

ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR ABLEITUNG VON SANIERUNGSSTRATEGIEN MIT MATHEMATISCHER OPTIMIERUNG (DEUTSCHE VERSION)

Justus Medgenberg¹, Andreas Makowski²

¹ Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, Deutschland, E-Mail: justus.medgenberg@thws.de

² Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, Deutschland, E-Mail: andreas.makowski@thws.de

Kurzfassung

Die energetische Bestandssanierung hat für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors eine entscheidende Funktion. Um Ressourcen bestmöglich einzusetzen, ist die ganzheitliche Betrachtung und Optimierung von Sanierungsentscheidungen sinnvoll. Mathematische Optimierungsverfahren werden im deutschsprachigen Raum für diese Entscheidungsfindung bisher kaum genutzt. Vorgestellt wird eine neue Methodik, die mittels eines Metamodells auf Basis punktueller Simulationsergebnisse die Optimierung variabler Zielfunktionen erlaubt. Die Stärke der Methode liegt in der Anwendbarkeit für eine große Zahl von Sanierungskombinationen bei minimiertem Rechenaufwand. Ergebnisse für reale Sanierungsprojekte werden anhand eines exemplarisch untersuchten Einfamilienhaus vorgestellt. Dabei werden unterschiedliche Zielfunktionen betrachtet und optimierte Sanierungsstrategien abgeleitet. Derzeit ist die Methode für die Bewertung des Heizwärmebedarfs von Wohngebäuden anwendbar. Es sind verschiedene Erweiterungen denkbar und geplant.

Abstract

The energetic refurbishment of existing buildings plays a key role in the decarbonization of the building sector. In order to make the best possible use of resources, refurbishment decisions should be considered and optimized holistically. So far mathematical optimization methods have hardly been used for decision-making in German-speaking countries. A new method is presented that allows the optimization of variable target functions by means of a mathematical substitute model based on point results from dynamic building simulations. The strength of the method lies in its ability to analyze a large number of refurbishment combinations with minimized computational effort. The applicability to real refurbishment projects is presented using an exemplary residential building of the single-family house type. Different target functions are considered and optimized refurbishment strategies are derived. The method can currently be used to assess the heating

requirements of residential buildings. Further research is planned on this topic.

Einleitung

Die Bundesrepublik Deutschland strebt gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) eine Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 an. Der Gebäudesektor trägt gemäß der Datengrundlage des Klimaschutzgesetzes derzeit zu ca. 15% der ausgewiesenen Treibhausgasemissionen bei. Besonders im Bestand erfordert die Dekarbonisierung

a) eine Erhöhung der Energieeffizienz zur Verringerung der Verbrauchswerte

und

b) die Umstellung auf Versorgungs-technologien mit niedrigen spezifischen CO₂-Emissionen.

Daher ist von einer verstärkten Sanierungstätigkeit im Gebäudebestand für die nächsten Jahrzehnte auszugehen. Sowohl aus Sicht des individuellen Gebäudeeigentümers als auch aus übergeordneter Perspektive stellt sich dabei die Frage, mit welchen Sanierungsmaßnahmen jeweils eine effiziente Allokation von wirtschaftlichen und materiellen Ressourcen erreicht werden kann. Dabei spielen unterschiedlichste Fragestellungen und Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, CO₂-Gesamtbilanz von Sanierungsmaßnahmen, Höhe des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets, Qualität der vorhandenen Bausubstanz, verbleibende Restlebensdauer von Bauteilen usw. eine Rolle. In der Praxis werden Sanierungskonzepte meist durch hinzugezogene sachkundige Experten erstellt, die auf Grundlage ihrer Erfahrungen und Vorstellungen eine geeignete Sanierungsstrategie für das jeweilige Gebäude erarbeiten. Dieser Ansatz ist durch die vorhandenen personellen und inhaltlichen Beratungskapazitäten limitiert, sodass grundsätzlich ein Bedarf an alternativen entscheidungsunterstützenden Werkzeugen und Methoden besteht, um knappe Personal- und Know-how-Ressourcen zu entlasten. Hier können ITK oder KI basierte Verfahren grundsätzlich einen wertvollen Beitrag leisten.

Entwicklung einer praktisch anwendbaren Optimierungsmethodik

Grundsätzliche Anforderungen

Eine praktisch anwendbare, den Entscheidungsprozess unterstützende Optimierungsmethodik zur Analyse von Sanierungsvarianten sollte aus unserer Sicht mindestens folgenden Anforderungen erfüllen:

- c) Berücksichtigung von Energiebedarfen, Betriebs- und Investitionskosten sowie betriebs- und sanierungsbedingten CO₂-Emissionen
- d) Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Sanierungsmöglichkeiten
- e) Flexibilität hinsichtlich der zu optimierenden Zielfunktionen, je nach objekt- und nutzerspezifischer Fragestellung
- f) Flexibilität hinsichtlich projektspezifischer Restriktionen zum Beispiel hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets, CO₂-Emissionen etc.
- g) Idealerweise ein lebenszyklusorientierter Ansatz, bei dem auch der bauliche Zustand der vorhandenen Gebäudesubstanz sowie typische Lebensdauern und Austauschzyklen von Bauteilen oder Technikkomponenten berücksichtigt werden
- h) Vertretbarer Rechenaufwand bei gleichzeitig möglichst einfacher Anwendbarkeit
- i) Möglichst minimierter Einsatz von „manuell“ zu erstellenden Berechnungen und Simulationen

