



56

Johannes Koert

**Bewertung von Unsicherheiten beim
Variantenvergleich energetischer
Quartierssanierungen**

Entwicklung eines Simulationsmodells zur
Berücksichtigung streuender Einflussgrößen über
den Lebenszyklus bei der ökonomischen und
ökologischen Bewertung von Wohnquartieren

DISSERTATION

Bewertung von Unsicherheiten beim Variantenvergleich energetischer Quartierssanierungen

Entwicklung eines Simulationsmodells zur Berücksichtigung
streuender Einflussgrößen über den Lebenszyklus bei der
ökonomischen und ökologischen Bewertung von Wohnquartieren

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von

Johannes Koert M. Sc.

aus
Hanau

D 17

Darmstadt 2023

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider
Tag der Einreichung:	24. Mai 2023
Tag der mündlichen Prüfung:	18. Juli 2023

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau
Franziska-Braun-Straße 3
64287 Darmstadt

Koert, Johannes:

Bewertung von Unsicherheiten beim Variantenvergleich energetischer Quartiersanierungen – Entwicklung eines Simulationsmodells zur Berücksichtigung streuender Einflussgrößen über den Lebenszyklus bei der ökonomischen und ökologischen Bewertung von Wohnquartieren

Dissertationsreihe des Instituts für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 56

Online veröffentlicht bei TUpriints

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2024

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juli 2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-243611

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/24361>

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International - Creative Commons,

Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen

(<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

Johannes Koert

Geboren 1993 in Hanau. Von 2013 bis 2019 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit Fachrichtung Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Darmstadt. Von Januar 2018 bis Juli 2018 Auslandsaufenthalt an der Eindhoven University of Technology in Eindhoven, Niederlande. Von 2019 bis 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

VORWORT

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Die Förderung des Forschungsprojektes „Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgung vernetzter Quartiere (E4Q)“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz hat den Grundstein für diese Arbeit gelegt.

Ganz herzlich danke ich meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner für die Betreuung meiner Arbeit, die wertvollen Impulse, kritischen Anmerkungen und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Gerade seine Begeisterung für interdisziplinäre Forschungsthemen eröffnete mir erst die Möglichkeit zur Promotion. Seine Weitsicht hinsichtlich der Relevanz des nachhaltigen und energieeffizienten Bauens und Betriebens von Gebäuden hat mich sehr inspiriert.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider möchte ich herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Ein weiteres Dankeschön für die Durchsicht der Entwurfsfassung dieser Arbeit gilt André Müller und Felix Schemmer. Zudem danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Massivbau für die inspirierende Zeit und den intensiven Austausch auch über fachliche Grenzen hinaus sowie Jonas Klein für die gegenseitige Motivation in den letzten Schritten unserer Promotionen. Auch den Studierenden, die als Studentische Hilfskräfte oder im Rahmen von Abschlussarbeiten am Forschungsprojekt sowie den Forschungsthemen dieser Arbeit mitgewirkt haben, möchte ich danken.

Des Weiteren möchte ich Thomas Heß meinen Dank aussprechen, den ich im Rahmen meiner Tätigkeit dabei unterstützen konnte, den Studierenden die Technische Gebäudeausrüstung näherzubringen. Hierdurch konnte ich erfahren, welche Begeisterung und Motivation durch persönliches Engagement und ein wertschätzendes Miteinander hervorgerufen werden können.

Zu guter Letzt danke ich meiner Familie und Mathilde für den Rückhalt und die vielfältige Unterstützung, die mir den Weg zum erfolgreichen Abschluss meiner Promotion gebnet haben.

Darmstadt, im Juli 2023

Johannes Koert

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Bewältigung der Klimakrise, einer der größten globalen Aufgaben des 21. Jahrhunderts, hat sich Deutschland zur Erreichung der Treibhausgasneutralität bis 2045 verpflichtet. Die notwendigen Ziele zur Senkung der Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors durch energetische Sanierung und eine Dekarbonisierung der Wärmeversorgung werden jedoch seit Jahren verfehlt. Als Hindernis wird neben mangelnden ökonomischen Anreizen die fehlende Transparenz bezüglich der Auswirkungen verschiedener Sanierungskonzepte vermutet. Insbesondere für die Handlungsebene des Quartiers fehlt es an robusten Bewertungsmethoden zur Unterstützung der relevanten Akteure bei der Entscheidungsfindung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher eine Methodik entwickelt, welche eine Bewertung energetischer Quartierssanierungskonzepte unter Berücksichtigung von Unsicherheiten ermöglicht. Basis der Methodik sind Monte-Carlo Simulationen dynamischer Gebäude- und Quartiersmodelle zur Ermittlung der Quartiersenergiebedarfe. Anschließend folgen eine Ökobilanzierung und eine Lebenszykluskostenrechnung unter Verwendung von Szenarien zur Abbildung zukünftiger Entwicklungen unsicherer Eingangsparameter. Ergebnis der Methodik sind ökonomische, ökologische und energetische Indikatoren, die eine Vielzahl von Akteuren der energetischen Quartiersplanung bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich einer Variantenauswahl unterstützen können. Die beispielhafte Anwendung der Methodik zeigt deren Robustheit und den Mehrwert im Vergleich zu einer deterministischen Berechnung.

ABSTRACT

In order to tackle the climate crisis as one of the greatest global challenges of the 21st century, Germany has committed itself to achieving greenhouse gas neutrality by 2045. However, the necessary targets for reducing greenhouse gas emissions from the building sector through energy refurbishments and the decarbonisation of the heat supply have been missed for years. The lack of transparency regarding the effects of different renovation concepts is assumed to be one of the obstacles. Especially at the district level, there is a lack of robust evaluation methods to support the relevant actors in decision-making.

Within the framework of this study, a methodology was developed that enables the evaluation of energy-related district refurbishment concepts while taking uncertainties into account. The basis of the methodology are Monte Carlo simulations of dynamic building and district models to determine the district energy demands. This is followed by a life cycle assessment and life cycle costing using scenarios to map future developments of the uncertain input parameters. The results of the methodology are economic, ecological and energetic indicators that can support a large number of actors in energy-related district planning in their decision-making regarding a choice of variants. The exemplary application of the methodology shows its robustness and the added value compared to a deterministic calculation.

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis	IV
Parameter- und Variablenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Vorgehensweise	4
2 Grundlagen der Energieversorgung von Quartieren im Kontext der Energiewende.....	7
2.1 Politische Rahmenbedingungen der Energiewende im Gebäudesektor	7
2.1.1 Zielvorgaben für die Transformationspfade zur Klimaneutralität	7
2.1.2 Energetische Anforderungen an Gebäude.....	10
2.1.3 Förderinstrumente zur Unterstützung der klimaneutralen Transformation des Gebäudebestands.....	12
2.2 Quartiersdefinition.....	14
2.3 Energiebedarfe in Quartieren.....	16
2.4 Energieversorgungskonzepte von Quartieren.....	19
2.5 Modellierung des Energiebedarfs und der Energieversorgung von Quartieren ...	21
2.5.1 Klassifizierung von Energiebedarfsmodellen	21
2.5.2 Grundlagen der dynamischen Gebäudesimulation.....	23
2.5.3 Dynamische Quartiersbedarfsmodelle	24
3 Analyse von Unsicherheiten auf den Energiebedarf von Quartieren.....	25
3.1 Einführung in mathematische Grundlagen der Stochastik	25
3.1.1 Unsicherheitsbegriff	25
3.1.2 Abbildung stochastischer Prozesse mit Zufallsvariablen.....	26
3.1.3 Funktionen ausgewählter stetiger Zufallsvariablen.....	28
3.2 Methoden zur Charakterisierung und Quantifizierung von Unsicherheiten.....	31
3.2.1 Überblick über verschiedene Methoden.....	31
3.2.2 Monte-Carlo Analysen	32
3.3 Arten von Unsicherheiten in Energiebedarfsmodellen.....	34

3.4	Streuungen der Eingangsparameter	35
3.4.1	Geometrieparameter	35
3.4.2	Parameter der Gebäudehülle	36
3.4.3	Nutzerverhalten	38
3.4.4	Anlagentechnik.....	42
3.4.5	Standort	43
3.5	Modellunsicherheiten.....	44
3.6	Szenariougewissheiten.....	45
3.7	Modellierungsansätze für Energiebedarfsmodelle von Quartieren unter Berücksichtigung der Unsicherheiten	46
4	Bestehende Bewertungsmodelle von Energieversorgungs- und Sanierungskonzepten	47
4.1	Bewertung von energetischen Quartierssanierungskonzepten als Entscheidungsproblem.....	47
4.1.1	Hinführende Erläuterungen	47
4.1.2	Klassifizierung von Entscheidungsproblemen	47
4.1.3	Einordnung im Kontext der vorliegenden Fragestellung	49
4.2	Abbildung der ökonomischen und ökologischen Bewertungsdimensionen	50
4.2.1	Lebenszyklusbetrachtung	50
4.2.2	Ökologische Bewertung	51
4.2.3	Ökonomische Bewertung	53
4.3	Überblick über bestehende Modellansätze energetischer Quartierskonzepte.....	56
4.4	Zusammenfassung und Implikationen für die Entwicklung eines stochastischen Bewertungsmodells.....	58
5	Bewertung von Sanierungskonzepten von Wohnquartieren unter Unsicherheit	59
5.1	Ablauf der Methodenentwicklung	59
5.2	Festlegung des Bewertungsanlasses, Bewertungsziels und der Systemgrenzen ..	60
5.3	Definition der Methode zur Berücksichtigung der Unsicherheiten	64
5.4	Auswahl der Bewertungsindikatoren und ihrer Berechnungsmethoden.....	66
5.4.1	Erläuterungen zum Indikatorensatz.....	66
5.4.2	Auswahl der energetischen Bewertungsindikatoren	67
5.4.3	Auswahl der ökologischen Bewertungsindikatoren	68

5.4.4	Auswahl der ökonomischen Bewertungsindikatoren	70
5.4.5	Zusammenfassung der gewählten Bewertungsindikatoren und Berechnungsgrundlagen	71
5.5	Entwicklung des stochastischen Quartiersenergiebedarfsmodells	73
5.5.1	Auswahl der grundlegenden Modellierung	73
5.5.2	Einführung von Informationsniveaus	75
5.5.3	Festlegung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen für mögliche Parameter ..	77
5.5.4	Berücksichtigung der Korrelation der Zufallsvariablen	88
5.5.5	Festlegung der Stichprobenanzahl und Zufallszahlgenerierung	89
5.5.6	Zusammenfassung des stochastischen Quartiersenergiebedarfsmodells ...	95
5.6	Festlegungen für die ökonomische und ökologische Bewertung	98
5.6.1	Anknüpfung an die Energiebedarfsmodellierung	98
5.6.2	Festlegung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen für Parameter der ökologischen und ökonomischen Bewertung	100
5.6.3	Beschreibung von Parametern über Szenarien	103
5.7	Softwareseitige Umsetzung der Bewertungsmethodik	104
6	Beispielhafte Anwendung der entwickelten Methodik	107
6.1	Auswahl des Untersuchungsgegenstands	107
6.2	Definition der betrachteten Szenarien	111
6.3	Festlegung der ökologischen und ökonomischen Datenbasis	114
6.4	Anwendungsfall Einfamilienhäuser	115
6.4.1	Sensitivitätsanalyse der Energiebedarfsmodellierung eines Einzelgebäudes	115
6.4.2	Stochastische Energiebedarfsmodellierung eines Einzelgebäude	122
6.4.3	Stochastische Energiebedarfsmodellierung des Quartiers	125
6.4.4	Stochastische Bewertung der Sanierungsvarianten für das Quartier	128
7	Ableitung von Handlungsempfehlungen	137
8	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	146
	Anhang	166

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.	DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
Äq.	Äquivalent	DIN	Deutsches Institut für Normung
AT	Amtlicher Teil	DOI	Digital Object Identifier
AtG	Atomgesetz	DWD	Deutscher Wetterdienst
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle	EEG	Erneuerbare-Energien- Gesetz
BAnz	Bundesanzeiger	EFH	Einfamilienhaus
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasser- wirtschaft e. V. ; ehemals VDEW	EN	Europäische Norm
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude	EPBD	EU-Gebäuderichtlinie (engl. Energy performance of buildings directive)
BEHG	Brennstoff- emissionshandelsgesetz	EPS	Expandiertes Polystyrol
BEW	Bundesförderung für effiziente Wärmenetze	ERK	Expertenrat für Klimafragen
BGBI.	Bundesgesetzblatt	EU	Europäische Union
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit	GEG	Gebäudeenergiegesetz
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwick- lung und Bauwesen	Gt	Gigatonnen
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	GW	Gigawatt
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (ab 2021 BMWK)	GWP	Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potential)
BVerfG	Bundesverfassungsgericht	Hrsg.	Herausgeber
CO _{2,äq}	Kohlenstoffdioxid- Äquivalent	IPCC	Weltklimarat (engl. Inter- governmental Panel on Climate Change)
CO ₂ KostAufG	Kohlendioxidkosten- aufteilungsgesetz	ISO	International Organization for Standardization
COP	Coefficient of Performance einer Wärmepumpe	JAZ	Jahresarbeitszahl
dena	Deutsche Energie- Agentur	k. A.	keine Angabe(n)
		KFN	Klimafreundlicher Neubau
		KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
		konst	konstant
		KSG	Bundes-Klimaschutz- gesetz
		KVBG	Kohleverstromungs- beendigungsgesetz
		kW	Kilowatt

kWh	Kilowattstunde	SLP H0	Standardlastprofil des VDEW (heute BDEW) für private Haushalte
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung		
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz	TEHG	Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz
LCA	Ökobilanzierung	THG	Treibhausgas
LCC	Lebenszykluskostenrechnung	TRJ	Testreferenzjahr
LNG	verflüssigtes Erdgas (engl. Liquefied Natural Gas)	TWh	Terrawattstunde
MCA	Monte-Carlo Analyse	TWW	Trinkwarmwasser
MCS	Monte-Carlo Simulation	UBA	Umweltbundesamt
MFH	Mehrfamilienhaus	U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
MGB	mittlerer Gebäudebestand	VBA	Visual Basic for Applications
Mt	Megatonne	VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V.
p. a.	pro Jahr	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
PHI	Passivhaus Institut		
PV	Photovoltaik	W	Watt

PARAMETER- UND VARIABLENVERZEICHNIS

Griechisches Alphabet

α_k	approximierter Sensitivitätskoeffizient des Parameters k	$\vartheta_{i,g,v,n}$	Netztemperatur an Übergabestation
Δ	Abweichung, Differenz bzw. Änderung	λ	Wärmeleitfähigkeit
η	Nutzungsgrad allgemein	μ	Mittelwert
η_{cover}	erneuerbarer Deckungsgrad	ρ_{XY}	Korrelationskoeffizient der Zufallsvariablen X und Y
η_{el}	elektrischer Nutzungsgrad	σ	Standardabweichung
η_{self}	Eigennutzungsgrad	τ	Integrationsvariable
η_{th}	thermischer Nutzungsgrad	v	Variationskoeffizient
θ	Modellunsicherheit		

Lateinisches Alphabet

a, b, c, d, h	Parameter der Verteilungsfunktionen (Trapez-, Begrenzte Normal- und Gleichverteilung)	$f(x)$	Dichtefunktion der Zufallsvariable X
		$F(x)$	kumulierte Verteilungsfunktion der Zufallsvariable X
A_{Beh}	beheizte Fläche	$F^{-1}(y)$	inverse kumulierte Verteilungsfunktion
an	Annuität einer Investition		
an_C	Annuität der Lebenszykluskosten	g	Zählvariable Gebäude
an_w	Zählvariable Anwendungsgruppen	G	Anzahl Gebäude im Quartier
An_w	Anzahl Anwendungsgruppen im Gebäude	GWP	Treibhauspotenzial
$anz_{LCA,j}$	Häufigkeit des Prozesses j im Betrachtungszeitraum T	gwp_j	Treibhauspotenzial des Prozesses j pro Mengeneinheit
$anz_{LCC,w}$	Anzahl der Komponente w im Quartier	H'_T	Transmissionswärmeverlust
C_0	Kapitalwert	i	Zählvariable für 15-Minuten Zeitschritt des Jahres
$C_{\text{BW},v,z,n}$	Barwert der Lebenszykluskosten	in_k	Informationsniveau eines Parameters k
$C_{\text{Betrieb},t}$	Betriebskosten in der Periode t	j	Zählvariable für Prozesse in der LCA
$C_{\text{Erlös},t}$	Erlöse in der Periode t	J	Anzahl Prozesse in der LCA
$C_{\text{Ersatz},t}$	Ersatzkosten in der Periode t	k	Zählvariable Parameter allgemein
$C_{\text{Invest},v,w,n}$	Investitionskosten	ka	Parameter des Ausgangszustands, siehe Auflistung Seite IX
$C_{\text{min},n}$	Binärvariable für den Kostenvergleich in einer Stichprobe	kq	Parameter eines Quartiersnetz, siehe Auflistung Seite IX
c_v	empirischer Variationskoeffizient	kv	Parameter einer Sanierungsvariante, siehe Auflistung Seite IX
$C_{\text{Versorg},t}$	Versorgungskosten in der Periode t		
cop_{WP}	COP einer Wärmepumpe	K_A	Anzahl Parameter des Ausgangszustands
$\text{Cov}(X, Y)$	Kovarianz der Zufallsvariablen X und Y	K_Q	Anzahl Parameter des Quartiersnetz
$E(X)$	Erwartungswert der Zufallsvariable X		

K_{Vv}	Anzahl Parameter einer Sanierungsvariante v	$Q_{PV,feed}$	ins Netz eingespeiste (Jahres-)Energie­menge aus Photovoltaik
m	Energieträger	$Q_{PV,prod}$	erzeugte elektrische (Jahres-)Energie­menge aus Photovoltaik
M	Anzahl Energieträger	$Q_{f,Quartier}$	Endenergiebedarf des Quartiers
$\dot{m}_{i,g,v,n}$	Massestrom in Wärme­übergabestation	$Q_{Strom,f}$	(Jahres-)Endenergiebedarf Strom
$m_{LCA,j}$	Input-/Outputmenge des Prozesses j im Betrachtungszeitraum T	$\dot{Q}_{f,i}$	thermische Leistung eines Wärmeerzeugers zum Zeitpunkt i
n	Stichprobe	Q_p	nicht-erneuerbarer Anteil des (Jahres-)Primär­energiebedarf, Alternativ: PE_{ne}
N	Stichprobenanzahl	r_z	Kalkulationszins im Szenario z
PE_e	erneuerbarer Anteil des (Jahres-)Primär­energie­bedarf	s	empirische Standardabweichung
PE_{ne}	nicht-erneuerbarer Anteil des (Jahres-)Primär­energiebedarf, Alternativ: Q_p	s^2	Stichprobenvarianz
$Prob()$	Eintrittswahrscheinlichkeit	t	Zählvariable für Jahre im Betrachtungszeitraum
$Q_{A,f}$	flächenspezifischer (Jahres-)Endenergiebedarf	T	Betrachtungszeitraum
$Q_{A,f,GEG}$	flächenspezifischer (Jahres-)Endenergiebedarf nach GEG	TLD_w	Technische Lebensdauer der Komponenten w
$Q_{A,m,f}$	flächenspezifischer (Jahres-)Endenergiebedarf des Energieträgers m	U	Wärmedurchgangskoeffizient
$Q_{f,GEG}$	(Jahres-)Endenergiebedarf für Heizung, TWW und Kälte gemäß GEG	U_{max}	maximal zulässiger U-Wert
$Q_{m,f}$	(Jahres-)Endenergiebedarf des Energieträgers m	v	Zählvariable Varianten
$Q_{purchase,f}$	aus dem öffentlichen Netz bezogene (Jahres-)Strommenge	V	Sanierungsvarianten
$Q_{KWK,feed}$	ins Netz eingespeiste (Jahres-)Energie­menge aus KWK	$Var(X)$	Varianz der Zufallsvariable X
$Q_{KWK,prod}$	erzeugte elektrische (Jahres-)Energie­menge aus KWK	$VarK(X)$	Varianzkoeffizient der Zufallsvariable X
		w	Zählvariable für Komponenten in LCC, siehe Auflistung auf Seite X
		W	Anzahl Komponenten in LCC

