [23] CHANTRELLE, Fanny P.; LAHMIDI, Hicham; KEILHOLZ, Werner; MANKIBI, Mohamed E.; MICHEL, Pierre: Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. In: *Applied Energy* 88 (2011), Nr. 4, S. 1386–1394
- [24] DAVIDON, William C.: Variable Metric Method for Minimization. In: *SIAM Journal on Optimization* 1 (1991), Nr. 1, S. 1–17
- [25] DIN 18960: *Nutzungskosten im Hochbau*. Februar 2008
- [26] DIN 276-1: *Kosten im Bauwesen- Teil 1: Hochbau*. Dezember 2008
- [27] DIN 277-1: *Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau Teil 1 Begriffe, Ermittlungsgrundlagen*. Februar 2005
- [28] DIN 4108-2: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Februar 2013
- [29] DIN EN ISO 13786: *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermisches Kenngrößen - Berechnungsverfahren (ISO 13786:2007); Deutsche Fassung EN ISO 13786:2001*. April 2008
- [30] DIN V 18599-2: *Energetische Bewertung von Gebäuden- Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäuden*. Dezember 2011
- [31] DIN V 4108-6: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden- Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*. Juni 2003
- [32] DROSDOWSKI, Günther (Hrsg.): *Duden: Das Fremdwörterbuch*. Bd. 5. Mannheim : Bibliographisches Institut, 1990. ISBN 3-411-20915-1
- [33] EISENHOWER, Bryan; O'NEILL, Zheng; NARAYANAN, Satish; FONOBEROV, Vladimir A.; MEZIĆ, Igor: A methodology for meta-model based optimization in building energy models. In: *Energy and Buildings* 47 (2012), S. 292–301
- [34] EQUA: *IDA Early Stage Building Optimization (ESBO): User Guide ESBO*. 2011

- [35] EVINS, Ralph: A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (2013), S. 230–245
- [36] EVINS, Ralph; POINTER, Philip; VAIDYANATHAN, Ravi; BURGESS, Stuart: A case study exploring regulated energy use in domestic buildings using design-of-experiments and multi-objective optimisation. In: *Building and Environment* 54 (2012), S. 126–136
- [37] FEIST, Wolfgang: *Thermische Gebäudesimulation: Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze*. 1. Heidelberg : Müller, Jur. Verl., 1994. ISBN 9783788074869
- [38] FERRARA, Maria; FABRIZIO, Enrico; VIRGONE, Joseph; FILIPPI, Marco: A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings. In: *Energy and Buildings* 84 (2014), S. 442–457
- [39] FESANGHARY, Mohammad; ASADI, Somayeh; GEEM, Zong W.: Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm. In: *Building and Environment* 49 (2012), S. 245–250
- [40] FRAUNHOFER IBP: *WUFI® Plus*. online. 2015.
URL: <https://wufi.de/de/software/wufi-plus/>. – Zugriffsdatum: 19.12.2015
- [41] GERDES, Ingrid; KLAWONN, Frank; KRUSE, Rudolf: *Evolutionäre Algorithmen: Genetische Algorithmen - Strategien und Optimierungsverfahren - Beispielanwendungen ; [mit Online-Service zum Buch]*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2004 (Computational intelligence). ISBN 9783528055707
- [42] GERTIS, Karl; HAUSER, Gerd: Instationärer Berechnungsverfahren für den sommerlichen Wärmeschutz im Hochbau: Eine zusammenfassende Darstellung auf Grund des vorliegenden Schrifttums. In: GERTIS, K. (Hrsg.); HAUSER, G. (Hrsg.): *Instationärer Wärmeschutz* Bd. Heft 103. Berlin : W. Ernst, 1975, S. 27–53.
URL: <http://www.bp.bv.tum.de/?Forschung:Publikationen#1979>. – Zugriffsdatum: 24.08.12. ISBN 9783433007327
- [43] GHIAUS, Christian; JABBOUR, Noel: Optimization of multifunction multi-source solar systems by design of experiments. In: *Solar Energy* 86 (2012), Nr. 1, S. 593–607
- [44] HAMDY, Mohamed; HASAN, Ala; SIREN, Kai: Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings. In: *Building and Environment* 46 (2011), Nr. 1, S. 109–123
- [45] HAMDY, Mohamed; HASAN, Ala; SIREN, Kai: A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010. In: *Energy and Buildings* 56 (2012), S. 189–203