Stand der Wissenschaft

Im deutschsprachigen Raum finden sich bisher nur sehr wenige Ansätze zur Nutzung von multikriteriellen Optimierungsmethoden zur Analyse von Sanierungsstrategien bei Gebäuden. International ist der Einsatz von Optimierungsmethoden für die Gebäudeanalyse hingegen deutlich verbreiteter. Eine gute Übersicht verschiedener Ansätze und bisheriger Anwendungen findet sich zum Beispiel in Longo et al., 2019 und Nguyen et al., 2014. Nguyen et al., 2014 zeigt u.a., dass sich die Anzahl von Veröffentlichungen im Bereich der mathematischen Optimierung im Gebäudebereich besonders in den letzten beiden Dekaden rapide entwickelt hat.

Ein aus unserer Sicht besonders interessanter Ansatz stellt die Nutzung von Metamodellen dar. Dabei werden Metamodelle dazu verwendet, die meist für die Gebäudeanalyse herangezogenen Simulationsmodelle auf einer Zwischenebene zu abstrahieren. Die Metamodelle erlauben deutlich effizientere Auswertungen. Van Gelder et al., 2014 gibt eine Übersicht über verschiedene Metamodelle und vergleicht deren Leistungsfähigkeit für eine beispielhafte Anwendung. Die Verwendung eines

Metamodells zur vereinfachten Analyse von Energie- und Komfortparametern wird beispielhaft auch von Eisenhower et al., 2012 für ein Nichtwohngebäude vorgeschlagen und zeigt gute Ergebnisse für das gewählte Ersatzmodell. Im deutschsprachigen Raum wird durch Madersbacher, 2017 ein Optimierungsansatz auf Grundlage eines Ersatzmodells vorgeschlagen, wobei im Rahmen der Arbeit zwei Ersatzmodelle auf Grundlage neuronaler Netze und einer Support-Vector-Regression miteinander verglichen werden.

Anwendung von Optimierungsmethoden für die Analyse von Sanierungsstrategien für bestehende Gebäude finden sich beispielhaft in Stadler et al. 2014, Niemela et al. 2016, Penna et al. 2015 und Aelenei et al. (2015).

Grundsätzlich lässt sich trotz der großen Anzahl an internationalen Veröffentlichungen zur Anwendung von Optimierungsmethoden für gebäudetechnische Fragestellungen feststellen, dass wenige der vorgeschlagenen Ansätze bisher Eingang in die Planungspraxis gefunden haben. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der nachgewiesenen methodischen Leistungsfähigkeit und der generell wachsenden Bedeutung von Sanierungsstrategien für bestehende Gebäude bemerkenswert. Daher kann vermutet werden, dass durch die verstärkte praktische Anwendung dieser vielversprechenden methodischen Ansätze zukünftig eine erheblich verbesserte Allokation knapper materieller und personeller Ressourcen erreicht werden könnte.

Grundlegender Ablauf der entwickelten Methodik

Abbildung 1 zeigt den grundsätzlichen Ablauf der von uns verwendeten Optimierungsmethodik.

Zunächst wird in Schritt 1 mithilfe einer dynamischen Gebäudesimulation für das untersuchte Gebäude der zu erwartende Nutzenergiebedarf berechnet.

In Schritt 2 werden die Art und Bandbreite denkbarer Sanierungsmaßnahmen definiert und so das Untersuchungsfeld für das Gebäude abgesteckt.

Schritt 3 beinhaltet die punktuelle Simulation von möglichen Sanierungszuständen innerhalb des zuvor definierten Untersuchungsfelds. Die Anzahl der simulierenden Sanierungszustände hängt von der Anzahl der möglichen Sanierungsmaßnahmen ab.

Im Schritt 4 wird das Metamodell auf die analysierten Sanierungspunkte angepasst bzw. trainiert. Das Metamodell bildet die verschiedenen energetischen Zustände des Gebäudes vereinfacht ab und steht dann für die weitere Analyse zur Verfügung.

Schritt 5 beinhaltet die Definition bzw. Auswahl der auszuwertenden Zielfunktion und der zu beachtenden Restriktionen.

In Schritt 6 erfolgt die eigentliche Optimierung der Zielfunktion innerhalb des Untersuchungsfelds.

Schritt 7 beinhaltet die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse.

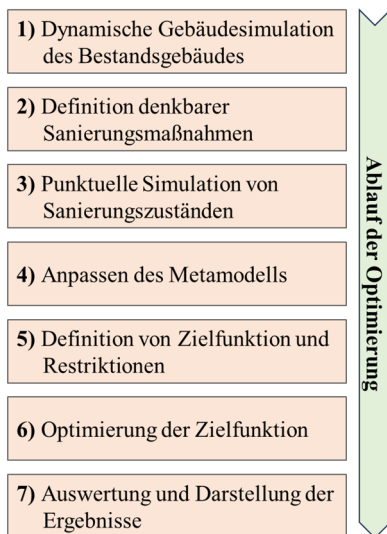


Abbildung 1: Ablaufdiagramm der entwickelten Sanierungsmethodik

Im Folgenden wird auf die einzelnen Schritte der vorgeschlagenen Methodik detaillierter anhand eines Beispiels eingegangen.