Parameter- und Variablenverzeichnis

x_n	Realisierung von X	$X_{kv,v}$	Zufallsvariable für Parameter kv des Modells in Variante v
\bar{x}	Stichprobenmittel		
X	Allgemeine Zufallsvariable	$X_{kq,v}$	Zufallsvariable für Parameter kq des Wärmenetzmodells in Variante v
$X_{C,Betrieb}$	Zufallsvariable für Betriebskosten		
$X_{C,Invest,Dämm}$	Zufallsvariable für Anschaffungskosten der Dämmung	X_{GWP}	Zufallsvariable für das Treibhauspotenzial
$X_{C,Invest,Fenster}$	Zufallsvariable für Anschaffungskosten der Fenster	$X_{TLD,w,v}$	Zufallsvariable für Nutzungsdauer der Komponente w in der Variante v
$X_{C,Invest,Batterie}$	Zufallsvariable für Anschaffungskosten der Anlagentechnik	Y	Gleichverteilte Zufallsvariable im Bereich $[0, 1)$
$X_{C,Invest,Anlage}$	Zufallsvariable für Anschaffungskosten der Batteriespeicher	y_n	Realisierung von Y
		z	Zählvariable Szenarien
		Z	Menge der Szenarien
X_{ka}	Zufallsvariable für Parameter ka des Modells im Ausgangszustand, siehe Auflistung		

Indizes der Zufallsvariablen zur Beschreibung der Modellparameter ka und kv

ach	Nutzungsbedingter Luftwechsel	dog	Dicke Dämmschicht oberste Geschosdecke
achZus	Nutzungsbedingte Luftwechsellanpassung nach Sanierung	dSenk	Dauer der Nachtabsenkung
aus	Ausrichtung	fea	Fensteranteil
batt	Nutzkapazität Batteriespeicher	fern	Fernwärmeübergabestation
bhel	elektrischer Wirkungsgrad BHKW	gfl	Grundfläche
bhkw	thermischer Wirkungsgrad BHKW	gh	Geschosshöhe
daw	Dicke Dämmschicht Außenwand	hSenk	Ende der Nachtabsenkung
dda	Dicke Dämmschicht Dach	inf	Infiltrationsluftwechsel
dkd	Dicke Dämmschicht unterer Gebäudeabschluss	int	Interne Wärmegewinne
dNetz	Leitungsdurchmesser im Wärmenetz	ke	Kesselwirkungsgrad
		law	Wärmeleitfähigkeit Dämmschicht Außenwand
		lbv	Verhältnis Länge zu Breite

lda	Wärmeleitfähigkeit Dämmschicht Dach	tZus	Soll-Raumtemperatur- erhöhung nach Sanierung
lkd	Wärmeleitfähigkeit Dämmschicht unterer Gebäudeabschluss	Uaw	U-Wert Außenwand
		Uda	U-Wert Dach
		Ufe	U-Wert Fenster
lNetz	Leitungslängen im Wärmenetz	Ukd	U-Wert unterer Gebäudeabschluss
log	Wärmeleitfähigkeit Dämmschicht oberste Geschossdecke	uNetz	U-Werte der Leitungen im Wärmenetz
neig	Dachneigung	Uog	U-Wert oberste Geschossdecke
profil	Stromlastprofil	Uwb	Wärmebrückenzuschlag
pump	Wirkungsgrad Pumpen	verlust	Anteil Verteilverluste
pwr	(Haushalts-)Strombedarf	vol	Volumen Wasserspeicher
solarA	Fläche PV-Modul oder Solarkollektor	wfl	Anteil der beheizten (Wohn-)Fläche an Grundfläche
solarWK	Wirkungsgrad PV-Modul		
tSenk	Nachtabsenkung	wp	COP Wärmepumpe
tSet	Soll-Raumtemperatur		
tww	Trinkwarmwasserbedarf		

Indizes der Zufallsvariablen zur Beschreibung der Komponenten w

AW	Dämmung Außenwand	WP	Wärmepumpe
Insu	Dämmung sonstige Bauteile	PV	PV-Anlage
		Batterie	Batteriespeicher
Fenster	Fenster	Speicher	Trinkwarmwasser- oder Brauchwasserspeicher
Kessel	Heizkessel		

Wahrscheinlichkeitsfunktionen

$\mathcal{N}(\mu, \sigma)$	Normalverteilung
$\mathcal{TN}(\mu, \sigma, a, b)$	Begrenzte Normalverteilung
$\mathcal{LN}(\mu, \sigma)$	Log-Normalverteilung
$\mathcal{T}(a, c, d, b)$	Trapezverteilung
$\mathcal{U}(a, b)$	Gleichverteilung

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Dekarbonisierung des menschlichen Handelns zur Bekämpfung bzw. Verlangsamung des anthropogenen Klimawandels ist eine der zentralen Aufgaben des 21. Jahrhunderts [IPCC (2021)]. Wenn auch lange vernachlässigt, so ist diese im letzten Jahrzehnt durch die Zunahme extremer Wetterereignisse sowie die Bildung gesellschaftlicher Bewegungen wie Fridays for Future vollständig in der öffentlichen Wahrnehmung angekommen [IPCC (2023); Haunss et al. (2020); Frondel et al. (2021)]. Die Internationale Gemeinschaft hat seit den 1990er Jahren durch die Klimarahmenkonvention (engl: *United Nations Framework Convention on Climate Change*) (UNFCCC) und insbesondere im Rahmen der Klimakonferenzen der Vereinten Nationen versucht, einen Konsens über die Herangehensweise zur Bekämpfung der Klimakatastrophe zu finden. Dieser Prozess ist 2015 auf der 21. Klimakonferenz mit dem Übereinkommen von Paris in der Verpflichtung der Staaten zur Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C und möglichst nahe 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter (sog. 1,5°-Ziel) gegipfelt [UNFCCC (2016)]. Von dieser Erwärmung sind bereits etwa 1,1 °C bis 2020 erreicht worden, was bedeutet, dass das noch verfügbare globale Emissionsbudget mit 300 – 1.500 Gt Kohlenstoffdioxid (CO₂) stark begrenzt ist [IPCC (2021); IPCC (2023)].

Die Bundesrepublik Deutschland ist neben der Ratifizierung dieses Übereinkommens auch auf Ebene der Europäischen Union sowie mit dem nationalen Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) rechtlich bindende Selbstverpflichtungen zur Minderung der Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) und zur Erreichung einer Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 eingegangen [§ 3 Abs. 2 KSG]. Das KSG ordnet dabei die noch verfügbaren Emissionsbudgets und die damit verbundenen Minderungsziele verschiedenen Sektoren zu [§4 Abs.1 i.V.m. Anlage 2 KSG]. Der Gebäudesektor macht derzeit, speziell durch den Energieverbrauch für die Bereitstellung von Raumwärme, einen signifikanten Anteil von etwa 40 % der THG-Emissionen aus [UBA (2023); dena (2022a)].

Zwar hat sich die Energieeffizienz von Neubauten in den vergangenen Jahren deutlich erhöht, sodass die flächenspezifischen Endenergiebedarfe sowie THG-Emissionen im Neubau deutlich zurückgegangen sind, die Modernisierungsquoten im Bestand sind jedoch seit Jahren zu niedrig. Dies hat dazu geführt, dass bereits zum wiederholten Mal die im Klimaschutzgesetz festgeschriebenen Emissionsminderungsziele des Gebäudesektors nicht erreicht werden konnten [UBA (2022a)]. Die Erhöhung der Modernisierungsraten und insbesondere auch der Modernisierungstiefen und damit die Reduzierung der Gebäudeenergiebedarfe sowie eine Abkehr von fossilen Versorgungskonzepten durch die Integration erneuerbarer Energieträger sind daher zwingend für die Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes innerhalb der nächsten 20 Jahre erforderlich.

Neben der Sanierung von Einzelgebäuden entwickelt sich in den letzten Jahren auch die Umsetzung von Quartierskonzepten zu einem wichtigen Baustein der Transformation des Gebäudebestands. Bei diesen Konzepten lassen sich Synergie- und Skaleneffekte erzielen, die sich insbesondere durch den Einbezug dezentraler erneuerbarer Energieträger sowie Ausgleichseffekte von Spitzenlasten ergeben [Weißmann (2017); Quaschnig (2016); Erhorn-Kluttig et al. (2011); dena (2022b)]. Um die Effekte erfassen und möglichst genau abbilden zu können, bedarf es Modellen, die Energieflüsse im Quartier in einer hohen zeitlichen Auflösung abbilden können [Ferrari et al. (2019)].

Fehlende ökonomische Anreize aber auch Unsicherheiten, die teilweise aus Informationsdefiziten resultieren, werden als Hemmnisse für die Entscheidungsfindung für Sanierungskonzepte von Gebäuden und übertragbar darauf auch von Quartieren ausgemacht [BMWSB (2022a)]. Dabei sind neben erzielbaren Energieeinsparungen, die teilweise gesetzlich erreicht werden müssen, auch Informationen über die Kosten und Emissionseinsparungen, die durch die Sanierungskonzepte entstehen, erforderlich. Für die Investitionsentscheidungen sowie für die Emissionen ist zudem der gesamte Lebenszyklus der Gebäude und nicht nur ein Jahr der Nutzungsphase relevant [Islam et al. (2015)].

In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Methoden entwickelt, mit denen die Auswirkungen energetischer Quartierssanierungs- und Energieversorgungskonzepte bewertet werden können, um Entscheidungsfindungsprozesse zu unterstützen. Die Methodik von Weißmann (2017) bildet die ökonomische, ökologische und energetische Bewertungsdimension über den Lebenszyklus ab und ermöglicht einen Variantenvergleich. Das verwendete Bewertungsverfahren ist jedoch rein deterministisch und kann nur über nachgelagerte Szenarioanalysen Abweichungen in den Grundannahmen berücksichtigen. Zudem ist die Methodik auf Neubaukonzepte beschränkt.

Mit dem von Burhenne (2013) entwickelten Modell lassen sich die Unsicherheiten auf den Gebäudeenergiebedarf verschiedener Designvarianten im Planungsprozess stochastisch über eine Monte-Carlo Analyse (MCA) abbilden. Das Modell beinhaltet eine stochastische Betrachtung der Lebenszykluskosten der verschiedenen Varianten, ist jedoch auch auf den Neubau sowie auf Einzelgebäude beschränkt. Zudem werden die ökologischen Auswirkungen der Varianten nicht betrachtet.

Loga et al. (2021) haben für die Verwendung im Monitoring von Wohngebäudebeständen eine Methodik der Berücksichtigung von Unsicherheiten auf den Energiebedarf entwickelt, die jedoch keine Betrachtung weiterer Lebenszyklusphasen oder Bewertungsdimensionen beinhaltet. Eine Bewertungsmethodik, die Potenziale von Sanierungs- und Versorgungskonzepten in einem Quartiersmaßstab einfach und anwendungsbezogen darstellt und dabei alle relevanten Bewertungsdimensionen abbildet sowie Unsicherheiten beziffert, existiert heute noch nicht.

1.2 Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der dargestellten Problemstellung ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Methodik, welche die Unsicherheiten bei der ökonomischen, ökologischen und energetischen Bewertung von Quartierssanierungs- und Quartiersversorgungskonzepten angemessen berücksichtigt. Zur Eingrenzung des Forschungsfelds sollen dabei zunächst lediglich reine Wohnquartiere betrachtet werden. Eine solche Methodik soll Anwendenden im Rahmen eines Variantenvergleichs dazu dienen, energetische Einsparpotenziale aufzuzeigen und die mit Sanierungsmaßnahmen und veränderten Versorgungskonzepten verbundenen ökonomischen und ökologischen Auswirkungen zu veranschaulichen. Somit lässt sich eine Entscheidungsfindung zur Durchführung von energetischen Sanierungsmaßnahmen unterstützen, um einen Beitrag zur Erhöhung der Modernisierungsraten für die Erfüllung der Klimaschutzziele des Gebäudesektors zu leisten.

Die Anwendung der Methodik soll an die Datenverfügbarkeit des Untersuchungsgegenstands anpassbar sein, um die Unsicherheiten entsprechend des jeweiligen Informationsstandes eingrenzen zu können. Dazu sind die relevanten Unsicherheiten zunächst zu identifizieren und anschließend zu quantifizieren. Zugleich soll eine Sensibilisierung für die relevanten Bewertungsparameter geliefert werden, welche den größten Einfluss auf die Unsicherheiten der Bewertungsergebnisse haben. Dies kann als Anhaltspunkt für den notwendigen Fokus bei der Bestandsaufnahme des Quartiers dienen.

Als Ausgangspunkt der Methodenentwicklung sollen bestehende deterministische sowie stochastische Bewertungsmodelle für Einzelgebäude- und Quartierskonzepte verwendet und für den vorliegenden Untersuchungsfall weiterentwickelt werden. Grundlage bilden hierbei die Ansätze der Lebenszyklusbetrachtung der Ökobilanzierung und der Lebenszykluskostenrechnung. Zur Abbildung und Bilanzierung zeitlich hochaufgelöster Energieflüsse sollen dynamische Gebäudeenergiebedarfssimulationen verwendet werden.

Die Zielsetzung dieser Arbeit lässt sich in Form von drei Forschungsfragen definieren, deren Beantwortung im weiteren Verlauf der Bearbeitung vorgenommen werden soll:

- Mit welchen Unsicherheiten sind die Ergebnisse der Berechnungsverfahren für Energiebedarfe von Quartieren behaftet und wie wirken sich diese auf zu erzielende Energieeinsparungen von Sanierungskonzepten aus?
- Wie können entscheidende Unsicherheitsfaktoren mit dem größten Einfluss auf den Energiebedarf identifiziert werden und womit lassen sich diese näher bestimmen?
- Wie lassen sich darüber hinaus ungewisse zukünftige ökonomische und ökologische Entwicklungen bei der gesamtheitlichen Bewertung von Quartierssanierungskonzepten über den Lebenszyklus berücksichtigen?

1.3 Vorgehensweise

Zunächst wird in *Kapitel 2* ein Überblick über die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen der Energiewende in Deutschland gegeben, um eine Einordnung des Kontexts der Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit zu geben. Zudem wird der für diese Arbeit elementare Begriff des Quartiers definiert. Anschließend folgt eine Darstellung der Grundlagen der relevanten Energiebedarfe von Quartieren sowie der Versorgungskonzepte, mit denen diese Energiebedarfe gedeckt werden können. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über vorhandene Verfahren zur Berechnung dieser Energiebedarfe mit einem Fokus auf der Methode der dynamischen Gebäudesimulation.

Kapitel 3 widmet sich den Unsicherheiten, denen die Energiebedarfe eines Quartiers unterliegen. Dazu sind zunächst einige Grundlagen der Stochastik, insbesondere Funktionen zur Abbildung von Zufallsvariablen darzustellen. Des Weiteren wird mit der Monte-Carlo Analyse eine Methode vorgestellt, welche zur Quantifizierung von Unsicherheiten verwendet werden kann. Anschließend werden die Arten der Unsicherheiten von Energiebedarfsmodellen dargestellt. Hier werden die Parameterstreuungen detailliert beschrieben, sowie die Modellunsicherheiten und Szenario-ungewissheiten betrachtet. Zudem werden Modellansätze aus der Literatur vorgestellt, die eine Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Berechnung der Quartiersenergiebedarfe vornehmen.

Daran anschließend gibt *Kapitel 4* eine Darstellung bestehender Bewertungsmodelle für Energieversorgungs- und Quartierssanierungskonzepte. Mit diesem Überblick soll die Frage beantwortet werden, ob bereits eine Methodik existiert, welche die vorgestellten Unsicherheiten bei der Ermittlung der Energiebedarfe von Quartieren sowie der Bewertung der Vorteilhaftigkeit verschiedener Sanierungskonzepte adäquat berücksichtigt. Dazu werden zunächst Entscheidungsprobleme klassifiziert und der Kontext der Bewertung von Quartierssanierungskonzepten als Entscheidungsproblem definiert. Zudem werden Methoden zur ökonomischen und ökologischen Bewertung sowie deren Grundlage, die Lebenszyklusbetrachtung, erläutert.

Da in der Literatur keine Methodik identifiziert werden konnte, welche die in dieser Ausarbeitung formulierten Fragestellungen beantworten kann, wird in *Kapitel 5* die eigene Methodenentwicklung vorgestellt. Nachdem zunächst der Ablauf der Methodenentwicklung beschrieben wird, werden der Bewertungsgegenstand sowie das Bewertungsziel festgelegt. Anschließend folgt die Auswahl der Bewertungsindikatoren, um alle relevanten Dimensionen des Entscheidungsproblems abzubilden. Um die energetischen Indikatoren zu berechnen, wird ein stochastisches Quartiersenergiebedarfsmodell, basierend auf einer Monte-Carlo Simulation von dynamischen Gebäude- und Quartiersmodellen, entwickelt. Dazu werden Unsicherheitsniveaus für die Eingangsparameter eingeführt und zugehörige Verteilungsfunktionen definiert. Dem folgt die Festlegung der

Stichprobenanzahl über eine Analyse der Konvergenz verschiedener Methoden der Zufallszahlgenerierung. Für die ökologische und ökonomische Bewertungsdimension werden Szenarien für die zukünftige Entwicklung der entscheidenden Berechnungsparameter definiert und deren Einbindung in eine Ökobilanz sowie Lebenszyklusrechnung zur Bestimmung der ökologischen und ökonomischen Bewertungsparameter festgelegt. Das Kapitel schließt mit einer Darstellung der softwareseitigen Umsetzung der Methodik.

In *Kapitel 6* folgt eine exemplarische Anwendung der entwickelten Methodik. Hierfür werden zunächst Sensitivitätsanalysen für die Modellvariablen des Energiebedarfsmodells durchgeführt. Diese dienen der Plausibilisierung der Modellierungsergebnisse sowie der Identifikation der relevanten, die Energiebedarfe im Quartier beeinflussenden Größen. Zudem werden mehrere Szenarien für die Bewertung festgelegt, für welche die Bewertungsmethodik angewandt wird. Die Ergebnisse werden hinsichtlich ihrer Robustheit sowie im Vergleich zu einer deterministischen Bewertung analysiert. Es werden verschiedene Formen der Interpretation der Ergebnisse aufgezeigt, die graphische Darstellungsformen und die Nutzung statistischer Kennwerte umfassen.

Aus den Ergebnissen der exemplarischen Anwendung der Bewertungsmethodik werden in *Kapitel 7* Handlungsempfehlungen formuliert. Diese sind verständlich und komprimiert gehalten und richten sich an Agierende der energetischen Quartierssanierung sowie der Politik. Sie sollen genutzt werden können, um zur Steigerung der Sanierungsraten als indirektes Ergebnis einer Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen für Quartierskonzepte durch die Ergebnisse dieser Ausarbeitung beizutragen.

Die Arbeit schließt in *Kapitel 8* mit einer Zusammenfassung des Vorgehens und der Ergebnisse. Zudem wird ein Ausblick auf offene Forschungsfragen gegeben, um Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsvorhaben, insbesondere zur Anwendung und Erweiterbarkeit der entwickelten Methodik, aufzuzeigen.

2 GRUNDLAGEN DER ENERGIEVERSORGUNG VON QUARTIEREN IM KONTEXT DER ENERGIEWENDE

2.1 Politische Rahmenbedingungen der Energiewende im Gebäudesektor

2.1.1 Zielvorgaben für die Transformationspfade zur Klimaneutralität

Wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben, hat sich die Bundesrepublik Deutschland als Mitglied der Klimarahmenkonvention im Übereinkommen von Paris verpflichtet, Maßnahmen zu ergreifen, um das 1,5°-Ziel zu erreichen. Teil dieses Übereinkommens ist die Verpflichtung zur Erstellung eines Nationalen Klimaplanes und regelmäßigen Fortschrittsberichterstattung [UNFCCC (2016)].