- [46] HAMDY, Mohamed; PALONEN, Matti; HASAN, Ala: Implementation of Pareto-Archive NSGA-II algorithms to a nearly-zero-energy building optimisation problem. In: ENGLAND, IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation optimisation Conference 2012* Bd. 1, URL: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS02012/3A3.pdf>, 2012, S. 181–188
- [47] HASAN, Ala; PALONEN, Matti: Implementations of the Multi-Objective Building Performance Optimization Software MOBO. In: EVINS, Ralph (Hrsg.); VIKTOR, Dorer (Hrsg.); JAN, Carmeliet (Hrsg.): *Proceedings of the COLEB 2014 Workshop*, 2014
- [48] HAUSER, Gerd: *Rechnerische Vorherbestimmung des Wärmeverhaltens großer Bauten*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 1977
- [49] HAUSER, Gerd: Niedrigenergiehäuser: bauphysikalische Entwurfsgrundlagen. In: *Informationsdienst Holz* 1994 (1994), Nr. Reihe 1 Teil 3 Folge 2, S. 1–24
- [50] HIRSCH, Jeff: *DOE-2 Programmsystem*. 2013. URL: <http://doe2.com/>. – Zugriffsdatum: 11.02.2015
- [51] HIRSCH, Jeff: *eQUEST Programmsystem*. 2016. URL: <http://www.doe2.com/equest/>. – Zugriffsdatum: 22.06.2016
- [52] HOPFE, Christina J.: *Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization*. Eindhoven, Technische Universität Eindhoven, Dissertation, 2009. URL: http://www.researchgate.net/profile/Christina_Hopfe/publication/254871755_Uncertainty_and_sensitivity_analysis_in_building_performance_simulation_for_decision_support_and_design_optimization/links/02e7e538dac11e827c000000.pdf
- [53] JARRE, Florian; JARRE-STOER; STOER, Josef: *Optimierung*. Berlin [u.a.] : Springer, 2004 (Springer-Lehrbuch). ISBN 978-3-540-43575-4
- [54] KAPSALAKI, Maria: *Economic-efficient design of residential net zero energy buildings with respect to local context*. Porto, Univeridade do Porto, Dissertation, Juni 2012
- [55] KAPSALAKI, Maria; LEAL, Vitor; SANTAMOURIS, Mat: A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings. In: *Energy and Buildings* 55 (2012), S. 765–778
- [56] KARMELOS, Marias; KIPRAKIS, Aristides; MAVROTAS, George: A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies. In: *Applied Energy* 139 (2015), S. 131–150