Schritt 1: Dynamische Gebäudesimulation

Die dynamischen Gebäudesimulationen für unsere Untersuchungen werden mit der Gebäudesimulationssoftware IDA-ICE 4.8 erstellt. Für diese Ausarbeitung wird ein typisches freistehendes einstockiges Einfamilienhaus untersucht (Abbildung 2). Die Simulation basiert auf einer Einzonen-Simulation des als beheizt angesetzten Erdgeschosses. Der Außenluftwechsel durch Fensterlüftung wird im sanierten und unsanierten Zustand auf einen dauerhaft wirkenden Luftwechsel von 0,25 1/h festgelegt. Es wird eine zusätzliche Infiltration von 3,0 1/h bei 50 Pa Unter- bzw. Überdruck berücksichtigt. Die Solltemperatur im Heizfall für die Zone „Wohnen“ beträgt 21°C. Eine Kühlfunktion besteht nicht. Für die außenliegende Verschattung der Fenster (sofern an den jeweiligen Fenstern vorhanden) wird eine Regelung anhand der solaren Einstrahlung angesetzt. Weiterhin werden interne Wärmegevinne durch Personenaufenthalt, Beleuchtung und elektrische Geräte berücksichtigt, die entsprechend der Wohnnutzung mit sinnvollen Größen- und Zeitanätzen gewählt werden.

Die thermische Hülle des Gebäudes wird durch die oberste Geschossdecke zum unbeheizten Dachraum, die Kellerdecke zum unbeheizten Keller, die Außenwände des Erdgeschosses und die Fenster im Erdgeschoss gebildet.

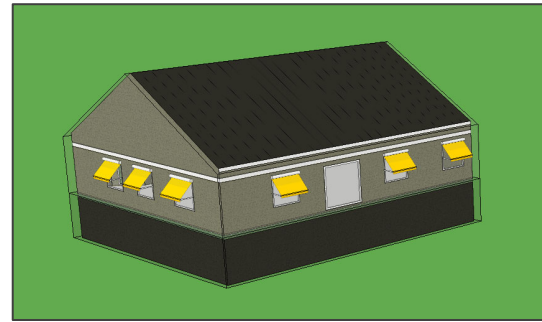


Abbildung 2: Visualisierung des Simulationsmodells für das beispielhaft untersuchte Einfamilienhaus

Für den unsanierten Zustand des Gebäudes werden die in Tabelle 1 aufgeführten Kennwerte für die Bauteile der thermischen Gebäudehülle angenommen.

Tabelle 1: Verwendete Eingangsparameter für die Bauteile der thermischen Gebäudehülle

BAUTEIL UND BESCHREIBUNG	WÄRME-DURCHGANGSKOEFFIZIENT [W/M ² *K]
AUBENWAND BEIDSEITIG VERPUTZTE MAUERWERKSWAND AUS HOCHLOCHZIEGEL	1,03
KELLERDECKE STAHLBETONDECKE MIT ESTRICH AUF DÜNNER TRITTSCHALLDÄMMUNG	1,17
OBERSTE GESCHOSS- DECKE ZUM DACHRAUM STAHLBETONDECKE MIT 2 CM DÄMMSCHICHT IM BESTAND	1,16
FENSTER KUNSTSTOFFFENSTER MIT ISOLIER- VERGLASUNG, G = 0,76	2,77
DACH ÜBER UNBEHEIZTEM DACHRAUM UNGEDÄMMTES ZIEGELDACH	4,50
KELLERAUßENWÄNDE INNENSEITIG VERPUTZTE STAHLBETONWAND	3,03

Auf Grundlage des beschriebenen Modells wird zonenweise mit Hilfe der Simulation der Nutzenergiebedarf Q_N zur Beheizung ermittelt. Für die weiteren Analysen wird der Nutzenergiebedarf dem Endenergiebedarf Q_E zunächst gleichgesetzt, d.h. alle Anlagenverluste der Heizungsanlage werden im

Rahmen der Gebäudesimulation vernachlässigt und erst später über pauschale Zuschläge berücksichtigt (vgl. die Erläuterungen zu Schritt 2).

Schritt 2: Definition der Sanierungsmaßnahmen

Entsprechend des energetischen Gebäudezustands im Bestand werden die folgenden Sanierungsmaßnahmen als grundsätzlich zielführend eingestuft und für die weitere Analyse berücksichtigt.