Zur Umsetzung der Vorgaben hat der Bundestag 2019 das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verabschiedet. Dieses gibt in § 3, seit einer aufgrund eines Urteils des Bundesverfassungsgerichts [BVerfG (2021)] erfolgten weiteren Verschärfung im Jahr 2021, die nationalen Klimaschutzziele einer schrittweisen Minderung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um 65 % bis 2030 und um 88 % bis 2040 vor. Für das Jahr 2045 wird eine Netto-Treibhausgasneutralität angestrebt. Dieser Begriff ist im KSG in § 2 Nr. 9 als „Gleichgewicht zwischen anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken“ definiert. Ab 2050 sollen die Senken die Emissionsquellen übersteigen, sodass Negativemissionen erzielt werden.

Emissionssenken, also die Entnahme von Treibhausgasen (engl. *Carbon Dioxide Removal*) aus der Atmosphäre, können natürlichen Ursprungs wie bspw. die Moorrenaturierung oder Aufforstung sein oder mit technischen Mitteln erreicht werden [Smith et al. (2023)]. Die entsprechenden Technologien für die CO₂-Entnahme sind jedoch noch nicht im industriellen Maßstab verfügbar und somit immer auch mit dem Risiko einer Wette auf zukünftige Innovationen verbunden [UBA (2019)]. Die Netto-Emissionssenkungen sind daher insbesondere in den nächsten Jahren zwingend durch eine Reduktion des Emissionsausstoßes zu erreichen.

Die notwendigen Emissionsreduktionen und damit einhergehend die verfügbaren Emissionsbudgets sind im KSG auf die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges aufgeteilt. Für den in dieser Arbeit fokussierten Gebäudesektor sind die Zielvorgaben des KSG sowie die historischen Emissionsmengen der letzten Jahre in Abbildung 2-1 dargestellt. Zum einen lässt sich erkennen, dass die Emissionen in den vergangenen Jahren im Gebäudesektor nur unmerklich gesunken sind. Zum anderen wird deutlich, dass die gesetzten Ziele seit 2020 konstant um etwa 5 Mt CO_{2,äq} verfehlt wurden.

2 Grundlagen der Energieversorgung von Quartieren im Kontext der Energiewende

Das KSG sieht daher in § 8 Abs. 1 vor, dass die zuständigen Ministerien (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)) ein Sofortprogramm für den Gebäudesektor auflegen müssen, um Maßnahmen anzustoßen, die zu einer Wiedererreichung des Zielpfads führen. Aufgrund der Zielverfehlung für das Jahr 2021 wurde am 13. Juli 2022 ein Sofortprogramm vorgestellt [BMWK/BMWSB (2022)], welches eine Reihe von Maßnahmen enthält, die im Verlauf der Arbeit näher erläutert werden. Der für die Prüfung des Sofortprogramms zuständige Expertenrat für Klimafragen (ERK) bezweifelt jedoch, ob die durch das Sofortprogramm initiierten zusätzlichen Emissionsminderungen ausreichen, um die Zielvorgaben in der Zukunft einhalten zu können [ERK (2022)].

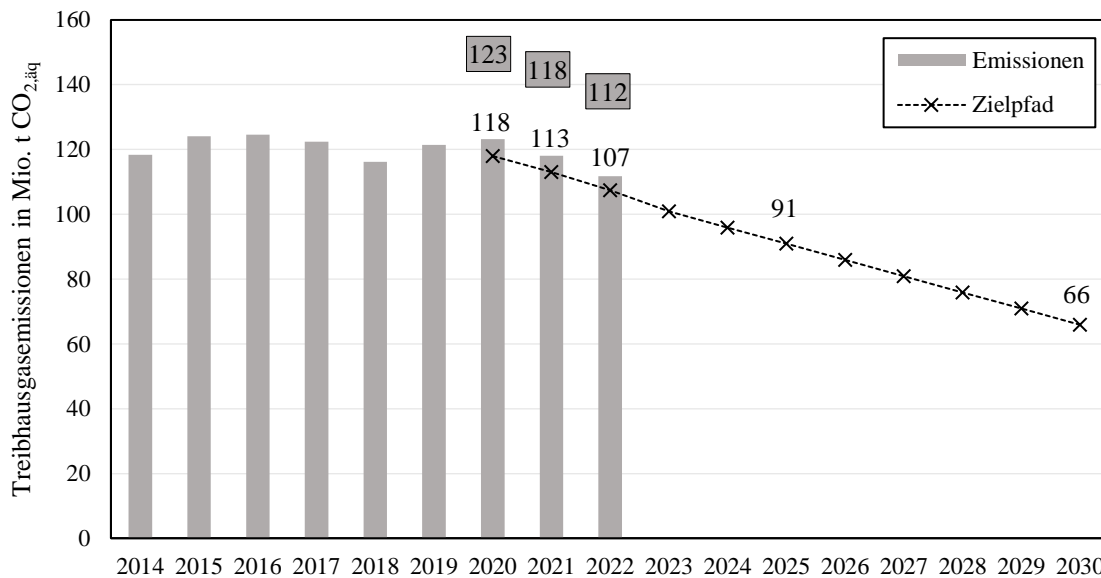


Abbildung 2-1: Emissionsmengen des Gebäudesektors sowie Zielpfad der Minderungen nach Bundes-Klimaschutzgesetz [UBA (2023)]

Auch der Sektor der Energiewirtschaft ist für die Gebäudeversorgung durch Strom aus dem öffentlichen Versorgungsnetz relevant. Über den in § 1a des Atomgesetzes (AtG) geregelten Atomausstieg bis zum April 2023 sowie dem im Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVVBG) festgeschriebenen Ausstieg aus der Stromerzeugung mit Kohle bis 2038 werden die fossilen bzw. mit hohem Risiko behafteten Energieträger aus der Stromerzeugung ausgenommen. Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist zudem gesetzlich festgelegt, dass bis 2030 80 % des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien erzeugt werden sollen. Nach Abschluss des sogenannten „Kohleausstiegs“ soll zudem die Treibhausgasneutralität auch in der Stromversorgung erreicht werden (§§ 1 Abs. 1, 1a Abs. 1 EEG). Das EEG macht daher Vorgaben, inwieweit der erforderliche Ausbau der erneuerbaren Energien vorzunehmen ist und bietet zu dessen Beschleunigung eine Reihe von Fördermaßnahmen an (siehe Kapitel 2.1.3).

Ein weiteres Instrument zur Beschleunigung der Transformation im Energiesektor ist der Emissionshandel. Dieser wird national über das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) geregelt. Das BEHG schreibt den Erwerb von Emissions-Zertifikaten für das Inverkehrbringen von Brennstoffen vor. Die Menge der jährlich verfügbaren Zertifikate ist begrenzt und sinkt über die Zeit, um so den Emissionsausstoß des Energiesektors stetig zu senken. In der Regel können die Kosten für die Anschaffung der Zertifikate, deren Preis bis 2026 durch § 10 Abs. 2 BEHG vorgegeben wird und 2023 30 € pro Tonne CO₂-Äquivalent (CO_{2,äq}) beträgt, an ihre jeweiligen Abnehmer weitergeben. Im Gebäudebereich führte dies jedoch zu der Problematik, dass Mietende diese Kosten zu tragen und Vermietende daher keine Anreizwirkung zur Sanierung und Reduzierung der Emissionen aus dem Gebäudebetrieb haben. Aus diesem Grund hat die Legislative mit dem Kohlendioxid-kostenaufteilungsgesetz (CO₂KostAufG) festgelegt, dass sich Mietende und Vermietende die Kosten für die Emissionszertifikate aus dem nationalen Emissionshandel teilen müssen. Der durch die Vermietenden zu leistende Anteil bemisst sich dabei an den flächenspezifischen Emissionen der Gebäude (§ 5 i.V.m. Anlage CO₂KostAufG).

Darüber hinaus hat auch die Europäische Union einen Emissionshandel mit der Richtlinie 2003/87/EG (Emissionshandelsrichtlinie) eingeführt, die in Deutschland mit dem Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) in nationales Recht umgesetzt wurde. Bei diesem werden Emittenten bestimmter Industrien (bspw. Zement- oder Stahlherstellung) und großer Kraftwerke (über 20 MW) eine Anzahl an Zertifikaten zugeteilt, die zum Ausstoß der Emissionen berechtigen. Die Zuteilungsmenge sinkt dabei entsprechend der politischen Minderungsvorgaben. Überschüssige Zertifikate können gehandelt werden. Der Preis für ein Zertifikat für den Ausstoß einer Tonne CO_{2,äq} ist in den vergangenen Jahren stark gestiegen und lag 2022 im Durchschnitt bei 81 € [EEA/Ember (2023)].

Auch auf der Ebene der Europäischen Union wurde mit dem Europäischen Klimagesetz (Verordnung (EU) 2021/1119) vom 30. Juni 2021 ein verbindliches Gesetz als Teil des als „EU Green Deal“ bezeichneten Konzepts der Europäischen Kommission verabschiedet, welches eine 55-prozentige Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2030 und eine Netto-Treibhausgasneutralität bis spätestens 2050 innerhalb der Europäischen Union als Ziele definiert. Die Verordnung (EU) 2018/842 (Lastenteilungsverordnung) gibt in Verbindung mit dem Durchführungsbeschluss (EU) 2020/2126 die aus den Minderungszielen resultierenden Emissionsbudgets für Deutschland für den Zeitraum 2021-2030 vor. Zur Dokumentation des Vorgehens zur Zielerreichung sind ein Nationaler Energie- und Klimaschutzplan sowie regelmäßige Fortschrittsberichte gemäß der Verordnung (EU) 2018/1999 (Governance-Verordnung) zu erstellen. Die europäischen Vorgaben werden bisher jedoch von den Zielsetzungen des KSG übertroffen und spielen daher für die Betrachtung der Transformation des deutschen Gebäudesektors nur eine untergeordnete Rolle.

2.1.2 Energetische Anforderungen an Gebäude

Auf Europäischer Ebene existieren mit der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (sog. EPBD-Richtlinie) und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz (sog. Energieeffizienz-Richtlinie) zwei zentrale Regelwerke, welche die Mitgliedstaaten auffordern gesetzliche Regelungen zu Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden aufzustellen. Für die Umsetzung dieser Richtlinien und die damit verbundene Erreichung der Emissionsminderungsziele im Gebäudesektor ist auf nationaler Ebene das Gebäudeenergiegesetz (GEG) das zentrale Regelwerk. Am 8. August 2020 beschlossen und letztmals am 20. Juli 2022 geändert, stellt dieses Gesetz Anforderungen an die energetische Qualität der Bauteile, die Energieeffizienz der Anlagentechnik sowie an den Einsatz erneuerbarer Energien in neu zu errichtenden und bestehenden Gebäuden.

Das Grundprinzip der Anforderungen des GEG ist neben Vorgaben zu einzelnen Bauteil-ausführungen das Referenzgebäudeverfahren. Das Referenzgebäude ist ein Gebäude gleicher Geometrie, Ausrichtung und Gebäudenutzfläche, für welches definierte technische Referenzausführungen festgelegt sind. Als Referenzstandort für die Klimarandbedingungen und solaren Erträge wird Potsdam definiert (§ 23 Abs. 2 GEG).

Die grundlegenden Anforderungen beziehen sich im Neubau bei Wohngebäuden auf einen maximalen Jahres-Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung Q_p von 55 % im Vergleich zum Referenzgebäude sowie Vorgaben zum maximalen auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlust H'_T (§§ 15, 16 GEG). Für Nichtwohngebäude wird die Beleuchtung mit in die Berechnung des Primärenergiebedarfs einbezogen (§ 18 GEG). Für den baulichen Wärmeschutz werden zulässige Höchstwerte für die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der einzelnen Bauteile vorgegeben (§ 19 GEG). Der Primärenergiebedarf Q_p berücksichtigt dabei über die in Anlage 4 GEG gegebenen Primärenergiefaktoren nur den nicht-erneuerbaren Anteil. Berechnungsgrundlage für Q_p ist das Monatsbilanzverfahren der DIN V 18599:2018-09 (§§ 20, 21 GEG). In räumlichem Zusammenhang erzeugter Strom aus erneuerbaren Energien kann dabei bis zur Höhe des Monatsstrombedarfs zum Abzug gebracht werden (§ 23 GEG).

Zusätzlich besteht im Neubau die Verpflichtung der anteiligen Deckung des Jahres-Endenergiebedarf für Wärme, Trinkwarmwasser und Kälte $Q_{f,GEG}$ aus erneuerbaren Energiequellen (§ 10 Abs. 2 Nr. 3 GEG). Diese kann durch eine mindestens 15-prozentige Deckung aus Solarthermie oder Strom aus einer Photovoltaik-Anlage erfolgen oder durch eine mindestens 50-prozentige Deckung aus Geothermie, Umwelt- oder Abwärme, die über Wärmepumpen nutzbar gemacht wird, sowie Biomasse (§§ 35-40 GEG). Auch eine mindestens 50-prozentige Deckung des Endenergiebedarfs über eine hocheffiziente KWK-Anlage sowie eine mindestens 40-prozentige Deckung durch eine Brennstoffzellenheizung

gelten als Alternative zur Einhaltung der Anforderungen (§ 43 GEG). Für eine Versorgung mit Fernwärme gelten die voran beschriebenen Anforderungen analog für die Endenergie der Wärmeerzeugung des Netzes. Anstelle der anteiligen Nutzung von erneuerbaren Energien kann als Ersatzmaßnahme bei neu entstehenden Gebäuden auch eine Verringerung des H_T' um mindestens 15 % erfolgen (§ 45 GEG).

Im Grundsatz muss jedes Gebäude für sich betrachtet diese Anforderungen einhalten. In § 107 GEG ist jedoch die Ausnahme festgelegt, dass auch eine gemeinsame Einhaltung der Anforderungen zum Einbezug erneuerbarer Energieträger über mehrere Gebäude im Quartier möglich ist, sofern diese gemeinschaftlich mit Wärme oder Kälte versorgt werden.

An bestehende Gebäude werden die meisten Anforderungen derzeit lediglich in Verbindung mit Austauschprozessen oder Umbaumaßnahmen gestellt. Hierbei gilt das prinzipielle Verbot einer Verschlechterung des bestehenden energetischen Zustands (§ 46 GEG). Werden mehr als 10 % einer Bauteilfläche erneuert oder ersetzt, so sind Höchstgrenzen für die U-Werte dieser Bauteile einzuhalten (§ 48 GEG). Alternativ kann der Nachweis auch über das Referenzverfahren erbracht werden. Dort ist für das bestehende Wohngebäude nach der Sanierung ein maximaler Primärenergiebedarf Q_p im Vergleich zum des Referenzgebäude festgelegt. Zudem sind verschiedene H_T' -Werte einzuhalten. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die zulässigen Grenzen. Zudem besteht die Pflicht der Inanspruchnahme einer kostenfreien Energieberatung vor grundlegenden Änderungen an einem Einfamilienhaus (EFH) oder Zweifamilienhaus (§ 48 Satz 3 GEG). Lediglich für die oberste Geschossdecke gibt es eine von einer Umbaumaßnahme unabhängige Verpflichtung zur Erreichung einer energetischen Mindestqualität über einen maximalen U-Wert (U_{max}) von 0,24 W/m²K. Ausgenommen hiervon sind seit 2002 selbst bewohnte Ein- und Zweifamilienhäuser (§ 47 GEG).

Auch für die Anlagentechnik im Gebäude gilt das Gebot der Erhaltung der energetischen Qualität bei einem Austausch (§ 57 GEG). Darüber hinaus werden bei Änderungen an der Anlagentechnik mehrere Vorgaben zu technischen Spezifikationen gemacht, bspw. zu raumweiser Regelung von Heizungen oder Abschaltvorrichtungen der Wärmeerzeuger (§§ 61 ff. GEG). Zudem schreibt das Gesetz ein Verbot für den Betrieb von Heizkesseln vor, die älter als 30 Jahre sind (§ 72 Abs. 1 GEG). Der Betrieb von Heizölkesseln wird ausgenommen mit einigen Erleichterungen ab 2026 verboten (§ 72 Abs. 2 GEG).

Zusätzlich zu den vorgestellten Anforderungen gibt es die Verpflichtung, dass für jedes Gebäude bei Verkauf oder Vermietung ein Energieausweis vorliegen muss, der durch eine berechnete Person auszustellen ist. Dieser hat entweder auf Basis von Verbrauchsdaten oder der Berechnung gemäß den Vorgaben des GEG Auskunft über die energetische Qualität des Gebäudes zu geben. Dazu sind neben den Endenergiebedarfen, die die Einordnung in Energiebedarfsklassen bedingen, auch der Primärenergiebedarf sowie die aus den Endenergiebedarfen resultierenden Treibhausgasemissionen anzugeben. (§§ 81-86 GEG)

2 Grundlagen der Energieversorgung von Quartieren im Kontext der Energiewende

Tabelle 2-1: Überblick über die energetischen Vorgaben des GEG für bestehende Wohngebäude

Bauteil	U_{\max} in W/m ² K für Bestandsgebäude	
Außenwände	0,24	
Fenster	1,30	
Außentüren	1,80	
Dachflächen, oberste Geschossdecken	0,24	
Wände gegen Erdreich, Bodenplatten, Kellerdecken	0,30	
alternativ:		
Gebäude	$U_{\max, \text{Hülle}}$ in W/m ² K für Bestandsgebäude	$Q_{p, \max}$ in kWh/m ² a
Freistehend; $A_{\text{Nutz}} \leq 350 \text{ m}^2$	0,56	$1,4 * Q_{p, \text{Referenz}}$
Freistehend; $A_{\text{Nutz}} > 350 \text{ m}^2$	0,70	
Einseitig angebaut	0,63	
Sonstige	0,91	

Die vorgestellten Anforderungen beziehen sich auf die bei Erstellung dieser Arbeit gültigen Gesetze zum Stand des 1. März 2023. Es sei angemerkt, dass die Anforderungen sich in den vergangenen Jahren stetig verändert haben und auch für die nahe Zukunft bereits weitere Anpassungen von den gesetzgebenden Instanzen geplant sind. So wird mit der nächsten Novelle des GEG vermutlich die Pflicht der Deckung von 65 % des Endenergiebedarfs für Raumwärme auch bei bestehenden Gebäuden beim Austausch der Heizungsanlage ab dem 1. Januar 2024 eingeführt werden [BMWK/BMWSB (2023)]. Auch die EPBD sowie die Energieeffizienzrichtlinie werden im Zuge des „Fit for 55“ Maßnahmenpakets der EU-Kommission grundlegend überarbeitet und voraussichtlich energetische Mindeststandards für Bestandsgebäude enthalten [Europäische Kommission (2021)]. Eine weitere Verschärfung der Annahmen ist daher erwartbar sowie folgerichtig, da eine Reihe von Studien zu dem Schluss kommen, dass die derzeitigen rechtlichen Vorgaben zur Zielerreichung des klimaneutralen Gebäudebestands bis zum Jahr 2045 nicht ausreichend sind [bspw. Agora Energiewende (2021); dena (2021a); Sunderland/Jahn (2021)].

2.1.3 Förderinstrumente zur Unterstützung der klimaneutralen Transformation des Gebäudebestands

Zum Jahresende 2020 wurden die Fördermaßnahmen für die energetische Sanierung von Gebäuden und Quartieren grundlegend angepasst und vereinheitlicht. Seitdem gibt es mit der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) und seit September 2022 mit der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) zwei zentrale nationale Fördermechanismen. Bis 2026 ist eine Fördersumme von 70 Mrd. € geplant, welche über das im Klima- und Transformationsfonds ausgegliederte Sondervermögen des Bundeshaushalts bereitgestellt wird [Bundesregierung (2022)]. Die zentralen, für die Umsetzung der

Förderung zuständigen Stellen sind das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und die Kreditbank für Wiederaufbau (KfW).