- [57] KENNEDY, J.; EBERHART, R.: Particle swarm optimization. In: *ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 1995, S. 1942–1948
- [58] KÜNZEL, Helmut: *Bauphysik: Geschichte und Geschichten; Teil 1 Baustoffe, Baukonstruktionen und Bauforschung im 20. Jahrhundert; Teil 2 Bauphysik-Geschichten*. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verl., 2002. ISBN 3816761437
- [59] KUSUDA, Tamami: Building environment simulation before desk top computers in the USA through a personal memory. In: *Energy and Buildings* 33 (2001), Nr. 4, S. 291–302
- [60] KYOSUKE, Hiyama; YOSHIHIRO, Ishida; SHINSUKE, Kato: Building Simulation of thermal environment using response factor analysed by three-dimensional CFD. In: IBPSA INTERNATIONAL (Hrsg.): *Proceedings of BS2009*. Glasgow, 2009, S. 474–480.
URL: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0474_480.pdf. – Zugriffsdatum: 21.06.2016
- [61] LITGER, Kurt: *Optimierung: Eine Einführung in rechnergestützte Methoden*. Berlin [u.a.] : Springer, 2013. ISBN 978-3-642-87730-8
- [62] LOCQUENEUX, Robert: *Kurze Geschichte der Physik*. Göttingen : Vandenhoeck und Ruprecht, 1989. ISBN 3-525-03414-8
- [63] LU, Yuehong; WANG, Shengwei; ZHAO, Yang; YAN, Chengchu: Renewable energy system optimization of low/zero energy buildings using single-objective and multi-objective optimization methods. In: *Energy and Buildings* 89 (2015), S. 61–75
- [64] MARSH, Andrew: *Ecotect Analysis: Autodesk Knowledge Network*. 2011.
URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/ecotect-analysis>. – Zugriffsdatum: 22.06.2016
- [65] MATHWORKS: *Optimization Toolbox: Optimization Software*. 2016.
URL: <http://de.mathworks.com/products/optimization/>. – Zugriffsdatum: 22.06.2016
- [66] MEADOWS, Donella: *Thinking in systems: A primer*. White River Junction : Chelsea Green Publishing, 2014. ISBN 1-603-581-480
- [67] MORBITZER, Christoph A.: *Towards the integration of simulation into the building design process*. Glasgow, University of Strathclyde, Dissertation, 2003
- [68] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY: *EnergyPlus Programmsystem*. 2016.
URL: <https://energyplus.net/>. – Zugriffsdatum: 22.06.2016

- [69] NELDER, J. A.; MEAD, R.: A Simplex Method for Function Minimization. In: *The Computer Journal* 7 (1965), Nr. 4, S. 308–313
- [70] NGUYEN, Anh-Tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe: A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. In: *Applied Energy* 113 (2014), S. 1043–1058
- [71] NIELSON, Toke R.: *Optimization of buildings with respect to energy and indoor environment*. Lyngby, Danmarks Tekniske Universität, Dissertation, 09/2002.
URL: <http://www.byg.dtu.dk/upload/institutter/byg/publications/rapporter/byg-r036.pdf>
- [72] NIEMEYER, Gerhard: *Kybernetische System- und Modelltheorie: System dynamics*. 1. Aufl. München : Vahlen, 1977 (Systemstudium Wirtschaftsinformatik). ISBN 978-3-800-60581-1
- [73] O’NEILL, R.: Algorithm AS 47: Function Minimization Using a Simplex Procedure. In: *Applied Statistics* 20 (1971), Nr. 3, S. 338
- [74] PALONEN, Matti; HAMDY, Mohamed; HASAN, Ala: Mobo a new software for multi-objective building performance optimization. In: IBPSA INTERNATIONAL (Hrsg.): *Proceedings of BS2013* Bd. 14th,
URL: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1489.pdf, 2013, S. 2567–2574. ISBN 978-2-7466-6294-0
- [75] PERSSON, Anna; GRIMM, Henrik; AMOS, Ng: On-line instrumentation for simulation-based optimization. In: PERRONE, L. F. (Hrsg.); LAWSON, Barry G. (Hrsg.); LIU, Jason (Hrsg.); WIELAND, Frederick P. (Hrsg.): *WSC ’06: Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, Winter Simulation Conference, 2006, S. 304–311.
URL: <http://www.informs-sim.org/wsc06papers/034.pdf>. ISBN 1-4244-0501-7
- [76] POUNTNEY, Christopher: Better carbon saving: using a genetic algorithm to optimise building carbon reductions. In: ENGLAND, IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation optimisation Conference 2012*,
URL: <http://www.ibpsa-england.org/resources/files/bso-2012/3A1.pdf>, 2012, S. 165–172
- [77] RADFORD, Antony D.; GERO, John S.: On optimization in computer aided architectural design. In: *Building and Environment* 15 (1980), Nr. 2, S. 73–80
- [78] SAHLIN, Per; GROZMANN, Pavel: *IDA ICE Programmsystem*. digital. 2014.
URL: <http://www.equa.se/deliv/ICE45eng.pdf?lic=ICE40:4812>. – Zugriffsdatum: 03.03.2015