- Zusätzliche Außenwanddämmung mit Dicke d_{AW}
- Dämmung der Kellerdecke mit Dicke d_{KD}
- Dämmung der obersten Geschosdecke zum unbeheizten Dachraum mit Dicke d_{OG}
- Austausch der Fenster gegen dreifach wärmeschutzverglaste Fenster mit einem Fenster-Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_W = 0,81 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei einem Gesamtenergie-durchlassgrad $g=0,49$.
- Austausch der bestehenden Gasheizung gegen eine neue Gasbrennwerttherme, Fernwärme oder eine Luft- Wasser-Wärmepumpe.

Für die aufgeführten Dämmmaßnahmen werden einheitliche Dämmdicken von 4, 8, 12, 16, 20, 24 und 28 cm bei einer Wärmeleitfähigkeit von $0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ vorgesehen.

Die Umrechnung von simulierter Nutzenergie Q_N in Endenergie Q_E erfolgt für die verschiedenen Heizungsanlagen wie in Tabelle 2 dargestellt. Bei der Wärmepumpe wird dabei eine einheitliche Jahresarbeitszahl von 3,0 zu Grunde gelegt.

Tabelle 2: Umrechnung von Nutzenergie zu Heizenergie für die verschiedenen Heizungsanlagen

HEIZUNGSANLAGE	UMRECHNUNG VON NUTZENERGIE ZU ENDENERGIE
GASTHERME ALT	$Q_E = 1,1 * 1,15 * Q_N$
GASTHERME NEU	$Q_E = 0,95 * 1,15 * Q_N$
FERNWÄRME	$Q_E = 1,15 * Q_N$
WÄRMEPUMPE	$Q_E = \frac{1}{3} * 1,15 * Q_N$

Schritt 3: Punktuelle Simulation von Sanierungszuständen

Für die Anpassung des Metamodells in Schritt 4 muss eine Auswahl der dafür erforderlichen Stützstellen erfolgen. Für das spätere Metamodell und die oben aufgeführten Sanierungsmaßnahmen sind mindestens 8 Stützstellen erforderlich, die aus unabhängigen Simulationen innerhalb des Untersuchungsfeldes erzeugt werden.

Diese 8 Stützstellen werden wie in Tabelle 3 aufgeführt verteilt, um das Metamodell später analytisch und numerisch stabil bestimmen zu können. Prinzipiell können weitere Stützstellen bei der Bestimmung des Metamodells berücksichtigt werden. Damit kann das Modell tendenziell besser an die Simulationsergebnisse angepasst werden, was die Fehler verringern kann.

Tabelle 3: Simulationspunkte für die Bestimmung des Metamodells

d_{AW}	d_{KD}	d_{OG}	FENSTER NEU
28 CM	28 CM	28 CM	JA
4 CM	28 CM	28 CM	JA
0 CM	28 CM	28 CM	JA
28 CM	4 CM	28 CM	JA
28 CM	0 CM	28 CM	JA
28 CM	28 CM	4 CM	JA
28 CM	28 CM	0 CM	JA
28 CM	28 CM	28 CM	NEIN

Schritt 4: Metamodell

Die grundlegende Idee des verwendeten Metamodells für die Nutzenergie basiert auf der Tatsache, dass sich die einzelnen Maßnahmen nur sehr gering bis gar nicht gegenseitig beeinflussen. Daher kann der jährliche Nutzenergiebedarf Q_N in guter Näherung durch ein Metamodell aus mehreren Ansatzfunktionen für die jeweilige Dicken d_{OG}, d_{AW}, d_{KD} der Dämmschichten und einem Term für die Fenstererneuerung $f \in \{0,1\}$ repräsentiert werden. Der Endenergiebedarf Q_N skaliert indirekt proportional zur Dicke d der jeweiligen im Zuge der Sanierung aufgebrauchten Dämmschichten. Die Erneuerung der Fenster als singuläre Maßnahme bewirkt ebenfalls näherungsweise lediglich eine absolute Reduktion des Endenergiebedarfs. Der Austausch der Heizungsanlage hat hingegen keinen direkten Einfluss auf die Nutzenergie und wird daher nicht im Metamodell sondern erst bei der Definition der Zielfunktion berücksichtigt.

Mit den oben getroffenen Annahmen kann der energetische Zustand des Gebäudes allein durch den jährlichen Nutzenergiebedarf Q_N repräsentiert werden. Alle möglichen Zustände von Q_N innerhalb des Untersuchungsfeldes können dann mit ausreichender Genauigkeit durch das Metamodell

$$Q_N(d_{OG}, d_{AW}, d_{KD}, f) = C + C_F f + \frac{C_{OG}}{d_{OG} + D_{OG}} + \frac{C_{AW}}{d_{AW} + D_{AW}} + \frac{C_{KD}}{d_{OG} + D_{KD}} \quad (1)$$

dargestellt werden.