Bei der BEG gibt es abhängig von der angestrebten Energieeffizienz des Wohn- oder Nichtwohngebäudes Kredite von bis zu 150.000 € mit Tilgungszuschüssen von bis zu 25 % durch die KfW für die Durchführung von Sanierungsmaßnahmen. Die Energieeffizienz wird in Effizienzklassen angegeben, die analog zum Referenzgebäudeverfahren des GEG berechnet werden und sich am Primärenergiebedarf und am Transmissionswärmeverlust bemessen. Zudem kann der Zuschuss erhöht werden, wenn mind. 65 % des Heizenergiebedarfs mit erneuerbaren Energien gedeckt wird. Sonderzuschüsse werden für die Sanierung besonders alter Gebäude sowie die Durchführung innerhalb einer seriellen Sanierung gewährt. Sind die Fördernehmer Kommunen, so erhöhen sich die Tilgungszuschüsse nochmals bzw. können als reine Zuschüsse gewährt werden. [BMWK (2022b); BMWK (2022c)]

Bei der ausschließlichen Umsetzung von Einzelmaßnahmen kann die Förderung der BEG Einzelmaßnahmen über das BAFA in Höhe von max. 15 % der förderfähigen Ausgaben in Anspruch genommen werden [BMWK (2022a)]. Auch das Honorar einer Energieberatung zu Beginn einer Sanierungsmaßnahme kann mit bis zu 80 % bezuschusst werden. Somit gibt die Politik klare Anreize, um den Informationsdefiziten entgegenzuwirken. [BMWi (2020b); BMWi (2020a)]

Die BEW ist eine Förderung, mit der über Zuschüsse zur Umsetzung von Wärmenetzen mit mind. 75 % erneuerbaren Energieträgern gewährt werden. Voraussetzung ist zudem, dass über das Netz mindestens 16 Gebäude oder mehr als 100 Wohneinheiten versorgt werden. Die Zuschüsse werden entweder zur Durchführung von Machbarkeitsstudien oder zur Umsetzung der tatsächlichen Maßnahmen gewährt. [BMWK (2022d)]

Neben der BEW gibt es mit dem Förderprogramm der Energetischen Stadtsanierung ein weiteres Instrument für die Quartiersversorgung. Fördernehmer sind hierbei auf Kommunen oder kommunale Unternehmen beschränkt, welche über das Programm zinsverbilligte Kredite für die Umsetzung von vernetzten Versorgungskonzepten beantragen können [KfW (2023b)]. Zudem gibt es die Möglichkeit einen direkten Zuschuss für die Erstellung eines Quartierskonzepts sowie für das Sanierungsmanagement zu erhalten [KfW (2023a)]. Über die letzte Dekade wurde dieses Förderprogramm von Forschenden begleitet, um die Erkenntnisse aus den einzelnen Förderprojekten zu bündeln. Im Rahmen dieser Begleitforschung sind eine Vielzahl an Publikationen und Hilfestellungen für die Durchführung von Quartierssanierungskonzepten entstanden [bspw. BMUB (2017); BMWSB (2022b)].

Die auch in der Politik gesteigerte Priorisierung der energetischen Sanierung im Vergleich zum Neubau zeigt sich in der stark gekürzten Förderung von Neubauvorhaben. Seit dem 1. März 2023 werden im Rahmen der BEG Klimafreundlicher Neubau (KFN) durch die

KfW lediglich Förderkredite für Neubauten der Effizienzstufe 40 mit dem Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude Plus sowie einem Anlagenkonzept ohne Öl, Gas oder Biomasse gewährt. Zudem werden Förderkredite für die Errichtung und den Erwerb von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien vergeben. Hierbei handelt es sich um Kredite mit im Vergleich zum Marktüblichen deutlich verbesserten Konditionen [BMWSB (2023)].

Neben den Förderungen, die auf die Reduktion der Investitionskosten der Sanierungsmaßnahmen oder Versorgungskonzepte abzielen, existieren mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) zwei Gesetze, welche die Erzeugung von Energie aus erneuerbaren oder hocheffizienten Quellen in der Nutzungsphase der Gebäude fördern. Durch das EEG kann für die Einspeisung von gebäudenah erzeugtem Strom aus Photovoltaik in das öffentliche Netz eine Einspeisevergütung gezahlt werden [§ 48 EEG].

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass Mieterstromkonzepte gefördert werden. Dies beschreibt Konzepte, in denen der PV-Anlagenbetreiber den erzeugten Strom an Letztverbraucher in unmittelbarer Nähe im Gebäude oder Quartier verkauft, ohne dass dieser über das öffentliche Netz geleitet werden muss [§ 21 Abs. 3 EEG]. Für diese Strommenge erhält der Anlagenbetreiber eine Förderung (sog. „Mieterstromzuschlag“), die sich nach der Größe der Anlage und dem Datum der Inbetriebnahme richtet [§ 48a EEG].

Auch mit Biomasse betriebene Stromerzeugungsanlagen können eine Einspeisevergütung aus dem EEG erhalten [§ 42 EEG]. Handelt es sich dabei nicht um reine stromerzeugende Anlagen, sondern um Kraft-Wärme-gekoppelte (KWK) Anlagen zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme, so bestehen Zahlungsansprüche über das KWKG. Hierbei erhält der Betreiber einen Zuschlag für in das öffentliche Netz eingespeisten Strom aus der KWK-Anlage [§§ 6, 7 KWKG]. Ist die elektrische Leistung der Anlage kleiner als 100 kW oder wird der Strom an Letztverbraucher in einem geschlossenen Verteilernetz geliefert, so wird der Zuschlag auch für die nicht ins öffentliche Netz eingespeiste Strommenge gezahlt [§ 6 Abs. 3 KWKG].

2.2 Quartiersdefinition

Zu Beginn dieser Ausarbeitung ist der zentrale Begriff des Quartiers einzuführen. Wie in Kapitel 1.1 beschrieben wird dem Quartier als Handlungsebene eine zentrale Rolle für die Umsetzung von Sanierungs- und Energieversorgungskonzepten eingeräumt. Allerdings unterliegt der Quartiersbegriff keiner allgemeingültigen Definition. Vielmehr wurde er in der Vergangenheit abhängig vom jeweiligen Kontext in verschiedenen Forschungsrichtungen unterschiedlich verwendet. Daher wird im Folgenden ein Überblick über verschiedene Begriffsdefinitionen des Quartiers gegeben, um daraus eine für diese Untersuchung anwendbare Definition zu erarbeiten.

Hesse et al. (2021) beschreiben, dass insbesondere im Kontext der Sozialforschung eine gesellschaftlich-handlungsorientierte Dimension des Quartiersbegriffs im Vordergrund steht, während in der Stadtplanung hauptsächlich die baulich-physikalische Dimension Beachtung findet. Quartiere werden demnach als Handlungsebenen begriffen, in denen eine Vielzahl an Agierenden in einem räumlich begrenzten Kontext interagieren können. Der im Englischen oft verwendete Begriff *neighborhood* stellt diesen interaktiven und räumlich zusammenhängenden Charakter gut dar, der analog dazu verwendete Begriff eines (*city*) *districts* spiegelt vordergründig die räumliche Komponente wider.

Daraus abgeleitet wird oft die Abgrenzung hin zu anderen räumlichen Ebenen in die Definition des Quartiersbegriff einbezogen. Frick (2011) beschreibt ein Quartier als mittlere Maßstabsebene, die sich zudem gegenüber den anderen Gebietseinheiten abgrenzen und sich somit von der Umgebung unterscheiden lässt. Eine solche Unterscheidbarkeit kann beispielsweise durch städtebaulich-architektonische Merkmale der Gebäudestruktur oder durch das Quartier begrenzende Verkehrswege sowie natürliche Barrieren gegeben sein.

In der Vergangenheit wurden daher Siedlungstypologien entwickelt, die verschiedene Raumstrukturen über ihre bauliche Struktur gegeneinander abgrenzen [bspw. Roth (1980); Hegger et al. (2012)]. Für eine detailliertere Ausführung zu den verschiedenen Typologien sowie den Quartiersdefinitionen sei an dieser Stelle auf die Arbeit von Müller (2023) verwiesen.

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) als eine der zentralen ordnungsrechtlichen Vorschriften der klimaneutralen Transformation des Gebäudesektors (siehe Kapitel 2.1.2) bildet lediglich die räumliche Ebene bei der Definition des Quartiersbegriffs ab. Ein Quartier wird hier in § 107 GEG als räumlich zusammenhängende Gebäude definiert, die den Zweck einer gemeinsamen Wärmeversorgung verfolgen. Die Deutsche Energie-Agentur (dena) hat die Legaldefinitionen des Quartiersbegriffs des GEG mit weiteren Gesetzen verglichen. Auf dieser Basis hat sie die Definition neben dem räumlich abgrenzbaren Bezug der Gebäude um die Merkmale einer gemeinsamen energetischen Infrastruktur, des Vorhandenseins mindestens einer Erzeugungsanlage und mehrerer Letztverbraucher sowie des Anschlusses an das vorgelagerte Netz der allgemeinen Versorgung erweitert [dena (2021b)].

In dieser Ausarbeitung stehen insbesondere die Energieversorgungskonzepte und die Möglichkeiten zur energetischen Sanierung von Quartieren im Vordergrund. Der Fokus liegt daher klar auf der baulichen Umwelt sowie der leitungsgebundenen Infrastruktur zur Versorgung dieser Bauten. In Anlehnung an den ordnungsrechtlichen Rahmen und die vorgestellten Definitionen wird ein Quartier daher in dieser Arbeit als räumlicher Zusammenschluss mehrerer Gebäude festgelegt, für die ein gemeinsames Versorgungskonzept denkbar, jedoch nicht zwingend erforderlich ist. Auch die Anlagentechnik des jeweiligen Versorgungskonzepts (bspw. Versorgungsleitungen oder Wärmeerzeugungsanlagen, siehe Kapitel 2.4) wird dem Quartier hinzugezählt. Als Abgrenzung zu einem

Einzelgebäude sind mindestens zwei Baukörper notwendig. Eine maximale Gebäudebegrenzung wird nicht festgelegt.

Der Betrachtungsrahmen wird zusätzlich um zwei Aspekte eingeschränkt. Zum einen werden zunächst nur reine Wohnquartiere betrachtet, um die Komplexität in der initialen Methodenentwicklung zu verringern, wenngleich eine Einbindung von Nichtwohngebäuden in Quartiersversorgungskonzepten mit einigen Vorteilen einhergeht [Weißmann (2017)]. Zum anderen wird der Verkehrssektor analog zu vorherigen Arbeiten wie Weißmann (2017) oder Müller (2023) nicht berücksichtigt. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Elektrifizierung des Individualverkehrs und der Gebäudeversorgung sowie der damit einhergehenden Sektorkopplung (siehe Kapitel 2.4) kritisch zu hinterfragen. Diese Problematik wird daher im Laufe der Arbeit nochmals ausführlicher diskutiert, soll an dieser Stelle jedoch definitorisch zunächst abgegrenzt bleiben.

2.3 Energiebedarfe in Quartieren

Gemäß der im vorherigen Abschnitt gewählten Definition, setzt sich das Quartier aus einzelnen Gebäuden zusammen, in welchen Energie zur Bereitstellung von Raumwärme, Trinkwarmwasser, Frischluft und Kälte sowie zum Betrieb elektrischer Verbraucher benötigt wird. Dieser an den Endverbrauchsstellen erforderliche Energiebedarf wird als *Nutzenergiebedarf* bezeichnet. Werden die Energieverluste, die bei der Bereitstellung oder Erzeugung und Verteilung dieser Energiemengen durch die entsprechende Anlagentechnik im Gebäude entstehen und die an der Gebäudekante gemessen werden können, berücksichtigt, so wird dies als *Endenergiebedarf* bezeichnet. Die Endenergie wird üblicherweise getrennt nach verschiedenen Energieträgern ausgegeben. Diese Energiemenge kann entweder über die öffentliche Versorgung bereitgestellt werden und wird dann in der Regel in Lieferverträgen abgerechnet oder sie kann lokal an den Gebäuden aus erneuerbaren Quellen wie Solarenergie oder Geothermie erzeugt werden. Wird das Quartier als Zusammenschluss von Gebäuden betrachtet, lassen sich die Systemgrenzen für die Definition der Endenergie auch von den Gebäudekanten an die Quartierskante verschieben.

Um die Energieträger der öffentlichen Versorgung, wie Strom oder Gas, an der Gebäudekante bereitstellen zu können, fallen weitere Energiemengen für Exploration, Umwandlung und Transport an. Die Summe der Energiemenge dieser sogenannten „Vorketten“ sowie des Endenergiebedarfs wird als *Primärenergiebedarf* bezeichnet und in einen nicht erneuerbaren und einen erneuerbaren Anteil aufgeteilt. Die Ermittlung des Primärenergiebedarfs erfolgt in der Regel über eine Multiplikation eines Primärenergiefaktors des Energieträgers mit der Menge des Endenergiebedarfs. Die eingeführten Energiebedarfe sind in Abbildung 2-2 für ein Quartier schematisch dargestellt und werden im Folgenden detaillierter vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf Wohngebäuden, da im Rahmen der Arbeit zunächst nur reine Wohnquartiere betrachtet werden (siehe Kapitel 2.2).

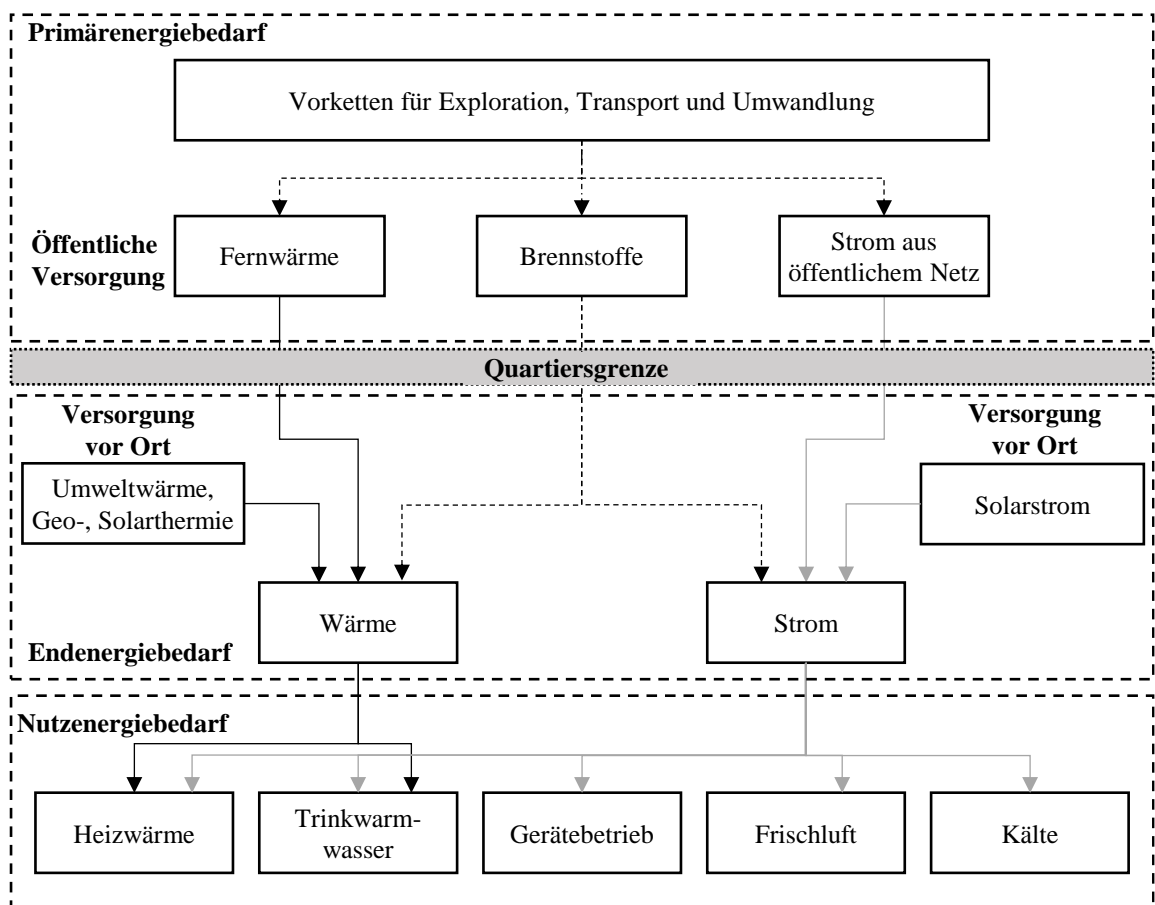


Abbildung 2-2: Übersicht über die Energiebedarfe eines Quartiers [eigene Darstellung in Anlehnung an Weißmann (2017)]

In Abbildung 2-3 (links) sind auf Basis des tatsächlichen Endenergieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2021 die Anteile der Nutzungsanwendungen für Wohngebäude dargestellt. Bezüglich der Begrifflichkeiten sei erwähnt, dass ein *Energieverbrauch* im Gegensatz zur berechneten Größe eines Energiebedarfs eine tatsächliche, messbare Energiemenge beschreibt [Ackermann (2020)]. Es wird deutlich, dass Raumwärme den mit Abstand größten Anteil am Endenergieverbrauch von Wohngebäuden ausmacht. Die Jahresmitteltemperatur in Deutschland betrug in den letzten Jahrzehnten im Mittel zwischen 8 und 10 °C [UBA (2022b)]. Das Behaglichkeitsfeld des Menschen erfordert jedoch je nach Tätigkeit eine Raumtemperatur von 18 bis 24 °C [Bohne (2022)]. Daher ergibt sich das Erfordernis die Räume, in denen sich Menschen regelmäßig aufhalten, während eines nicht unerheblichen Teils des Jahres zu beheizen.

2 Grundlagen der Energieversorgung von Quartieren im Kontext der Energiewende

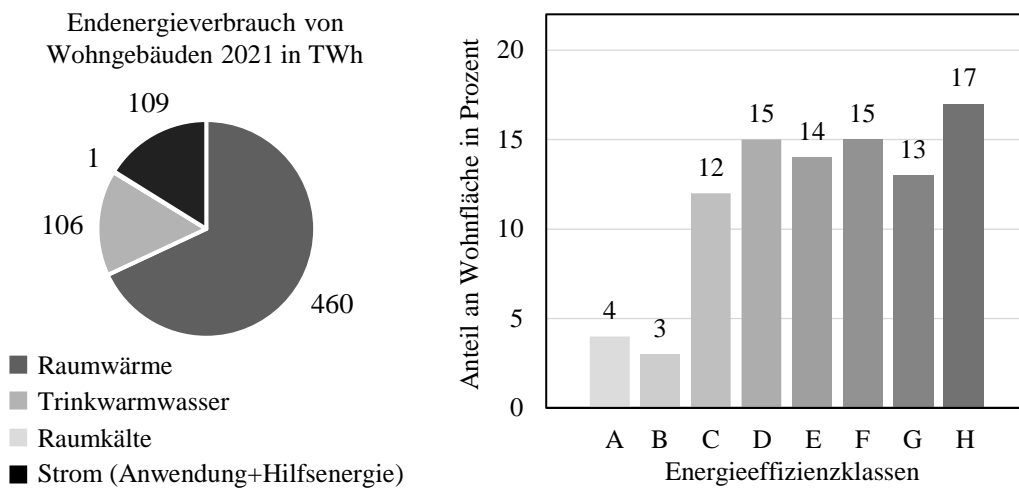


Abbildung 2-3: Anteil der Nutzungsarten am Endenergieverbrauch in Wohngebäuden (links) [dena (2022a)] und Einteilung der Wohnfläche in Effizienzklassen des Energiebedarfsausweises (rechts) [Agora Energiewende (2023)]

Dazu sind in der Regel Wärmeübergabesysteme in den Räumen installiert, die über ein Trägermedium, meist warmes Wasser oder Luft, die Wärme an die Raumluft sowie die raumumgebenden Bauteile über Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung abgeben. Prinzipiell muss die Temperatur des Trägermediums umso höher sein, je kleiner die Heizflächen im Raum sind. Im Sommer kann es zudem notwendig sein, den Räumen Wärme zu entziehen (Kälte bereitzustellen), um eine übermäßige Erhitzung zu vermeiden. In bestehenden Wohngebäuden erfolgt der sommerliche Wärmeschutz allerdings in der Regel über passive Ansätze wie baulichen Sonnenschutz. [Bohne (2022)] Durch die Zunahme von Hitzewellen in den Sommermonaten ist jedoch davon auszugehen, dass auch eine mechanisierte Kühlung von Wohngebäuden in der Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. [BCG (2021)]

Die Luftqualität und damit einhergehend die Zufuhr von Frischluft sowie die Abfuhr von Abluft ist neben der Raumtemperatur für die Behaglichkeit von Personen, die sich in Räumen aufhalten, relevant. Während mechanische Lüftungsanlagen in Nichtwohngebäuden die Regel darstellen, wird im Wohngebäudebestand die Frischluftzufuhr hauptsächlich durch manuelle Fensterlüftung gewährleistet und ist daher nicht mit einem Energiebedarf verbunden. [Bohne (2022)] Im Wohnungsneubau, insbesondere bei hohen energetischen Qualitäten sind mechanisierte Lüftungsanlagen zudem zur Verringerung der Lüftungswärmeverluste mittels Wärmerückgewinnung erforderlich [PHI (2023)]. Hierbei fallen Energiebedarfe für die Ventilatoren sowie eine evtl. Konditionierung (Heizung, Kühlung, Befeuchtung) der Luft an [Laasch/Laasch (2013)].