- [79] SALMINEN, Markku; PALONEN, Matti; SIREN, Kai: Combined energy simulation and multi- criteria optimisation of a LEED-certified building. In: ENGLAND, IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation optimisation Conference 2012*,
URL: <http://www.ibpsa-england.org/resources/files/bso-2012/6A1.pdf>,
 2012, S. 372–377
- [80] SCHAFFER, David J.; GREFENSTETTER, John J.: Multi-objective learning via genetic algorithms. In: ARAVIND, Joshi (Hrsg.): *Proceedings of the ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, The Conference and Distributed by Morgan Kaufmann Publishers, 1985, S. 593–595.
URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1625248>. ISBN 978-0-934-61302-6
- [81] SPATH, Christiane: *Simulationen: Begriffsgeschichte, Abgrenzung und Darstellung in der wissenschafts- und technikhistorischen Forschungsliteratur*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2009.
URL: http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.simtech.uni-stuttgart.de%2Fpublikationen%2Fprints_sr.php%3FID%3D115&ei=jXA_U0jMFufj4QTE9ICoBw&usg=AFQjCNGrnBzumBLXeB42gjaHxg40wh4c3g
- [82] STANESCU, Magdalena; KAJL, Stansilaw; LAMARCHE, Louis: Evolutionary algorithm with three different permutation options used for preliminary HVAC system design. In: ENGLAND, IBPSA (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation optimisation Conference 2012*,
URL: <http://www.ibpsa-england.org/resources/files/bso-2012/6A3.pdf>,
 2012, S. 386–393
- [83] TRANSSOLAR: *TRNSYS: Transient System Simulation Tool*. 2016.
URL: <http://www.trnsys.com/>. – Zugriffsdatum: 06.05.2016
- [84] TUHUS-DUBROW, Daniel; KRARTI, Moncef: Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. In: *Building and Environment* 45 (2010), Nr. 7, S. 1574–1581
- [85] UNIVERSITY OF STRATHCLYDE: *ESP-r Programmsystem*. 2011.
URL: <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>. – Zugriffsdatum: 22.06.2016
- [86] VAN TREEK, Christoph: *Introduction to Building Performance Simulation: A basic introduction to the numerical simulation of the energy and thermal quality performance of buildings using a geometry based zone model*. München, Technische Universität München, Dissertation, August 27, 2009
- [87] VDI 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen Begriffsdefinitionen*. November 1996

- [88] VERBEECK, Griet; HENS, Hugo: Life Cycle Optimization of Extremely Low Energy Dwellings. In: *Journal of Building Physics* 31 (2007), Nr. 2, S. 143–177
- [89] WETTER, Michael: *Simulation-Based Building Energy Optimization*. USA, University of California, Berkley, Dissertation, 2004.
URL: <http://simulationresearch.lbl.gov/wetter/download/mwdiss.pdf>
- [90] WETTER, Michael: *GenOpt manual: Generic Optimization Program*. 2011.
URL: <http://simulationresearch.lbl.gov/G0/>. – Zugriffsdatum: 03.03.2015
- [91] WRIGHT, Jonathan A.: *The optimised design of HVAC systems*. Loughborough, Loughborough University, Dissertation, 1986.
URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/7291/2/DX088981.pdf>
- [92] YU, Wei; LI, Baizhan; JIA, Hongyuan; ZHANG, Ming; DI WANG: Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. In: *Energy and Buildings* 88 (2015), S. 135–143

*Als Gott das Universum schuf, war seine geringste Sorge, es so zu schaffen, dass
wir es verstehen.*

Albert Einstein: nach Volker J. Becker: Gottes Geheime Gedanken, S.11