Diese Funktion hat für das untersuchte Beispiel mit 3 Dämmmaßnahmen und der Möglichkeit zum Fensteraustausch die 8 unbekanntten Modellparameter C (Konstante), C_F (Reduktion durch neue Fenster), C_{OG}, C_{AW}, C_{KD} (Koeffizienten), D_{OG}, D_{AW}, D_{KD}

(äquivalente Dämmwirkung der bestehenden Wände). Die Bestimmung dieser Modellparameter erfolgt aus den in Schritt 3 simulierten Stützstellen. Die Anpassung der Ansatzfunktionen auf gegebene Stützstellen wird – je nach Fachdisziplin – u.a. als Regressionsproblem, Curve-Fitting, Parameteridentifikation oder Kleinste-Quadrate-Problem genannt. Zu beachten ist hier jedoch, dass die Parameter D_{OG} , D_{AW} , D_{KD} nichtlinear in das Modell eingehen, sodass zur Berechnung der Parameter meist numerische Methoden verwendet werden (z.B. das Levenberg-Marquardt-Verfahren für nichtlineare Regressionsprobleme). Bei geschickter Verteilung der 8 Datenpunkte, die in Schritt 3 durch 8 unabhängige Simulationen der Sanierungspunkte bestimmt wurden, ist das Regressionsproblem analytisch lösbar und liefert ein Ersatzmodell, welches dann für die weitere Optimierung genutzt werden kann.

Das Metamodell (1) wird anhand der Simulationsergebnisse für das gewählte Beispiel-EFH validiert. Die Datensätze zur Validierung bestehen aus allen Kombinationen der diskreten Werte für die Eingabegrößen Dämmdicken und Fenstererneuerung, in diesem Fall aus 1024 Simulationsdatenpunkten. Das Metamodell wird dabei nur anhand der 8 dargestellten Trainingspunkte erstellt und anschließend ausschließlich zur Validierung mit den zur Verfügung stehenden Ergebnisdaten aller 1024 Simulationen verglichen (siehe Abbildung 3). Dabei ergibt sich eine durchschnittliche relative Abweichung zwischen Simulation und Ersatzmodell von 0.2%. Die größeren Abweichungen treten dabei für Punkte mit vergleichsweise geringen Sanierungsmaßnahmen auf. Die maximale relative Abweichung liegt hier bei 4.1%. Für die Optimierung ist jedoch in der Regel der Bereich mit moderaten bis stärker dimensionierten Sanierungsmaßnahmen interessant, sodass die geringere Genauigkeit des Metamodells bei schwach dimensionierten Sanierungsmaßnahmen akzeptabel ist.

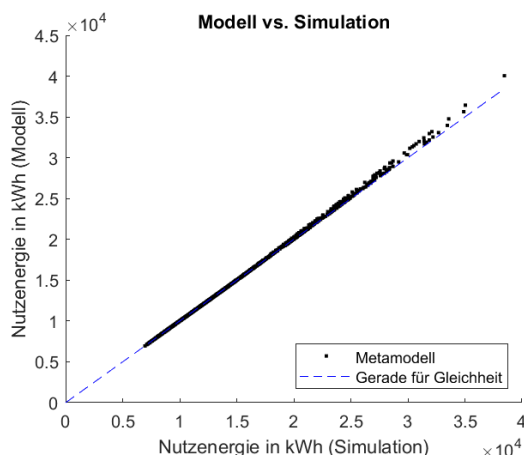


Abbildung 3: Vergleich der simulierten Nutzenergiebedarfe mit den Ergebnissen des Metamodells

Schritt 5: Zielfunktion und Restriktionen

Mit Hilfe des Metamodells können sehr schnell verschiedene Zielfunktionen ausgewertet und optimiert werden. Durch die Wahl der Zielfunktion können verschiedene Perspektiven definiert werden, unter denen die Sanierung des betrachteten Gebäudes bewertet werden soll. Beispielsweise ist es aus der Sicht eines Immobilienbesitzers interessant, den Sanierungsumfang seines Objekts hinsichtlich der Gesamtkosten aus den erforderlichen Investitionen und den anschließenden Betriebskosten zu optimieren. Aus übergeordneter Perspektive könnte es hingegen von Interesse sein, zu evaluieren, mit welchen Maßnahmen sich die CO₂-Emissionen bei der Sanierung von Gebäuden minimieren lassen. Bei allen Zielfunktionen können außerdem unterschiedliche Restriktionen, wie zum Beispiel hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets zum Tragen kommen. Weitere Zielfunktionen, die z.B. auch graue CO₂-Emissionen aus den Sanierungsmaßnahmen selbst berücksichtigen, sind denkbar und wurden von uns bereits im Rahmen weiterführender Untersuchungen ausgewertet.

Im Rahmen dieses Beitrags werden exemplarisch die drei folgenden Zielfunktionen betrachtet:

Minimierung der durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten KF aus Investition und Betrieb

$$\min KF [\text{€}] = a * K_I / t_b + b * K_B \quad (2)$$

Minimierung der jährlichen Betriebskosten unter einem gegebenen Investitionsbudget

$$\begin{aligned} \min KF [\text{€}] &= K_B \\ \text{unter } K_I &\leq I_{max} \end{aligned} \quad (3)$$

Minimierung der jährlichen CO₂-Emissionen aus dem Betrieb unter einem gegebenen Investitionsbudget

$$\begin{aligned} \min M [t\text{o}/a] &= M_{B,CO_2} \\ \text{unter } K_I &\leq I_{max} \end{aligned} \quad (4)$$

Dabei werden folgende Parameter definiert:

$K_I = K_{I,AW} + K_{I,OG} + K_{I,KD} + K_{I,F} + K_{I,HZG}$: Gesamtinvestitionskosten für die Sanierung der Außenwände, der obersten Geschossdecke, der Kellerdecke, der Fenster und der Heizungsanlage

K_B : jährliche Betriebskosten durch Energie

t_b : Betrachtungszeitraum in Jahren

I_{max} : obere Schranke des Investitionsbudgets

M_{B,CO_2} : betriebsbedingte CO₂-Emissionen

$a, b > 0$: Wichtungssparameter mit denen der Einfluss der Investitions- oder Betriebskosten auf die Gesamtkosten variiert werden kann.