Neben dem Raumwärmebedarf wird Energie in Wohngebäuden zudem benötigt, um Trinkwasser für eine Vielzahl an Anwendungen der Körperhygiene und Lebensmittelzubereitung zu erwärmen. Dazu muss das Trinkwasser, welches in der Regel kalt an der Gebäude- bzw.

Quartierskante durch die öffentliche Versorgung bereitgestellt wird, auf die benötigten Temperaturen von etwa 35-50 °C erhitzt werden [Laasch/Laasch (2013)]. Während die Raumwärme oft gleichmäßig über den Tag verteilt benötigt wird, ist eine Charakteristik des Trinkwarmwasserbedarfs, dass dieser punktuell bei verschiedenen Zapfvorgängen in dann unterschiedlichen Mengen benötigt wird. Daher wird Warmwasser in Gebäuden oft gespeichert, um es in ausreichender Menge zur Verfügung zu haben. Hierbei ist es jedoch erforderlich das Keimwachstum zu begrenzen, indem das Wasser gemäß DVGW-Arbeitsblatt W551 regelmäßig auf über 60 °C erhitzt bzw. eine Stagnation in Kleinanlagen vermieden wird.

In Abbildung 2-3 (rechts) ist die Einteilung des Wohngebäudebestands in die Effizienzklassen der Energiebedarfsausweise, der den Raumwärme- und Trinkwarmwasserbedarf sowie die Hilfsenergie der Anlagentechnik berücksichtigt, dargestellt. Es zeigt sich, dass immer noch ein signifikanter Anteil der Gebäude, davon eine Vielzahl Ein- und Zweifamilienhäuser [Agora Energiewende (2023)], sehr hohe Energiebedarfe aufweist, die es im Zuge der Transformation des Gebäudebestands zu reduzieren gilt.

Der Anwendungsstrom wird zwar gemäß den normativen Schemata bspw. der DIN V 18599 nicht bei der Berechnung des Endenergiebedarfs berücksichtigt, bedingt jedoch einen wesentlichen Energiebedarf, der in Gebäuden, als Hauptaufenthaltort von Menschen, anfällt. Ein Großteil des menschlichen Lebens ist heutzutage elektrifiziert, woraus sich ein Bedarf an elektrischer Energie für eine Vielzahl von Anwendungen in Wohngebäuden wie Beleuchtung, Haushalts- und Kommunikationsgeräte ergibt.

2.4 Energieversorgungskonzepte von Quartieren

Betrachtet man die in Abbildung 2-4 dargestellte Zusammensetzung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden nach Energieträgern, so wird deutlich, dass ein Großteil heute noch über die fossilen Energieträger Gas und Öl (50 % bzw. 25 % der Wohnungen) durch im Gebäude befindliche Heizkessel gedeckt wird. In den vergangenen Jahren wurde durch den vermehrten Einbau von Wärmepumpen sowie die Nutzung von Solarthermie und Pellet- oder Holzkesseln der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeerzeugung gesteigert, liegt jedoch über den Gesamtgebäudebestand betrachtet nur bei 3 % (Wärmepumpen) bzw. 22 % (erneuerbare Energien). [Agora Energiewende (2023)]

Neben der dezentralen Wärmeversorgung eines jeden Einzelgebäudes besteht auch die Möglichkeit, dass die Gebäude im Quartier über eine vernetzte Infrastruktur mit Wärme versorgt werden. Eine solche Wärmeversorgung haben derzeit 13 % der Wohnungen [Agora Energiewende (2023)]. Dies kann entweder durch den Anschluss an ein größeres Wärmenetz auf Ebene eines Stadtteils oder einer Stadt (im Rahmen dieser Arbeit als „Fernwärme“ bezeichnet) oder über ein lediglich das betrachtete Quartier versorgendes

Netz erfolgen. Für ein Wärmenetz sind zentrale Wärmeerzeugungsanlagen und Pumpstationen sowie ein Leitungsnetz zur Verteilung der Wärme und Anlagen für die Übergabe der Wärme an die Gebäude (Wärmeübergabestationen) notwendig. [Quaschnig (2016)]

Die Wärmenetze werden in der Literatur in der Regel in verschiedene Generationen eingeteilt, die sich hauptsächlich über die im Netz herrschenden Temperaturniveaus des Vor- und Rücklaufs definieren. Je niedriger die Temperaturniveaus sind, desto geringer fallen die Wärmeverluste im Netz aus und desto leichter können Wärmeerzeuger auf Basis von erneuerbaren Energiequellen wie Geothermie oder Solarthermie eingebunden werden. Gleichzeitig bedingen niedrige Netztemperaturen aber auch entsprechende Systeme in den Gebäuden, welche diese Temperaturniveaus für die Raumwärmebereitstellung nutzen können. [Lund et al. (2021)]

Betrachtet man die Zusammensetzung der Energieträger, die zur Wärmeerzeugung in den Bestandwärmenetzen zum Einsatz kommen, so zeigt sich auch dort eine Dominanz des Erdgases (43 %). Zudem ist die Kohle ein wichtiger Energieträger (21 %) der jedoch seit einigen Jahren zunehmend durch erneuerbare Energieträger substituiert wird (22 %). Hauptsächlich wird die Wärme über Kraft-Wärme-gekoppelte (KWK) Anlagen erzeugt, mit denen gleichzeitig Wärme und Strom generiert werden. [Agora Energiewende (2023)]

Neben dem Einsatz von KWK-Anlagen kann über Photovoltaik (PV)-Anlagen dezentral im Quartier Strom aus Solarenergie erzeugt werden. Durch den zusätzlichen Einsatz elektrischer Wärmepumpen für die Erzeugung der Wärmeenergie, gelingt es die Wärmeversorgung komplett zu elektrifizieren und damit die Sektoren Strom und Wärme zu koppeln. [Quaschnig (2016)] Durch eine Hinzunahme der Elektromobilität ließe sich zudem der Verkehrssektor in solche Quartierskonzepte integrieren, was jedoch über den Fokus dieser Arbeit hinaus geht (siehe Kapitel 5.2).

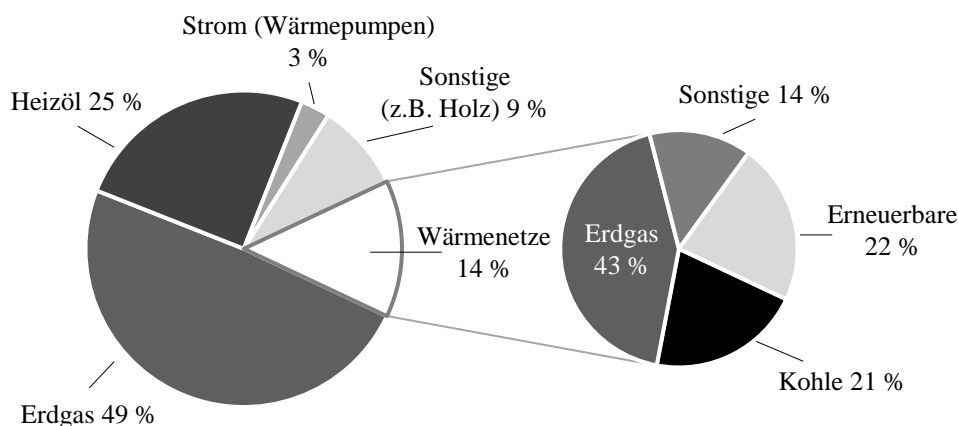


Abbildung 2-4: Anteil der Energieträger an der Wärmeerzeugung in Wohngebäuden 2022 [Agora Energiewende (2023)]

2.5 Modellierung des Energiebedarfs und der Energieversorgung von Quartieren

2.5.1 Klassifizierung von Energiebedarfsmodellen

Allgemein können die einzelnen Nutzenergiebedarfe, die in Kapitel 2.3 vorgestellt wurden, als Funktionen mehrerer Einflussparameter beschrieben werden. Der Raumwärmebedarf ergibt sich über eine Raumbilanz. Dabei sind die Wärmesenken im Raum wie Lüftungs- oder Transmissionswärmeverluste über die Gebäudehülle den Wärmequellen wie internen Wärmegewinnen von Personen oder Geräten sowie solarer Wärmeeinstrahlung gegenüberzustellen. Zusätzlich ist die Interaktion mit benachbarten Räumen zu beachten, sowie etwaige Wärmespeicherfunktionen der Bauteile und Innenausbauten. Der Nutzenergiebedarf für Trinkwarmwasser sowie der Anwendungsstrombedarf sind überwiegend vom Nutzerverhalten abhängig. [Loga et al. (2021)]

Der Endenergiebedarf eines Gebäudes ist als Summe der Raumwärmebedarfe, des Trinkwarmwasserbedarfs und des Anwendungsstrombedarfs sowie der Hilfsenergie, die zur Deckung des Bedarfs sowie zum Ausgleich dabei entstehender Speicher-, Verteil- und Umwandlungsverluste erforderlich sind, neben den bisher genannten Parametern auch von der Anlagentechnik abhängig. Der Endenergiebedarf des Quartiers wiederum ist die Summe der Gebäudebedarfe und hängt im Falle einer gemeinsamen Versorgung zudem von den Beschaffenheiten des Versorgungsnetzes wie Leitungslängen und -durchmessern sowie den thermischen Eigenschaften ab. Formal könnte der Energiebedarf eines Quartiers $Q_{f, \text{Quartier}}$ demnach als Funktion der Eingangsparameter gemäß Gl. 2-1 dargestellt werden.

$$Q_{f, \text{Quartier}} = Q_f \left(\begin{array}{l} \text{Standort, Netzparameter, Anlagentechnik Quartier,} \\ \sum_{\text{Gebäude}} \begin{array}{l} \text{Geometrie, energetische Qualität der Hüllflächen,} \\ \text{Nutzerverhalten, Anlagentechnik} \end{array} \end{array} \right) \quad \text{Gl. 2-1}$$

Die Beschreibung der dargestellten Systemzusammenhänge in Form eines Modells ist komplex. Es gibt daher mehrere Arten, um den Energiebedarf von Gebäuden im Allgemeinen und Quartieren im Speziellen abzubilden. Prinzipiell lassen sich dabei statisch-normative Verfahren, dynamische Simulationsmodelle und statistische Modelle unterscheiden. Zudem kann zwischen Bottom-up Modellen, die den Energiebedarf über die einzelnen, ihn bedingenden Systemkomponenten beschreiben, und Top-down Ansätzen, welche von aggregierten (Verbrauchs-)Daten des Gesamtbestands ausgehend die Bedarfe für kleinere Untersuchungsgegenstände ableiten, differenziert werden. [Langevin et al. (2020)]

Statisch-normative Verfahren finden ihre Anwendung insbesondere in der ordnungsrechtlich geforderten Nachweisführung des GEG, welches ab 2024 die ausschließliche Verwendung des Monatsbilanzverfahrens der DIN V 18599 zur Berechnung der Gebäudeenergiebedarfe vorschreibt (siehe Kapitel 2.1.2). Bei diesem Monatsbilanz-

verfahren wird eine Bilanz aus Wärmesenken und -quellen für jede Gebäudezone gebildet, aus der sich der monatliche Raumwärmebedarf ergibt. Unter Hinzurechnung eines Pauschalwertes für den Trinkwarmwasserbedarf ergibt sich der Endenergiebedarf über eine Multiplikation mit einer Anlagenkennzahl. Die Berechnungen basieren auf normativen Annahmen für die Eingangsparameter, insbesondere zur Abbildung des Nutzerverhaltens, welche die realen Begebenheiten oft nicht akkurat abbilden. Der normberechnete Energiebedarf weicht daher teils signifikant vom gemessenen Energieverbrauch der Gebäude ab [Sunikka-Blank/Galvin (2012); Loga et al. (2019)]. Zudem besteht die Problematik, dass die hohe Fluktuation insbesondere in der Stromerzeugung aus Photovoltaik in der monatlichen Bilanzbildung nicht adäquat abgebildet werden kann und somit bspw. Eigennutzungsanteile nicht korrekt berechnet werden können [Müller et al. (2021)].

Daher stehen neben den statischen Verfahren Modelle zur Verfügung, die mit einer höheren zeitlichen Auflösung arbeiten und zudem deutlich mehr Möglichkeiten zur Abbildung der komplexen Systemzusammenhänge liefern. Statistische oder datengetriebene Verfahren arbeiten in der Regel mit Regressionsmodellen oder Maschinellen Lernen. Hierzu werden vorhandene Verbrauchsdaten eines Gebäudebestands verwendet, um die Modelle zu entwickeln, anhand derer zukünftige Szenarien untersucht werden können. Diese Form der Modellbildung wird insbesondere für große Gebäudebestände verwendet, deren physikalische Parameter oft unbekannt sind. [Wong et al. (2021)]

Eine weitere Gruppe von Modellen zur Ermittlung der Energiebedarfe von Gebäuden und Quartieren sind Ingenieurmodelle, im Englischen allgemein als *building energy models (BEM)* oder *urban/district energy models (UBEM)* für den Quartiersmaßstab bezeichnet. Im Deutschen wird der Begriff der dynamischen Gebäudesimulationsmodelle verwendet. Diese machen die Zusammenhänge aus Gl. 2-1 mathematisch beschreibbar. Grundlage sind jedoch Annahmen zu allen den Energiebedarf bedingenden Parameter. Die Modelle werden hauptsächlich auf räumlich kleineren Ebenen bis zum Quartier für technische Untersuchungen eingesetzt und über computergestützte Simulationen ausgeführt. [Wong et al. (2021)]

In der Literatur herrscht ein gewisser Konsens, dass sich dynamische Simulationsmodelle sehr gut zur Abbildung der Gebäude- und Quartiersenergiebedarfe eignen, wenn Untersuchungen zu verschiedenen Sanierungs- oder Versorgungskonzepten durchgeführt werden [bspw. Swan/Ugursal (2009); Wong et al. (2021); Ali et al. (2021); Reinhart/Cerezo Davila (2016)]. Da dies der Gegenstand dieser Arbeit ist, wird im Folgenden der Fokus auf die Beschreibung dieser Form der Energiebedarfsmodellierung gelegt. Dazu werden zunächst die Grundlagen der dynamischen Simulation erläutert und eine Übersicht über in der Literatur vorhandenen Modelle sowie zu den Schwächen, welche diese noch aufweisen, gegeben.

2.5.2 Grundlagen der dynamischen Gebäudesimulation

Die Verwendung von Computermodellen zur Abbildung des thermischen Verhaltens von Gebäuden und damit einhergehend zur Berechnung der Energiebedarfe von Gebäuden wird bereits seit mehreren Jahrzehnten praktiziert [Feist (1994)]. Dabei werden in der Regel differentiell-algebraische Gleichungssysteme zur Beschreibung der instationären physikalischen Zusammenhänge für den Wärmetransport und Luftwechsel sowie für die Funktionsweise von Komponenten der Anlagentechnik aufgestellt. Die Gebäude können dabei entweder als 1-Zonenmodell definiert sein oder aus mehreren Zonen bzw. Räumen aufgebaut werden, deren Interaktion Berücksichtigung findet. [Wetter et al. (2016)] Zur Lösung dieser Gleichungssysteme sind numerische Lösungsverfahren erforderlich [Brown et al. (1998)].

Auf dem Markt sind mehrere kommerzielle Simulationsprogramme wie „TRNSYS“, „IDA ICE“ oder „ETU Simulation“ verfügbar, die auch in der Planungspraxis für die Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden eingesetzt werden. Die Programme können die Gebäude als Multizonenmodelle sehr detailliert abbilden und verfügen über eine breite Basis an bereits implementierten Komponenten für verschiedene Anlagenkonzepte. Zudem wurde am Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden die mehr auf den Forschungskontext ausgerichtete Simulationsumgebung „NANDRAD“ entwickelt, welche frei zugänglich verwendbar ist. [Nouri et al. (2020)]

In der Forschung wird zudem die Verwendung von Modelica, einer gleichungsbasierten und objektorientierten Programmiersprache, immer populärer, indem über mehrere Forschungsinitiativen versucht wird eine einheitliche Grundlage von Modellkomponenten für zukünftige Vorhaben zu schaffen, die dann als Open Source zur Verfügung gestellt werden. Hier sind insbesondere das Forschungsvorhaben der Internationalen Energieagentur (IEA) „Annex 60“ und das darauffolgende Vorhaben der International Building Performance Simulation Association (IBPSA) „Project 1“ zu nennen. In diesen wird eine Bibliothek relevanter Modellkomponenten sowohl auf Gebäude- als auch explizit auf Quartiersebene, die „IBPSA“ Bibliothek, fortlaufend entwickelt. Aufbauend auf dieser Bibliothek wurden weitere Bibliotheken zu verschiedenen spezialisierteren Anwendungsfällen entwickelt („Aixlib“ der RWTH Aachen, „Buildings“ des LBNL Berkley, „Building-Systems“ der UdK Berlin sowie „IDEAS“ der KU Leuven). [Wetter/van Treeck (2017); Wetter et al. (2019)]

Ein wichtiger Aspekt der Verwendung von Simulationsprogrammen ist deren Validierung für den jeweiligen Anwendungsfall. Im Forschungsprojekt „SimQuality“ wurden Anforderungen an Simulationsprogramme zusammengestellt und ein neues Validierungsverfahren erarbeitet, welches auf die hier vorgestellten Programme angewandt wurde. Es zeigt sich, dass alle Programme für die Ermittlung von Gebäudeenergiebedarfen und mit Einschränkungen auch für Quartiere geeignet sind. [Grunewald et al. (2022)]

2.5.3 Dynamische Quartiersbedarfsmodelle

In den voranstehenden Abschnitten wurden die Modellierungsarten zur Abbildung von Gebäudeenergiebedarfen klassifiziert und die Grundlagen der dynamischen Energiebedarfsmodellierung vorgestellt. In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl von Quartiersbedarfsmodellen entwickelt, die dynamische Simulationen verwenden. Namentlich seien hier insbesondere „CitySim“ [Robinson et al. (2009)], als eines der ersten Modelle, sowie „URBANopt“ [El Kontar et al. (2020)] oder „TEASER“ [Remmen et al. (2018)] als Vertreter neuerer Modellarten genannt. Den Modellen ist gemein, dass die Gebäude durch vereinfachte Widerstandsmodelle abgebildet werden, um Rechenkapazität zu sparen [Ferrando et al. (2020)]. Da in den vergangenen Jahren bereits ausführliche Vergleichs- und Übersichtsstudien zu den existierenden Modellen durchgeführt wurden [bspw. Swan/Ugursal (2009); Ferrari et al. (2019); Ferrando et al. (2020); Ali et al. (2021); Malhotra et al. (2022)], wird an dieser Stelle auf eine genauere Beschreibung der einzelnen Modelle verzichtet.