Die Berechnung der Investitionskosten erfolgt mit den in Tabelle 4 aufgeführten Ansätzen.

Tabelle 4: Kostenansätze für die Sanierungsinvestitionen

BAUTEIL	KOSTENANSATZ [€]
AUßENWÄNDE $K_{I,AW}$	$3000 + a_W$ $* (120 + d_{AW} * 2)$
KELLERDECKE $K_{I,KD}$	$2000 + a_{KD}$ $* (60 + d_{KD} * 2)$
OBERSTE GESCHOSSDECKE $K_{I,OG}$	$2000 + a_{OG}$ $* (40 + d_{OG} * 2)$
FENSTER $K_{I,F}$	$3000 + a_F * 500$
GASTHERME NEU $K_{I,HZG}$	10000
FERNWÄRME $K_{I,HZG}$	15000
WÄRMEPUMPE $K_{I,HZG}$	30000

Dabei sind die Dicken der jeweils aufgetragenen Dämmstoffe in cm und die Flächen der jeweils betrachteten Bauteile in m² definiert.

Für die Betriebskosten werden die in Tabelle 5 angegebenen Preise der Energieträger zugrunde gelegt. Dabei ist Q_{max} der maximale unterjährige Heizleistungsbedarf. Dieser wird ähnlich wie Q_N über ein Metamodell mit gleicher Struktur bestimmt. Dazu werden die gleichen Simulationen verwendet, sodass kein zusätzlicher Rechenaufwand entsteht.

Tabelle 5: Kostenansätze für die Betriebskosten r

ENERGIETRÄGER	KOSTENANSATZ [€]
GASTHERME ALT/NEU	$K_B = 0,12 * Q_E$
GASTHERME NEU	$K_B = 0,12 * Q_E$
FERNWÄRME	$K_B = 0,08 * Q_E +$ $60 * 1,15 * Q_{max}$
WÄRMEPUMPE	$K_B = 0,30 * Q_E$

Schritt 6: Optimierung der Zielfunktion

Die zum Einsatz kommenden Optimierungsmethoden hängen davon ab, ob die Optimierungsvariablen d_{OG} , d_{AW} , d_{KD} , f als diskret oder kontinuierlich angesehen werden. Da in der Praxis handelsübliche Dämmdicken d_{OG} , d_{AW} , d_{KD} üblicherweise diskret vorliegen, übernehmen wir eine marktgängige Abstufung von 2 cm auch für die Optimierung. Damit sind alle vier Optimierungsvariablen diskret und es ergibt sich ein diskretes Optimierungsproblem, welches sich auf verschiedene Arten lösen lässt. Die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten der Optimierungsvariablen erlaubt zwar keine effiziente

Simulation aller dieser Punkte, jedoch ist die Auswertung des Ersatzmodells hinsichtlich des benötigten Rechenaufwands rechentechnisch sehr günstig, sodass die Zielfunktion für das Ersatzmodell und alle denkbaren Kombinationsmöglichkeiten sehr schnell ausgewertet werden kann. Diese *Brute-Force*-Methode löst das zugrundeliegende diskrete Optimierungsproblem exakt (und nicht nur näherungsweise wie z.B. genetische Algorithmen). Außerdem lassen sich Nebenbedingungen, wie z.B. ein begrenztes Investitionsbudget, sehr einfach berücksichtigen. Dazu werden unter allen möglichen Kombinationen für die Minimierung nur diejenigen berücksichtigt, die ein gegebenes Investitionsbudget nicht überschreiten. Führt man dies für eine Spanne von Investitionsbudgets durch, so erhält man auch die Pareto-Front.

Schritt 7: Auswertung der Ergebnisse

Die folgende Abbildung 4 zeigt die Auswertung der Optimierung von Zielfunktion (2), d.h. die Minimierung der durchschnittlichen jährlich Gesamtkosten aus umgelegten Investitions- und Betriebskosten bei Zugrundelegung unterschiedlich langer Betrachtungszeiträume. Die Höhe der Investitionen werden für diese Berechnungen nicht limitiert.