Zu beachten ist die nicht ganz einheitliche Definition der Quartiersdimension. In der Literatur erfolgt oft nur eine Unterscheidung zwischen der Ebene der Einzelgebäude (BEM) und der Ebene der Stadtenergiemodelle (UBEM). Bei der Betrachtung einer ganzen Stadtebene werden die einzelnen Gebäude aufgrund rechenkapazitativer Überlegungen oft nur in reduziertem Umfang modelliert. Der Fokus der Analysen liegt hier in Politikmaßnahmen zur Transformation großer Gebäudebestände oder zur Wärmenetzplanung. Für die in dieser Arbeit definierte Betrachtungsebene des Quartiers zur Untersuchung möglicher Sanierungs- und Versorgungsvarianten werden jedoch eher komplexere Modellierungen der Quartierskomponenten verwendet. [Ferrando et al. (2020)]

Malhotra et al. (2022) sowie Ferrando et al. (2020) kommen zu dem Schluss, dass ein großes Problem bestehender Quartiers- und Stadtenergiemodellen die fehlende Reproduzierbarkeit sowie fehlende Standardverfahren bzw. Datensets zur Validierung der Modelle sind. Als weiteres Problem identifizieren Swan/Ugursal (2009) und Ali et al. (2021) die fehlende Berücksichtigung von Unsicherheiten und insbesondere die Abbildung des unsicheren Nutzerverhaltens. Das folgende Kapitel gibt daher, nach einer Einführung in die relevanten mathematischen Grundlagen zu Unsicherheiten und den Methoden zu deren Quantifizierung, eine Übersicht über die Unsicherheiten, die den Energiebedarfen von Quartieren zugrunde liegen.

3 ANALYSE VON UNSICHERHEITEN AUF DEN ENERGIEBEDARF VON QUARTIEREN

3.1 Einführung in mathematische Grundlagen der Stochastik

3.1.1 Unsicherheitsbegriff

Das mathematische Teilgebiet der Stochastik befasst sich mit der mathematischen Beschreibung des Zufalls und von Unsicherheiten über Wahrscheinlichkeiten. Eine Wahrscheinlichkeit beschreibt dabei allgemein, wie oft ein bestimmtes Ereignis aus der Gesamtheit der möglichen Ereignisse eintritt. In der Literatur haben sich mehrere Ansätze entwickelt, mit denen der Charakter von Unsicherheiten beschrieben wird. Am weitesten verbreitet ist die Unterscheidung zwischen *aleatorischen* und *epistemischen* Unsicherheiten, die früher auch Typ A oder stochastische Unsicherheiten und Typ B oder subjektive Unsicherheiten genannt wurden. [Helton (1997); Hoffman/Hammonds (1994)]

Aleatorische Unsicherheiten beschreiben die einem Prozess oder System innewohnenden Unsicherheiten, die auch mit einer genaueren Beschreibung des Prozesses nicht verringert werden können. Ein prominentes Beispiel ist das Werfen eines Würfels, dessen Ausgang stets dem Zufall überlassen ist. Ein weiteres Beispiel im Kontext dieser Arbeit sind Materialparameter von Baustoffen oder Wetterereignisse, die zwar beschreibbar aber inhärent unsicher sind. [Helton (1997); Holický (2013)]

Epistemische Unsicherheiten hingegen resultieren aus einem Mangel an Wissen über ein System oder einen Prozess. Sie lassen sich durch Informationen verringern, und hängen daher mit dem subjektiven Kenntnisstand der jeweiligen Betrachtenden zusammen. Ein Beispiel ist ein Wirkungsgrad eines Wärmeerzeugers oder geometrische Parameter von Gebäuden, die durch Messungen bestimmt werden können. Auch Unsicherheiten, die durch die Verwendung von Modellen zur Abbildung von realen Prozessen entstehen, können als epistemisch bezeichnet werden. [Helton (1997); Swiler et al. (2009)]

Darüber hinaus erweitern Engelhardt et al. (2011) den Unsicherheitsbegriff um *unbekannte Unsicherheiten*. Bei diesen Unsicherheiten ist keine Beschreibung über einem System zu-grundliegende Wahrscheinlichkeiten möglich, da der derzeitige Informationsstand dazu nicht ausreicht. Dies kann am Anfang eines Planungsprozesses der Fall sein oder bei generellen Betrachtungen von zukünftigen Ereignissen. Diese Form der Unsicherheit wird im Kontext von Energiebedarfsmodellen teilweise auch als *Szenariounsicherheit* (siehe Kapitel 3.6) sowie im Rahmen von Entscheidungsproblemen als *Ungewissheit* bezeichnet (siehe Kapitel 4.1.2).

3.1.2 Abbildung stochastischer Prozesse mit Zufallsvariablen

In der Stochastik können sogenannte Zufallsvariablen verwendet werden, um Prozesse abzubilden, die den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Unsicherheiten unterliegen [Holický (2013)]. Mögliche Werte, die eine Zufallsvariable X annehmen kann, werden als Realisierungen x bezeichnet. Zufallsvariablen lassen sich mit ihrer (kumulierten) Verteilungsfunktion gemäß Gl. 3-1 beschreiben. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsvariable mindestens den Wert x annimmt.

$$F(x) = \text{Prob}(X \leq x) \quad \text{Gl. 3-1}$$

Handelt es sich um eine diskrete Zufallsvariable, so existiert eine endliche Anzahl an Realisierungen, für die jeweils eine Wahrscheinlichkeit $\text{Prob}(X = x)$ angegeben werden kann. Für stetige Zufallsvariablen mit einer unendlichen Anzahl an möglichen Realisierungen ist die Wahrscheinlichkeit $\text{Prob}(X = x) = 0$. Stattdessen wird hier die Dichtefunktion $f(x)$ verwendet, die gemäß Gl. 3-2 die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dass X einen Wert im Intervall $[a, b]$ annimmt.

$$\text{Prob}(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad \text{Gl. 3-2}$$

Die kumulierte Verteilungsfunktion einer stetigen Zufallsvariable kann entsprechend gemäß Gl. 3-3 aus der Dichtefunktion berechnet werden.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(\tau) d\tau \quad \text{Gl. 3-3}$$

Zudem lässt sich die sogenannte inverse Verteilungsfunktion gemäß Gl. 3-4 bilden. Mit dieser können die als Quantile bezeichneten Werte berechnet werden, die angeben, welcher Wert von x mindestens mit der Wahrscheinlichkeit y nicht überschritten wird. Diese Funktionen werden oft im Rahmen einer programmtechnisch ausgeführten Zufallszahlgenerierung zur Transformation einer gleichverteilten Zufallsvariable in eine Variable mit einer der in Kapitel 3.1.3 vorgestellten Verteilungsfunktionen verwendet (siehe Kapitel 3.2.2).

$$F^{-1}(y) = F^{-1}(Y \leq y) \quad \text{für } y \in [0; 1] \quad \text{Gl. 3-4}$$

Eine Zufallsvariable lässt sich zudem über ihren Erwartungswert μ gemäß Gl. 3-5 sowie die Varianz σ^2 gemäß Gl. 3-6 beschreiben. Die Wurzel der Varianz wird Standardabweichung σ genannt. Der Variationskoeffizient (CoV) bildet sich aus dem Quotienten der Standardabweichung und dem Mittelwert gemäß Gl. 3-7.

$$E(X) = \mu = \int_{-\infty}^{\infty} x * f(x) dx \quad \text{Gl. 3-5}$$

$$\text{Var}(X) = E[(X - E(X))^2] = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 * f(x) dx \quad \text{Gl. 3-6}$$

$$\text{VarK}(X) = \frac{\sqrt{\text{Var}(X)}}{E(X)} = v = \frac{\sigma}{\mu} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Um die Beziehung zweier Zufallsvariablen X und Y zu beschreiben, kann der Korrelationskoeffizient ρ_{XY} aus der Kovarianz $\text{Cov}(X, Y)$ gemäß Gl. 3-8 berechnet werden. Sind zwei Variablen stochastisch unabhängig, beträgt $\rho_{XY} = 0$. Bei perfekter (linearer) Korrelation gilt $\rho_{XY} = \pm 1$.

$$\rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X * \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X * \sigma_Y} \in [0, 1] \quad \text{Gl. 3-8}$$

Liegt von einer Zufallsvariable eine Stichprobe von N Realisierungen vor, so lassen sich damit das Stichprobenmittel \bar{x} gemäß Gl. 3-9 sowie die empirische Varianz s^2 gemäß Gl. 3-10 berechnen, die in der Regel verwendet werden, um den in der Realität nicht beobachtbaren Mittelwert und die Standardabweichung zu schätzen. Zudem kann der empirische CoV c_v als Quotient aus der empirischen Standardabweichung und dem Stichprobenmittel gemäß Gl. 3-11 gebildet werden.

$$\bar{x} = \sum_{n=1}^N x_n \quad \text{Gl. 3-9}$$

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2 \quad \text{Gl. 3-10}$$

$$c_v = \frac{s}{\bar{x}} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Eine beliebige Darstellungsform für die Realisierungen einer Stichprobe sind Histogramme oder Boxplots. Bei einem Histogramm, siehe Abbildung 3-1 (links), wird der Wertebereich der Realisierungen in Klassen aufgeteilt, für die jeweils die relativen Häufigkeiten (Wahrscheinlichkeiten) der innerhalb der Klassen liegenden Realisierungen in Form von Balkendiagrammen dargestellt werden. Ein Boxplot stellt die empirischen Quantile x_p der Stichprobe dar. Dabei wird der Bereich zwischen dem 25 %- und dem 75 %-Quantil ($x_{0,25}$ und $x_{0,75}$) als Rechteck (Box) dargestellt, siehe Abbildung 3-1 (rechts). Zudem ist das 50 %-Quantil $x_{0,5}$, welches auch als Median bezeichnet wird, innerhalb des Rechtecks markiert. Die Werte des Minimums und des Maximums sind in Form von Antennen (sog. Whiskern) dargestellt. Die Länge der Whisker wird oft auf $1,5 * (x_{0,75} - x_{0,25})$ begrenzt. Extreme Werte außerhalb der Whisker werden als einzelne Punkte dargestellt, um den Charakter als Ausreißer darzustellen. [Lange/Mosler (2017)]

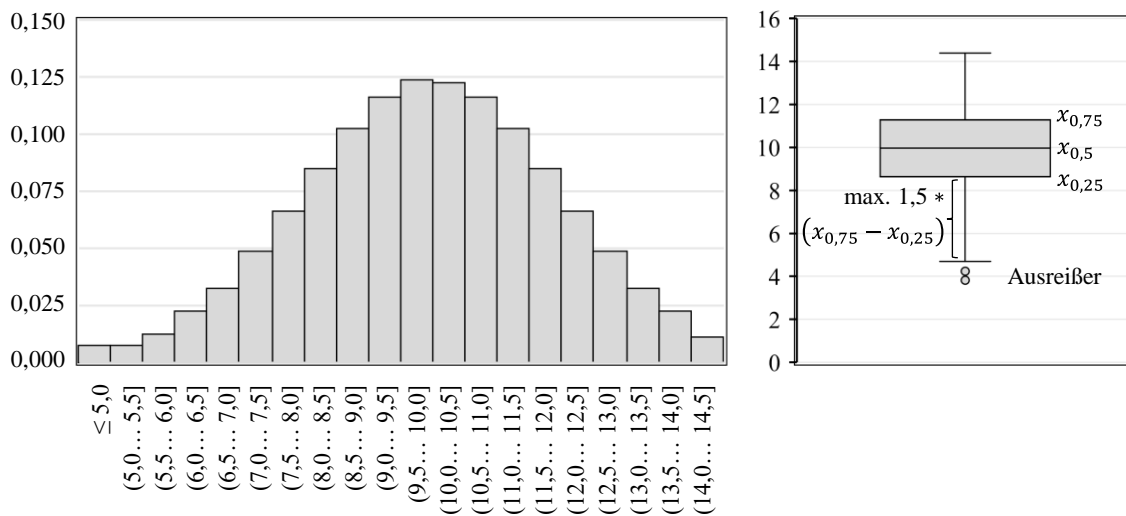


Abbildung 3-1: Darstellungsformen für Realisationen einer exemplarischen Stichprobe: Histogramm (links) und Boxplot (rechts)

3.1.3 Funktionen ausgewählter stetiger Zufallsvariablen

3.1.3.1 Normalverteilung

Eine der am häufigsten verwendeten Verteilungen zur Abbildung von Zufallsprozessen ist die Normalverteilung. Gemäß dem zentralen Grenzwertsatz konvergiert die Summe von N unabhängigen Zufallsvariablen für $N \rightarrow \infty$ zu einer Normalverteilung [Forbes et al. (2011)]. Die Dichtefunktion und kumulierte Verteilungsfunktion einer normalverteilten Zufallsvariable $X \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$ mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ berechnen sich gemäß Gl. 3-12, respektive Gl. 3-13. Der Sonderfall $\mathcal{N}(0,1)$ wird Standard-Normalverteilung genannt. Die Normalverteilung ist symmetrisch um den Mittelwert sowie zu beiden Seiten unbegrenzt. [Forbes et al. (2011)]

$$f(x) = f(X = x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} * e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad \text{für } x \in \mathbb{R} \quad \text{Gl. 3-12}$$

$$F(x) = F(X \leq x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right) \quad \text{für } x \in \mathbb{R} \quad \text{Gl. 3-13}$$

$$\text{mit } \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\tau^2} d\tau$$

3.1.3.2 Begrenzte Normalverteilung

Eine Sonderform der Normalverteilung ist die abgeschnittene Normalverteilung (engl. *truncated normal distribution*) mit der Begrenzung des Definitionsbereichs der normalverteilten Zufallsvariable $Y \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$ auf das Intervall $[a, b]$. Die Dichtefunktion einer begrenzt normalverteilten Zufallsvariable $X \sim \mathcal{TN}(\mu, \sigma, a, b)$ berechnet sich gemäß Gl. 3-14 aus der Dichtefunktion der Normalverteilung $f_N(x)$ und den Werten der kumulierten Verteilungsfunktion an den Stellen a und b . [Forbes et al. (2011)]

$$f(x) = \frac{f_N(x)}{F_N(b) - F_N(a)} \quad \text{für } x \in [a, b] \quad \text{Gl. 3-14}$$

3.1.3.3 Log-Normalverteilung

Die Log-Normalverteilung kann zur Beschreibung von Zufallsvariablen verwendet werden, welche auf einen nicht-negativen Definitionsbereich beschränkt sind. Die Transformation $Y = \ln(X)$ einer Log-normalverteilten Zufallsvariable $X \sim \mathcal{LN}(\mu, \sigma)$ ist dabei normalverteilt $Y \sim \mathcal{N}$. Ihre Dichtefunktion berechnet sich wie in Gl. 3-15 beschrieben. Gemäß dem zentralen Grenzwertsatz konvergiert das Produkt von N unabhängigen Zufallsvariablen gleichen Verteilungstyps für $N \rightarrow \infty$ gegen eine Log-Normalverteilung. [Forbes et al. (2011)]

$$f(x) = f(X = x) = \frac{1}{x\sigma^2\sqrt{2\pi}} * e^{\left(-\frac{\log(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad \text{für } x \in \mathbb{R}_0^+ \quad \text{Gl. 3-15}$$

3.1.3.4 Trapezverteilung

Die Trapezverteilung lässt sich durch vier Parameter $a \leq b \leq c \leq d$ beschreiben. Sie wird durch einen gleichverteilten Bereich im Intervall $[c, d]$ sowie zwei dreieckverteilte Bereiche $[a, c]$ und $[d, b]$ charakterisiert. Die Trapezverteilung kann durch eine entsprechende Auswahl der Parameter a, b, c und d in eine reine Gleichverteilung oder eine Dreiecksverteilung überführt werden und stellt somit eine Verallgemeinerung der beiden dar. Die Dichtefunktion einer trapezverteilten Zufallsvariable $X \sim \mathcal{T}(a, c, d, b)$ ergibt sich gemäß Gl. 3-16. [Kacker/Lawrence (2007)]

$$f(x) = f(X = x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq a \\ \frac{(x - a)}{(c - a)} h & \text{für } a \leq x \leq c \\ h & \text{für } c \leq x \leq d \\ \frac{(b - x)}{(b - d)} h & \text{für } d \leq x \leq b \\ 0 & \text{für } x \geq b \end{cases} \quad \text{Gl. 3-16}$$

$$\text{mit } h = \frac{2}{[(b - a) + (d - c)]}$$

3.1.3.5 Graphische Darstellung der Funktionen

In der folgenden Abbildung 3-2 sind zusammenfassend die Dichte- und Verteilungsfunktionen der beschriebenen Verteilungsformen dargestellt. Alle Verteilungen besitzen einen Mittelwert von $\mu = 1$. Es zeigt sich der rechtsschiefe Charakter der Lognormal-Verteilung im Vergleich zur Normalverteilung. Zudem lassen sich die Auswirkungen der Intervallgrenzen der begrenzten Normalverteilung sowie die stärkere Ausprägung der Grenzbereiche bei der Trapezfunktion erkennen.

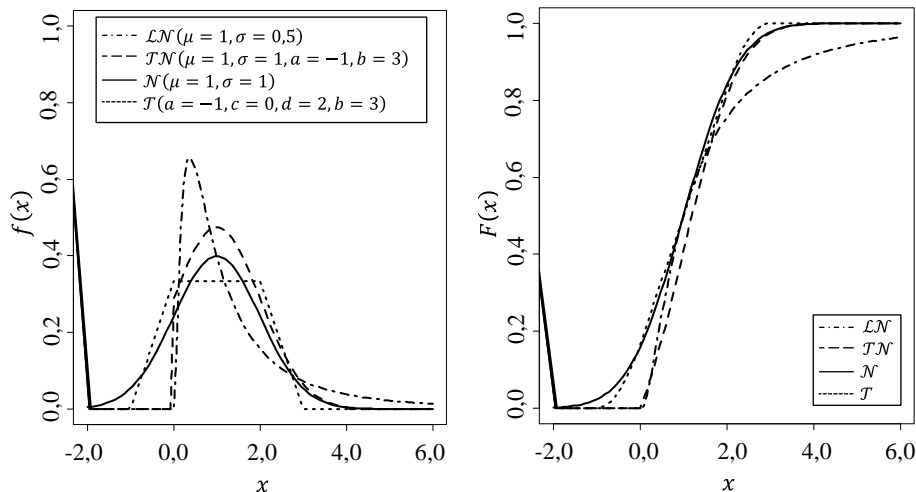


Abbildung 3-2: Graphische Darstellung der Dichte- und Verteilungsfunktionen exemplarischer Zufallsverteilungen

3.2 Methoden zur Charakterisierung und Quantifizierung von Unsicherheiten

3.2.1 Überblick über verschiedene Methoden

In der Literatur wird allgemein bei der Berücksichtigung von Unsicherheiten zwischen Sensitivitätsanalysen und Unsicherheitsanalysen oder -quantifizierung unterschieden. Beides hat zum Ziel die Auswirkungen von Änderungen der Modelleingangsgrößen (sog. Inputparameter) auf die Modellergebnisse (Output) zu untersuchen. Der Fokus bei der *Sensitivitätsanalyse* liegt vermehrt auf der Untersuchung des Einflusses von Änderungen einzelner Parameter auf die Modellergebnisse. Mit einer solchen Analyse lassen sich in der Regel Aussagen darüber treffen, welche Inputparameter den größten Einfluss auf die Modellergebnisse haben und somit besondere Beachtung in ihrer Quantifizierung finden sollten. Bei der *Unsicherheitsquantifizierung* wird die Beschreibung der Ergebnisänderungen stärker in den Vordergrund gestellt. Es geht demnach vordergründig um die Quantifizierung der Unsicherheiten des Modellergebnisses. In der Regel werden Sensitivitätsanalysen weitergehenden Unsicherheitsquantifizierungen vorangestellt, allerdings wird die Terminologie in der Literatur teilweise ambivalent verwendet. Da einige Methoden in beiden Bereichen Anwendung finden, kann nicht immer eine eindeutige Zuordnung einer Methode zum Bereich der Sensitivitätsanalyse oder der Unsicherheitsquantifizierung getroffen werden. [Lomas/Eppel (1992); Burhenne (2013)]

Zur Unsicherheitsquantifizierung können verschiedene Methoden verwendet werden. Tian et al. (2018) unterscheiden in einer Übersichtsstudie dazu zwischen nicht-probabilistischen und probabilistischen Methoden. Letztere lassen sich zudem über die Verwendung einer Zufallszahlgenerierung (engl. *sampling*) differenzieren.

Probabilistische Modelle, die auf einer Zufallszahlgenerierung basieren, bilden die Unsicherheiten der Inputs ab, indem jeder Parameter über eine Zufallsvariable mit definierter Wahrscheinlichkeitsfunktion beschrieben wird. Das Modell selbst wird als Blackbox betrachtet und für eine festgelegte Anzahl an Durchläufen zufallsbasierte Kombinationen der Eingangsparameter ausgewählt, mit denen das deterministische Modell berechnet wird. Die entstehende Variation im Output wird dann zur Abbildung der Unsicherheit verwendet. Zu dieser Methodengruppe gehört die Monte-Carlo Analyse, die in der Literatur am häufigsten in Bezug auf Energiebedarfsmodelle verwendet und als sehr geeignet eingestuft wird. Eine detaillierte Vorstellung erfolgt daher in Kapitel 3.2.2. [Tian et al. (2018); Bednar/Hagentoft (2015)]

Zudem kann die Differenzielle Sensitivitätsanalyse zu dieser Modellgruppe gezählt werden. Hier wird jeweils nur ein Inputparameter um ein bestimmtes Maß variiert während alle anderen Parameter auf ihren Mittel- bzw. Standardwerten belassen werden. Die Sensitivität des Outputs in Bezug auf diesen Parameter ergibt sich als Differenz zwischen dem Output des Modells und einem Basismodell, bei dem alle Parameter ihren „Basiswert“

(z.B. Mittelwert) angenommen haben. Eine totale Sensitivität lässt sich über die einzelnen Sensitivitäten bilden. Diese Methode ist insbesondere für die Verwendung in einer Sensitivitätsanalyse verwendbar, die einer anderen Unsicherheitsquantifizierungsmethode vorgelagert ist. [Lomas/Eppel (1992)]

Probabilistische Methoden ohne Zufallszahlgenerierung versuchen die stochastischen Prozesse mathematisch im Modell abzubilden. Das Modell wird demnach nicht mehr als deterministisch betrachtet, sondern als inhärent stochastisch angesehen. Als beispielhafte Methode sei an dieser Stelle die generalisierte polynomische Chaosmethode genannt, Details können Xiu (2009) entnommen werden.

Nicht-probabilistische Ansätze werden verwendet, wenn keine Informationen zu den zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Inputparameter vorliegen. Bei der Intervallmethode werden obere und untere Grenzwerte für jeden Parameter bestimmt, aus denen sich ein Intervall möglicher Outputs ergibt. Eine andere Methode ist die Nutzung der Fuzzylogik. Hierbei werden für die Parameter Zugehörigkeitsfunktionen (engl. *membership functions*) gebildet. Ein Parameter kann gleichzeitig mehreren Gruppen zugehörig sein, sodass auch unvollständige Informationen abgebildet werden können. [Moens/Vandepitte (2005)]

Neben den vorgestellten Methoden, die die Unsicherheiten in den Modeloutputs quantifizieren, wird auch die Modellkalibrierung gemeinhin als Teilgebiet der Unsicherheitsquantifizierung klassifiziert. Bei dieser werden anhand von Messdaten zum Energieverbrauch Rückschlüsse über unsichere Eingangsparameter gezogen. Im Englischen wird daher auch von *inverse uncertainty quantification* gesprochen. Dies wird häufig über Bayes'sche Statistikmethoden mathematisch umgesetzt, soll jedoch nicht weiter in dieser Arbeit thematisiert werden. [Tian et al. (2018)]

3.2.2 Monte-Carlo Analysen

Bei der Monte-Carlo Analyse handelt es sich um eine probabilistische Methode der Unsicherheitsquantifizierung. Das zu berechnende Modell wird weiterhin deterministisch betrachtet. Die Unsicherheitsquantifizierung erfolgt über die Definition von Zufallsvariablen für die Inputparameter des Modells. Wenn die Summe der Inputparameter als K definiert wird, dann kann die zu jedem Inputparameter $k = 1, \dots, K$ zugehörige Zufallsvariable als X_k bezeichnet werden. Jeder dieser Zufallsvariablen sind ein Wahrscheinlichkeitsfunktionstyp sowie die Funktion beschreibende Parameter zuzuordnen. Im Anschluss wird ein Stichprobenumfang N festgelegt und für jede Stichprobe $n = 1, \dots, N$ eine zufällige Realisierung $x_{k,n}$ der Zufallsvariablen gezogen, die als Eingangsparameter für das deterministische Modell verwendet werden. Für jede dieser Stichproben ergibt sich somit ein Output-Wert. Die Abweichungen des Outputs über den Stichprobenumfang können statistisch ausgewertet werden, um Kennzahlen wie das Stichprobenmittel, die empirische

Varianz oder eine empirische Verteilungsfunktion für die Abbildung des Outputs als Zufallsvariable abzuleiten. [Macdonald/Strachan (2001)]

Die Methodik ist zusammenfassend in Abbildung 3-3 dargestellt. Eine Monte-Carlo Analyse lässt sich demnach in die folgenden Schritte einteilen:

1. Festlegung des Inputparametersatzes und Definition von Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Abbildung der Inputparameter über Zufallsvariablen;
2. Auswahl eines Mechanismus zur Zufallszahlziehung (engl. *sampling*) und Festlegung des Stichprobenumfangs;
3. Für jede Stichprobe: Bestimmung der Realisierungen der Inputvariablen, Verwendung des deterministischen Simulationsmodells für die gegebenen Inputwerte zur Berechnung des Outputs;
4. Statistische Auswertung des Outputs bspw. durch Darstellung eines Histogramms, Berechnung der empirischen Varianz oder Ableitung einer empirischen Verteilungsfunktion. [Helton et al. (2006)]

Für die Festlegung der Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Inputvariablen können physikalische Grenzen, Literaturangaben, Expertenwissen oder Messungen verwendet werden [Burhenne (2013)]. Für die Parameter der Energiebedarfsmodelle, die den Gegenstand dieser Arbeit bilden, wird hierfür eine Zusammenstellung in Kapitel 3.4 vorgenommen.

Der Stichprobenumfang N sollte groß genug gewählt werden, dass die statistischen Ergebnisse für den Output (bspw. Stichprobenmittel und empirische Varianz) möglichst gegen die theoretischen stochastischen Parameter der Zufallsvariablen konvergieren. Da sich die theoretischen Parameter in der Regel nicht bestimmen lassen, werden teilweise andere Konvergenzkriterien verwendet, wie die maximalen Änderungsraten der statistischen Kennwerte zwischen Simulationsläufen. Gleichzeitig steht eine rechenkapazitative Beschränkung einer zu hohen Anzahl an Simulationsläufen entgegen. Insbesondere bei der Verwendung der Monte-Carlo Methodik für die energetische Gebäude- und Quartierssimulation ist dies ein entscheidender Faktor, da hier ein einzelner Simulationslauf oft sehr zeitintensiv ist. [Janssen (2013); Lomas/Eppel (1992)]

Durch eine geeignete Wahl des Mechanismus zur Zufallszahlgenerierung kann der notwendige Stichprobenumfang verringert werden. Für die Ziehung der Zufallszahlen werden in der Regel im Intervall $[0,1)$ gleichverteilte Zufallsvariablen Y_k definiert. Diese werden verwendet, um aus ihren Realisierungen über die inversen Verteilungsfunktionen der Variablen X_k die Realisierungen $x_{k,n}$ gemäß Gl. 3-17 zu ermitteln.

$$x_{k,n} = F^{-1}(y_{k,n}) \quad \text{Gl. 3-17}$$

Zur Ziehung der N Inputvektoren $\mathbf{y}_n = (y_{1,n}, \dots, y_{K,n})$ können pseudo-zufällige oder quasi-zufällige Verfahren Anwendung finden. Die gezogenen Vektoren sollten dabei den

K -dimensionalen Hyperraum möglichst vollständig abbilden. Klassische Pseudo-Zufallszahlgeneratoren können dies oft nicht gewährleisten. [Simpson et al. (2001)] Daher wurde die Methode des *Latin Hypercube Samplings* (LHS) entwickelt. Hier sind die Realisierungen der Zufallsvariablen so verteilt, dass jede Kombination aus dem in $K * N$ Teilstücke geteilten Hyperraum genau einmal vertreten ist. [McKay et al. (1979)] Eine weitere Art der Zufallszahlgenerierung stellt die Nutzung von quasi-zufälligen Zahlenreihen wie der *Helton-* oder *Sobol-Sequenz* dar. Die von Sobol/Levitani (1999) entwickelten Sobol-Sequenzen erzeugen dabei einen besonderen Latin Hypercube und haben in ihrer Anwendung bereits überzeugende Ergebnisse im Hinblick auf eine schnelle Konvergenz der Monte-Carlo Analysen geliefert [Burhenne (2013)].

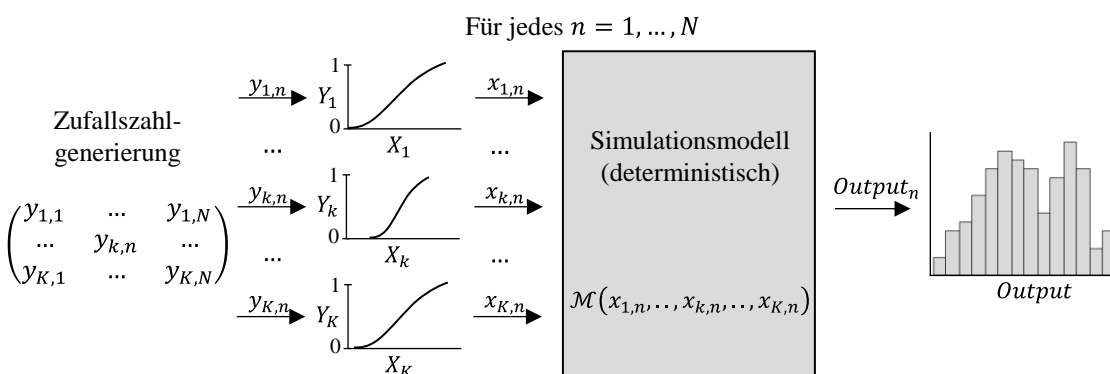


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Monte-Carlo Analyse

3.3 Arten von Unsicherheiten in Energiebedarfsmodellen

In der Literatur werden verschiedene Arten der Unsicherheiten, mit welchen Energiebedarfsmodelle behaftet sind, unterschieden. Allgemein können die drei Arten Parameterstreuungen, Modellunsicherheiten und Szenariungewissheiten abgegrenzt werden [Tian et al. (2018)]. Die *Parameterstreuungen* beinhalten sowohl die epistemischen Unsicherheiten, die durch unbekannte Attribute der Parameter im Planungsprozess (Spezifizierungsunsicherheiten) oder im Bestand aufgrund fehlender Messdaten entstehen, als auch die aleatorischen Unsicherheiten bspw. aus den Parametern des Nutzerverhaltens [de Wit (2003)]. Zur Quantifizierung der Unsicherheiten der Parameter können physikalische Grenzen, Literaturangaben, Expertenwissen oder Messungen verwendet werden [Burhenne (2013)]. Die *Modellunsicherheiten* resultieren zum einen aus den Modellvereinfachungen, die getroffen werden, um die Realität abzubilden und zum anderen aus den numerischen Lösungsverfahren, die zur Berechnung der Modelle verwendet werden [de Wit (2003)]. Die Definition der *Szenariungewissheiten* ist in der Literatur nicht einheitlich. Allgemein beschreiben diese durch externe Faktoren außerhalb der Gebäude aufgetragene Unsicherheiten. Beispielsweise können dies klimatische Randbedingungen sein, die sich alternativ auch als Parameterstreuung deklariert lassen. Zudem

werden mögliche Veränderungen über die Zeit in der Regel zu den Szenariounsicherheiten gezählt. [Tian et al. (2018)]

In Tabelle 3-1 sind die verschiedenen Arten der Unsicherheiten zusammengefasst. Diese werden in den folgenden Kapiteln detaillierter beschrieben. Der Fokus liegt auf Energiebedarfsmodellen bereits bestehender Gebäude, für die gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit (siehe Kapitel 1.2) verschiedene Sanierungskonzepte untersucht werden sollen.

Tabelle 3-1: Überblick über die Arten der Unsicherheit von Energiebedarfsmodellen

Unsicherheitsform		Beispiele	weiterführende Beschreibung
Parameterstreuungen	Geometrieparameter	Abmessungen, Orientierungen	Kap. 3.4.1
	Parameter der Gebäudehülle	Wärmedurchgangskoeffizienten, Wärmebrücken, Infiltration	Kap. 3.4.2
	Nutzerverhalten	Raumtemperaturen, Lüftungsverhalten, interne Wärmegevinne, Anwendungsstrombedarf	Kap. 3.4.3
	Anlagentechnik	Wirkungsgrade, Verteilverluste	Kap. 3.4.4
	Standortparameter	Klimarandbedingungen, Verschattungen, Bodenparameter	Kap. 3.4.5
Modellunsicherheit	Numerische Unsicherheit	Verwendeter Lösungsalgorithmus	Kap. 3.5
	Modellvereinfachungen	Zonierung, Modellierung physikalischer Phänomene	
Szenario- ungewissheit	Externe Einflüsse	Klimaänderungen, ökonomische Randbedingungen	Kap. 3.6
	Zeitliche Veränderungen		

3.4 Streuungen der Eingangsparameter

3.4.1 Geometrieparameter

Für bestehende Gebäude ist die Geometrie durch die Bausubstanz definiert. Die Unsicherheiten bezüglich der Geometrieparameter wie Längen, Höhen, Winkel und Ausrichtungen sind demnach als epistemisch einzuordnen und resultieren aus fehlenden Informationen. Sind Planunterlagen vorhanden, so kann davon ausgegangen werden, dass sich die tatsächlichen Geometriemaße im Bereich der im Bau üblichen Toleranzen bewegen. Diese Toleranzen werden bspw. in der DIN 18202 für den Hochbau festgelegt. Die Geometriemaße können auch vor Ort über Messungen ermittelt werden. Hiermit lassen sich die Unsicherheiten auf die Messungenauigkeiten reduzieren.

Gerade bei größeren, älteren Gebäudebeständen in einem Quartier liegen häufig keine oder nur unvollständige Planunterlagen vor und eine detaillierte Aufnahme vor Ort stellt einen zu hohen zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand dar [Loga et al. (2021)]. In der Literatur existieren daher zwei Verfahren zur alternativen Ermittlung der Geometrieparameter, welche wiederum Unsicherheiten bedingen. Zum einen werden Geoinformationsdaten zur

Ableitung der relevanten unbekannt Parameter verwendet. Hier verbleiben Unsicherheiten in Abhängigkeit von in den Geodaten enthaltenen Informationen. [Malhotra et al. (2020)]

Zum anderen werden Typ- oder Referenzgebäudemodelle zur Abbildung realer Gebäude verwendet. Diese Gebäudemodelle sollen als mittleres Abbild einer Gruppe von Gebäuden dienen. Über eine kurze Ortsbegehung oder eine Abfrage einiger trivialer Parameter lässt sich eine solche Zuordnung durch Experten vornehmen. Die Unsicherheiten resultieren dann aus den geometrischen Abweichungen der realen Gebäude zu den Typgebäuden. [Gholami et al. (2021)] In der Literatur wurden eine Vielzahl von Gebäudetypologien erstellt, die zur Abbildung der Geometrien verwendet werden können, gute Zusammenstellungen finden sich in Carnieletto et al. (2021) sowie in Ali et al. (2019).

3.4.2 Parameter der Gebäudehülle

3.4.2.1 Bauteilqualitäten

Neben den Geometrien der Bauteile ist insbesondere deren energetische Qualität für die Transmissionswärmeverluste und damit die Energiebedarfe der Gebäude im Quartier relevant. Diese energetische Qualität lässt sich über den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) eines Bauteils gemäß Gl. 3-18 ausdrücken. Dieser ist neben den Wärmeübergangswiderständen R_{si} und R_{se} insbesondere von den Dicken $d_{Schicht}$ sowie den Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{Schicht}$ der einzelnen Bauteilschichten abhängig [Laasch/Laasch (2013)]. Die Dicken des Bauteils und der einzelnen Schichten können als Teil der Geometrie-parameter angesehen werden, die analog zu den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Parametern aus Plänen entnommen werden oder vor Ort durch Messungen bestimmt werden können. Zu beachten ist jedoch, dass der Aufbau der innenliegenden Schichten oft nicht zerstörungsfrei bestimmt werden kann und hier somit Beschränkungen in der Zugänglichkeit der Informationen zu den prinzipiell als epistemisch zu betrachtenden Unsicherheiten liegen. Die Wärmeleitfähigkeit der Materialien ist ein aleatorisch streuender Materialparameter, dessen Unsicherheiten bspw. durch Feuchtigkeit oder Alterungsprozesse hervorgerufen werden [Zhao (2012)]. Eine Bestimmung im verbauten Zustand ist nur mit erheblichem Aufwand möglich.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{Schichten} \frac{d_{Schicht}}{\lambda_{Schicht}} + R_{se}} \quad Gl. 3-18$$

In der Vergangenheit wurden im Zuge der Typgebäuedefinition daher auch Typologien entwickelt, um unbekannt Schichtaufbauten und Materialparameter von Bestandsgebäuden abschätzen zu können. Als populärstes Beispiel gilt hier die Wohngebäudetypologie, die am Institut Wohnen und Umwelt (IWU) entwickelt wurde. Diese gibt anhand

der Baujahre für verschiedene Gebäudetypen Referenzvertreter mit definierten Bauteilaufbauten vor [Loga et al. (2015)]. Daneben wurde am IWU auch ein Referenz-Bauteilaufbau für den mittleren Gebäudebestand errechnet, der verwendet werden kann, wenn für große Bestände die tatsächlichen Modernisierungsniveaus nicht bekannt sind [Müller/Heit (2022)].

In einem aktuellen Forschungsvorhaben haben Loga et al. (2021) aufbauend auf der IWU-Typologie eine Quantifizierung der Unsicherheiten vorgenommen, die bei Verwendung dieser Referenzwerte zu erwarten sind. Für die Berücksichtigung der Unsicherheiten auf Basis der Materialparameter bei bekannten Bauteilaufbauten liefern Macdonald (2002) und Zhao (2012) Quantifizierungen, die in der Literatur oft verwendet werden.

3.4.2.2 Wärmebrücken

Wärmebrücken bezeichnen Konstruktionsdetails, an denen punktuell ein deutlich geringerer Wärmedurchgangswiderstand vorliegt als in den umgebenden Bauteilen. Insbesondere wenn Dämmmaßnahmen nicht vorschriftsgemäß durchgeführt werden, können Wärmebrücken auch nach der Sanierung noch einen signifikanten Anteil des Energiebedarfs bedingen [Bednar/Hagentoft (2015)]. Im Bestand sind sie durch Thermographie erkennbar.

Wärmebrücken können für Bauteilanschlüsse detailliert gemäß den Vorgaben der DIN EN ISO 10211 oder anhand der Ausführungsbeispiele der DIN 4108 Beiblatt 2 berechnet werden. Eine Angabe erfolgt dann in Form des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten in $W/(m \cdot K)$. Dafür sind jedoch Informationen über die geometrischen Details der Anschlüsse sowie die Bauteilaufbauten notwendig, die den in den vorherigen Abschnitten dargestellten Unsicherheiten unterliegen. In der normativen Ermittlung der Energiebedarfe bspw. nach DIN V 18599-2 werden daher oft pauschale Zuschläge auf die U-Werte der Hüllflächen zur Berücksichtigung der Wärmebrücken verwendet. Loga et al. (2021) haben auch hierfür eine Quantifizierung der Unsicherheiten für die Verwendung in ihrer Methodik vorgenommen.