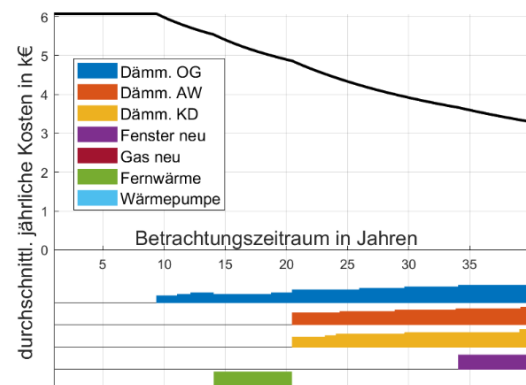


Abbildung 4: Optimierte Gesamtkosten aus Betrieb und Investitionen (als jährlicher Anteil) bei verschiedenen Betrachtungszeiträumen ohne Restriktion der Investitionen

Die Ergebnisdarstellung zeigt unterhalb der x-Achse die erforderlichen Sanierungsmaßnahmen für die jeweils die kostenoptimalen Lösungen. Dabei skalieren die Balken mit der jeweiligen Dämmdicke.

Bemerkenswert ist, dass bei längeren Betrachtungszeiträumen der Energieträgerwechsel nicht mehr relevant ist und die passiven Maßnahmen effizienter sind. Dies resultiert aus dem Fakt, dass die passiven Maßnahmen die Nutzenergie und damit die Energiekosten absolut reduzieren, während der Energieträgerwechsel als Faktor zwischen Nutz- und Endenergie die resultierenden Energiekosten nur relativ reduziert. Ist die Nutzenergie durch passive

Maßnahmen bereits stark reduziert, so sind auch die Einsparnisse durch den Energieträgerwechsel kleiner, was letzteres für die Bewertung weniger attraktiv macht.

Abbildung 5 zeigt die optimalen Ergebnisse für die Zielfunktion (3), für die die jährlichen Betriebskosten minimiert werden und das Investitionsbudget auf verschiedene Werte beschränkt wird. Die damit dargestellte Pareto-Front erlaubt eine Einschätzung darüber, wie weit und mit welchen Maßnahmen sich bei beschränkten Investitionsbudgets die Heizkosten durch eine energetische Sanierung reduzieren lassen.

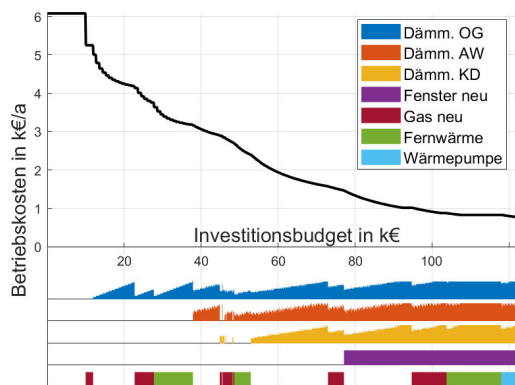


Abbildung 5: Optimierte Betriebskosten in Abhängigkeit von der Höhe des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets

Ähnlich wie zuvor, spielen die passiven Maßnahmen eine große Rolle bei der Reduktion der Betriebskosten. So ist die Ersparnis durch den Energieträgerwechsel gegenüber den passiven Maßnahmen vergleichsweise gering und die Amortisation wäre entsprechend lang. Die Reihenfolge der passiven Maßnahmen folgt wie auch in der Auswertung zuvor in der Reihenfolge *Oberste Geschossdecke, Außenwände, Kellerdecke*. Dabei ist die Dämmung der Kellerdecke gegenüber den Außenwänden mit den Kostenfunktionen in Tabelle 4 zwar erheblich günstiger, allerdings ist deren energetische Wirkung gegenüber dem unbeheizten Kellergeschoss auch deutlich geringer als die Dämmung der Außenwände gegen Außenluft. Die Sanierung der Fenster trägt erst bei hohen möglichen Investitionsbudgets (ab etwa 80 T€) zur Reduktion der Betriebskosten bei, wenn auch nur noch in vergleichsweise geringerem Umfang. Je nach gegebenem Investitionsbudget sind verschiedene Kombinationen aus Maßnahmen möglich. Erhöht man das Budget, so können z.B. plötzlich neue Kombinationen möglich sein und die optimale Maßnahmenauswahl kann sich daher sprunghaft ändern (vgl. z.B. die sprunghafte Änderung der favorisierten Maßnahmenkombination bei ca. 50 T€ Investitionsbudget).

In Abbildung 6 wird die Auswertung der Optimierung von Zielfunktion (4) dargestellt, d.h. die Minimierung

der jährlichen betriebsbedingten CO₂-Emissionen bei Restriktion des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets.

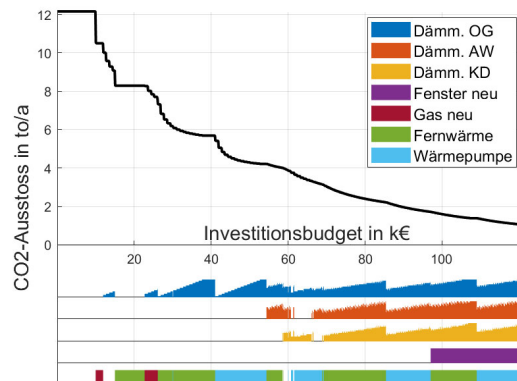


Abbildung 6: Minimierter betriebsbedingter CO₂-Ausstoß in Abhängigkeit von der Höhe des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets

Im Vergleich zu den vorangegangenen Zielfunktionen hat hier nun der Energieträgerwechsel einen deutlich größeren Einfluss auf die Zielfunktion. Die passiven Maßnahmen liefern im Vergleich zu den Optimierungen der Betriebskosten tendenziell erst etwas später einen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen, d.h. der Wechsel des Energieträgers wird für die Zielerreichung präferiert eingesetzt. Der mehrmalige Wechsel zwischen Fernwärme und Wärmepumpe liegt an der sehr ähnlichen Effizienz bzgl. des CO₂-Reduktionspotentials bei den getroffenen Annahmen für diese Energieträger. Daher liefern beide Energieträger ähnliche Beiträge bei der Reduktion der CO₂-Emissionen und die optimale Wahl kann variieren.

Zusammenfassung, Fazit, Ausblick

Bisher werden vor allem im deutschsprachigen Raum mathematische Optimierungsmethoden zur Unterstützung von Sanierungsentscheidungen kaum eingesetzt. International sind zahlreiche Anwendungen publiziert worden, die in der Praxis aber bisher kaum Anwendung finden. Im vorliegenden Beitrag haben wir ausgehend von dem Postulat einer möglichst einfachen und schnellen Anwendbarkeit eine Methode entwickelt, bei der die Optimierung von Sanierungsmaßnahmen anhand eines Metamodells erfolgt. Das Metamodell erlaubt es, mit sehr geringem Aufwand (unter einer Sekunde) unterschiedliche Zielfunktionen auszuwerten und dabei verschiedene Restriktionen zu berücksichtigen. Beispielhaft wurde im Rahmen dieses Beitrags eine Minimierung der Gesamtkosten aus Investitions- und Betriebskosten über einen Betrachtungszeitraum sowie eine Minimierung betriebsbedingter CO₂-Emissionen jeweils unter unterschiedlichen Restriktionen betrachtet. Als Testbeispiel wurde ein Einfamilienhaus gewählt. Die Methode lässt sich

problemlos direkt auch auf andere Wohngebäude übertragen. Durch die Wahl der Zielfunktion und Restriktionen können unterschiedliche Perspektiven und Präferenzen von Entscheidern bei Sanierungsprojekten simuliert werden. Anhand der Ergebnisse lassen sich dann jeweils hinsichtlich der Zielfunktion optimierte Sanierungsstrategien ableiten, wobei passive und aktive energetische Verbesserungen berücksichtigt werden können. Der methodische Ansatz erscheint in Hinblick auf die Entscheidungsunterstützung praxisnaher Sanierungsfragestellungen sehr vielversprechend. Perspektivisch soll die Methodik um zusätzliche Verbesserungsmaßnahmen wie Fotovoltaik und Warmwassererzeugung ergänzt werden. Eine Übertragung auf Nichtwohngebäude sowie die Berücksichtigung von (Rest-)Lebensdauern der verwendeten Bauteile sind ebenfalls angedacht.

Literatur

- Bundesklimaschutzgesetz (KSG), Ausfertigungsdatum 12. Dezember 2019, zuletzt geändert am 18. August 2021.
- Longo, S.; Montana, F.; Sanseverino, E.R. 2019. A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations. *Sustainable Cities and Society* 45 (2019) 87–104, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.027>
- Nguyen, A.-T.; Reiter, S; Rigo, P. 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113, 1043–1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>
- Van Gelder, L.; Das, P.; Janssen, H.; Roels S. 2014. Comparative study of metamodelling techniques in building energy simulation: Guidelines for practitioners. *Simulation Modelling Practice and Theory* 49 (2014), S. 245-257. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.10.004>
- Eisenhower, B., O'Neill, Z., Narayanan, S., Fonoberov, V. A., & Mezić, I. 2012. A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy and Buildings*, 47, 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.001>
- Madersbacher, J. 2017. Robuste Optimierung in der Gebäudesimulation - Entwicklung einer Methode zur robusten Optimierung für die energetische Sanierung von Gebäuden unter unsicheren Randbedingungen, Dissertation an der Technischen Universität München.
- Stadler, M., Groissböck, M. Cardosos, G. Marnay, C. 2014. Optimizing Distributed Energy Resources and building retrofits with the strategic DER-CAModel. *Applied Energy* Volume 132, 1 November 2014, Pages 557-567. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.041>
- Niemela, T., Kosonen, R., Jokisalo, J. 2016. Cost-optimal energy performance renovation measures of educational buildings in cold climate. *Applied Energy* Volume 183, 1 December 2016, Pages 1005-1020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.044>
- Penna, A., Prada, A., Cappelletti, F., Gasparella, A. 2015. Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings, *Energy and Buildings*, Volume 95, Pages 57-69, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.003>.
- Aelenei, L., Paduos, S., Petran, H., Tarrés, J., Ferreira, A., Corrado, V., Camelo, S., Polychroni, E., Sfakianaki, K., Gonçalves, H., Salom, J., Riva, G., Murano, G., 2015. Implementing Cost-optimal Methodology in Existing Public Buildings, *Energy Procedia*, Volume 78, Pages 2022-2027, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.197>.