3.4.2.3 Infiltrationsluftwechsel

Die Luftdichtheit der Gebäudehülle bestimmt den Infiltrationswechsel und hat damit ebenso einen Einfluss auf den Energiebedarf. Bei Neubauten bzw. umfassenden Sanierungen der Gebäudehülle wird die Luftdichtheit des Gebäudes in der Regel verbessert, um durch Infiltration bedingte Wärmeverluste zu begrenzen. [Bohne (2022)]

Der Infiltrationswechsel ist von den Druckverhältnissen in Folge von Wind auf das Gebäude abhängig und lässt sich über einen Blower-Door Test experimentell bestimmen [Mun et al. (2021)]. Ein solcher Test ist jedoch aufwendig und wird daher in der Regel im

Bestand nicht für jedes Gebäude durchgeführt. Die Unsicherheit des Infiltrationsluftwechsels ist demnach teilweise als epistemisch zu klassifizieren. In der Literatur haben sich insbesondere im Kontext hygienischer Mindestluftwechsel einige Arbeiten mit den Streuungen der im Bestand vorhandenen Infiltrationsluftwechsel beschäftigt [Münzenberg (2004); Strobl (2017)]. Die Sensitivität der Infiltrationsrate auf den Energiebedarf wurde in der Literatur als sehr groß identifiziert, sodass die Unsicherheitsquantifizierung dieses Parameters eine besondere Stellung einnehmen sollte, derzeit jedoch oft nicht detailliert abgebildet wird [Tian et al. (2018)].

3.4.3 Nutzerverhalten

3.4.3.1 Möglichkeiten zur Quantifizierung der Unsicherheiten

Das Nutzerverhalten wird in der Literatur einhellig als größte Quelle für Unsicherheiten auf den Energiebedarf von Gebäuden angesehen. Dies liegt zum einen daran, dass relevante Parameter nur aufwändig messbar sind und das Nutzerverhalten zudem einen großen aleatorischen Anteil besitzt, der sich durch Modelle nur schwer abbilden lässt. [de Wit (2003)]

Wird das Nutzerverhalten deterministisch in Energiebedarfsmodellen berücksichtigt, so werden oft Zeitpläne für bestimmte Verhaltensmuster wie Fensteröffnungen oder Anwesenheiten definiert. Die Berücksichtigung der Unsicherheiten kann darauf aufbauend entweder implizit für die jeweiligen (messbaren) durch die Nutzer beeinflussten Zeitpläne erfolgen, bspw. für die Soll-Raumtemperaturen oder internen Wärmegewinne, oder es können explizite Modelle verwendet werden, welche versuchen die stochastischen Bewegungs- und Verhaltensmuster der Personen nachzubilden. [Tian et al. (2018)] Eine sehr gute Übersicht über den aktuellen Forschungsstand kann Norouziasl et al. (2021) entnommen werden.

Ein Beispiel für ein Modell zur expliziten Berücksichtigung des stochastischen Nutzerverhaltens ist das von Wörner (2020) entwickelte „Peaktime“. In dem Modell wird auf Basis statistisch ausgewerteter Zeitverwendungserhebungen das menschliche Verhalten verschiedener Haushaltzusammensetzungen in Wohngebäuden simuliert. Wörner verwendet das Modell, um den Stromverbrauch in Haushalten zu modellieren, zeigt aber, dass die Ergebnisse auch für Energiebedarfsmodelle verwendet werden können. Grundlage für solche expliziten Modelle sind jedoch demographische Faktoren der Personen in den Gebäuden, die als Informationen oft nicht vorliegen und zudem aufgrund datenschutzrechtlicher Beschränkungen auch nur schwer zu ermitteln sind. Im Folgenden wird daher der Fokus eher auf die implizite Betrachtung der Unsicherheiten aus dem Nutzerverhalten gelegt, auch wenn Wörners Ergebnisse insbesondere für den Anwendungsstrombedarf sehr interessant erscheinen und dort nochmals aufgegriffen werden.

Für die implizite Modellierung ist insbesondere die Veröffentlichung von Loga et al. (2019) hervorzuheben. Die Autoren geben zunächst einen sehr guten Überblick über vorhandene Literatur zur impliziten Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei der Energiebedarfsberechnung und stellen im Anschluss eine Datenbank mit Wohngebäuden zusammen, für die im Rahmen von Monitoringvorhaben sowohl Informationen über Energiebedarfe beeinflussende Parameter als auch gemessene Verbräuche vorliegen. Ein Großteil dieser Gebäude wurde bereits energetisch saniert. Aus der Datenbank leiten die Autoren den Einfluss des Nutzerverhaltens ab und quantifizieren die Unsicherheiten der einzelnen Parameter. Sie stellen jedoch fest, dass die Datenlage für eine fundierte empirische Quantifizierung der Unsicherheiten und insbesondere des Zusammenhangs mit demographischen und gebäudebezogenen Merkmalen nicht ausreicht.

3.4.3.2 Raumkonditionierung

Ein wichtiger, durch das stochastische Nutzerverhalten implizierte Parameter für den Energiebedarf von Gebäuden sind die vorgegebenen Raum-Solltemperaturen. Während Norm-Berechnungen konstante Raumtemperaturen ansetzen, die lediglich optional über Nacht abgesenkt werden, zeigen Auswertungen in der Literatur, dass tatsächliche Raumtemperaturen stark zwischen verschiedenen Nutzern variieren [Weber et al. (2022); Guerra Santin (2013)]. Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, lassen sich derzeit keine empirisch fundierten Verknüpfungen zwischen demographischen Merkmalen der Gebäudenutzer und den Raumtemperaturen ableiten [Loga et al. (2019)]. Lediglich eine gewisse Tendenz zu höheren Temperaturen bei älteren Personen ist feststellbar [Wagnitz (2016)]. Allerdings kann empirisch festgestellt werden, dass die Raumtemperaturen in hochgedämmten Gebäuden in der Regel höher liegen als in ungedämmten. [Guerra Santin (2013)]

Raumtemperaturen lassen sich im Bestand messen, um die Unsicherheiten zu reduzieren, allerdings bleiben Messunsicherheiten bestehen. Zudem sind bei der Messung der nutzerbezogenen Kenngrößen datenschutzrechtliche Fragestellungen zwingend zu beachten, sodass hier ein gewisser Aufwand für das Befragungsdesign einzuplanen ist [Begleitforschung Energiewendebauen (2020)].

3.4.3.3 Lüftungsverhalten

Neben den Raumtemperaturen beeinflussen die Nutzer den Heizwärmebedarf maßgeblich über das Lüftungsverhalten, welches in Wohngebäuden in der Regel über eine freie Fensterlüftung stattfindet. Auch hier sind in der Empirie sehr große Streuungen zwischen den Nutzern zu beobachten. Über Nutzerbefragungen lassen sich die Unsicherheiten eingrenzen, empirische Grundlagen zu einem Einfluss anderer Größen liegen jedoch nicht vor. Anhaltspunkte können die Vorgaben von Loga et al. (2019) geben.

3.4.3.4 Trinkwarmwasserbedarf

Der Trinkwarmwasserbedarf ist von den Nutzern sowie den verfügbaren Zapfstellen (Badewannen oder Duschen) abhängig und ist wie die anderen vorgestellten Parameter mit starken Unsicherheiten belegt [Loga et al. (2019)]. Es gibt jedoch eine klare Korrelation zwischen einem steigenden Trinkwarmwasserbedarf und einer steigenden Personenanzahl. Zudem werden in der Literatur ein Einfluss des Alters und des Geschlechts auf den Wasserverbrauch identifiziert. [UBA (2016)] Eine Erhebung zur Haushaltsgröße oder anderen demographischen Merkmalen kann demnach genutzt werden, um die Unsicherheiten zu reduzieren. Zudem können Verhaltensmuster, die den Trinkwarmwasserbedarf bedingen, wie Duschhäufigkeiten und -dauern, von den Nutzern über Befragungen ermittelt werden, was jedoch besonders bei größeren Gebäudebeständen einen erheblichen Aufwand bedeuten kann.

Sofern für das Trinkwarmwasser separate Zähler verbaut sind, lassen sich die Unsicherheiten zusätzlich reduzieren, indem die historischen Verbräuche als Anhaltspunkt für das Nutzerverhalten zu Rate gezogen werden. Allerdings bleiben hier oft Messunsicherheiten bestehen, wenn aus Mengenzählern Energieverbräuche abgeleitet werden [Offermann et al. (2015)].

Des Weiteren existieren in der Literatur Ansätze, welche die Unsicherheiten des Trinkwarmwasserbedarfs über die Generierung von stochastischen Zapfprofilen modellieren. Dabei handelt es sich um eine explizite Modellierung des Nutzerverhalten. Beispiele sind Jordan/Vajen (2001) oder Fischer et al. (2016). Auch das bereits vorgestellte, von Wörner (2020) entwickelte Modell erlaubt die Erzeugung solch stochastischer Zapfprofile. Die damit einhergehenden Einschränkungen gelten demnach analog.

3.4.3.5 Anwendungsstrombedarf

Der Anwendungsstrombedarf in Wohngebäuden, auch als Haushaltsstrombedarf bezeichnet, unterliegt sowohl in seiner absoluten Höhe als auch in seinem zeitlichen Verlauf über den Tag sowie über das Jahr großen nutzerabhängigen Unsicherheiten, die teilweise epistemischer und aleatorischer Natur sind. [Mavromatidis et al. (2018)]

Die absolute Höhe des Stromverbrauchs wird in der Regel messtechnisch erfasst und ist somit für die vergangenen Abrechnungsperioden auswertbar. Allerdings erfolgt die Abrechnung in Mehrfamilienhäusern häufig direkt über die Mieter, sodass hier ein erhöhter Aufwand und die bereits beschriebenen datenschutzrechtlichen Überlegungen zu erwarten sind, um Verbrauchswerte zu erhalten. Eine Abschätzung der Höhe des Haushaltsstrombedarfs zur Verringerung der Unsicherheiten kann zudem über die Personenanzahl im Haushalt getroffen werden, die stark positiv mit dem Strombedarf korreliert. [Großklos (2017)]

Neben der absoluten Höhe des Strombedarfs ist insbesondere auch der zeitliche Verlauf über den Tag sowie über das Jahr, der auch als „Lastprofil“ bezeichnet wird, entscheidend, wenn beispielsweise die Eigendeckungsgrade von gebäudenahen PV-Anlagen untersucht werden. Auch dieser Verlauf ist mit großen Unsicherheiten belegt und von den Nutzern abhängig. [Müller et al. (2021)]

Um den Verlauf abzubilden, werden Referenz- oder synthetische Lastprofile verwendet. Referenzlastprofile, bspw. nach VDI 4655, stellen dabei ein gemessenes Lastprofil eines als Typvertreter für eine Gruppe ausgewählten Letztverbrauchers dar. Standardlastprofile hingegen sind analytisch ermittelte Lastprofile, welche die Charakteristik einer Vielzahl von Letztverbrauchern darstellen. Im Wohngebäudebereich findet hierbei am häufigsten das Standardlastprofil (SLP) H0 für Haushalte des Verbands der Elektrizitätswirtschaft (VDEW) Anwendung, der im heutigen Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) aufgegangen ist [VDEW (1999)]. Da dieses auf einer Mittelwertbildung basiert, hat es im Vergleich zu tatsächlichen Lastverläufen einen stark geglätteten Charakter, bildet jedoch bei einer ausreichend großen Anzahl an Verbrauchern das kombinierte Lastprofil gut ab [Großklos (2017)]. Nichtsdestotrotz verbleiben große Unsicherheiten bei der Nutzung der Profile.

Um Unsicherheiten unter Verwendung weiterer Informationen über die Bewohnerstruktur im Quartier zu reduzieren, können die von Wörner (2020) entwickelten stochastischen Standardlastprofile für verschiedene Haushaltsgruppen verwendet werden. Dazu hat Wörner zunächst auf Basis demographischer Kennwerte eine Zuteilung von Haushaltsgruppen vorgenommen. Für diese Haushaltsgruppen wurden durch die Anwendung seines stochastischen Modells Standardlastprofile entwickelt, die das charakteristische strombedarfsrelevante Verhalten der Bewohner besser abbilden und somit die Unsicherheiten im Gegensatz zum SLP H0 des VDEW etwas reduzieren können.

3.4.3.6 Interne Wärmegewinne aus Stromanwendungen und Anwesenheiten

In der Regel wird ein Großteil des im voranstehenden Abschnitt thematisierten Anwendungsstroms innerhalb der Zonen in Wärme umgewandelt und steht somit als interner Wärmege Gewinn zur Verfügung. Daneben emittieren auch anwesende Personen, je nach Tätigkeit und Physiologie, Wärme. Wie die anderen Komponenten des Nutzerverhaltens, sind die internen Wärmegewinne aleatorisch. [Mavromatidis et al. (2018)] Eine Messung ist nur mit erheblichem Aufwand möglich, die Abbildung wird daher oft nur über den Haushaltsstrom vorgenommen [Loga et al. (2019)]. Neben einer starken Korrelation mit der Personenanzahl und dem Anwendungsstrombedarf haben Loga et al. (2019) Anhaltspunkte für eine Quantifizierung der Unsicherheiten gegeben.

3.4.4 Anlagentechnik

3.4.4.1 Wirkungsgrade

Auch die Parameter der Anlagentechnik, die zur Deckung der Nutzenergiebedarfe verwendet wird, unterliegen Unsicherheiten [Mavromatidis et al. (2018)]. Insbesondere Wirkungsgrade von Wärmeerzeugern oder Pumpen sind hier als maßgebliche Größen für den Endenergiebedarf relevant. Bei bestehenden Anlagen lassen sich Wirkungsgrade im Betrieb messen und die Unsicherheiten somit auf ein Minimum der Messunsicherheiten verringern. Dies stellt jedoch einen gewissen Aufwand dar. Sind die genauen Wärmeerzeuger bekannt, können auch Nenn-Wirkungsgrade gemäß Herstellerangaben verwendet werden. Hier sind die Unsicherheiten bezüglich der Relation zwischen dem tatsächlichen Wirkungsgrad und dem Nenn-Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom tatsächlichen Anlagenbetrieb maßgeblich. Anhaltspunkte können bspw. den Studien von Smith et al. (2010) oder Aschmann/Effenberger (2012) entnommen werden.

Ist nicht bekannt, welche Wärmeerzeuger in einem Bestandsgebäude vorhanden sind, so lassen sich die Wirkungsgrade bspw. gemäß der Angaben von Diefenbach et al. (2002) abschätzen. Diese sind jedoch mit höheren Unsicherheiten belegt.

Die Wirkungsgrade verringern sich in der Regel im Laufe des Lebenszyklus. Die Höhe der Abnutzung ist hier hauptsächlich von durchgeführten Instandsetzungs- und Wartungsmaßnahmen abhängig [Wilde et al. (2011); Mavromatidis et al. (2018)]. Die resultierenden Unsicherheiten sind jedoch aleatorisch bzw. können als Szenariounsicherheiten deklariert werden.

3.4.4.2 Verteilverluste

Neben den Wirkungsgraden sind insbesondere die Verteilverluste für den Endenergiebedarf maßgeblich. Diese ergeben sich dadurch, dass das Wärmeträgermedium vom Ort der Erzeugung durch Rohrleitungen zum Ort der Wärmeübergabe transportiert werden muss und dabei Wärme an die Umgebung verliert. Sofern die Leitungsführung innerhalb der beheizten Zonen stattfindet, wird die Wärme in die Räume abgegeben und daher nutzbar gemacht. Gerade in Altbauten und Mehrfamilienhäusern führen die Leitungen jedoch auch durch unbeheizte Zonen und weisen keine umfangreiche Wärmedämmung auf, mit welcher Verluste verringert werden könnten. [Diefenbach et al. (2002)] Da eine genaue Berechnung der Verluste schwierig ist, werden in der Regel prozentuale Abschätzungen des Heizenergiebedarfs angesetzt. Diese sind dann jedoch mit hohen Unsicherheiten belegt, welche gemäß ihrem Naturell als epistemisch eingeordnet werden können.

3.4.5 Standort

3.4.5.1 Klimadaten

Das historische Klima, wie bspw. Temperaturen oder solare Einstrahlungen, lässt sich für einen Standort aus Messreihen nachverfolgen, sofern diese in der Vergangenheit erhoben wurden. Andernfalls können benachbarte Messstationen zur Abbildung des Klimas am Standort verwendet werden. Die zukünftige Entwicklung der Klimaparameter ist jedoch aleatorisch unsicher und hat einen signifikanten Einfluss auf den Energiebedarf [Tian et al. (2018)].

Oft werden im Rahmen von Energiebedarfssimulationen Testreferenzjahre (TRJ) verwendet, die ein durchschnittliches Klima der letzten Jahrzehnte abbilden. In Deutschland werden solche Testreferenzjahre vom Deutschen Wetterdienst (DWD) erstellt und herausgegeben [BBR/DWD (2017)]. Bei der Verwendung von Referenzjahren für die Simulation von Energiebedarfen kommt es jedoch zu Abweichungen im Gegensatz zu realen Wetterdaten vergangener Jahre [Hong et al. (2013)]. In der Literatur existieren daher Ansätze, welche die Unsicherheiten des Klimas über stochastische Modelle oder durch die Nutzung verschiedener historischer Wetterdaten abbilden [Tian et al. (2018)].

Sollen zudem die zukünftigen Entwicklungen des Klimas im Energiebedarfsmodell betrachtet werden, so lassen sich diese als Szenariounsicherheit (siehe Kapitel 3.6) klassifizieren. Auf Basis von regionalen Klimamodellen wurden vom DWD für Deutschland Referenzjahre für ein zukünftiges Klima von 2031-2060 erstellt [BBR/DWD (2017)]. Auch andere Studien befassen sich mit der Erstellung zukünftiger Klimadaten für die Nutzung in der Energiebedarfssimulation [bspw. Jentsch et al. (2013)].

3.4.5.2 Einflüsse aus Nachbarbebauung

Insbesondere bei der Quartiersbetrachtung können auch aus der Nachbarbebauung Einflüssen auf den Energiebedarf resultieren. Dies können Wärmeinsel- oder Verschattungseffekte sowie Windlenkungswirkungen sein. Diese Effekte sind schwer messbar und zudem wie die anderen Standortparameter mit aleatorischen Unsicherheiten belegt. Einige Studien in der Literatur versuchen die Einflüsse zu berücksichtigen, machen jedoch aus rechenkapazitativen Gründen oft Abstriche im Detailgrad der Gebäudegeometriemodelle. [Reinhart/Cerezo Davila (2016)]

3.5 Modellunsicherheiten

Neben den Unsicherheiten der Modelleingangsparameter ist auch die Verwendung der Energiebedarfsmodelle an sich mit Unsicherheiten verbunden. Diese können bei den dynamischen Simulationsmodellen durch die fehlerhafte bzw. begrenzte Abbildung der Realität über das Modell sowie durch Unsicherheiten der numerischen Lösungsverfahren resultieren. Letztere sind heutzutage jedoch als vernachlässigbar klein einzuschätzen und werden daher nicht weiter berücksichtigt. [de Wit (2003)]

Die Modellunsicherheit wird üblicherweise mit dem Parameter θ dargestellt. Sind detaillierte Messdaten zu dem Prozess vorhanden, den das Modell abbildet, so kann damit eine Validierung und Berechnung der Modellunsicherheiten vorgenommen werden. [Arendt et al. (2012)] Bei den Energiebedarfssimulationen von zukünftigen Sanierungsvarianten ist eine solche Validierung jedoch nicht möglich und auch im Bestand aufgrund fehlender Messdaten oft nicht realisierbar. Die bestehenden Simulationsprogramme wurden, wie in Kapitel 2.5.2 dargestellt, für besondere Testreferenzfälle validiert, sodass die grundlegende Verwendbarkeit für die Abbildung der Energiebedarfe gezeigt wurde.

Zudem lässt sich die Modellunsicherheit über die Detaillierungstiefe der Modellierung verringern. Je detaillierter das Abbild der Realität modelliert wird, desto geringer ist die Abweichung zwischen Modellergebnis und wahren Wert. Allerdings steigt dadurch die Streuung der Parameter, wenn Annahmen für eine größere Anzahl an Eingangsparametern für die detailliertere Modellbildung benötigt werden. [Reinhart/Cerezo Davila (2016)]

In der Literatur haben sich mehrere Studien mit den Auswirkungen verschiedener Detailtiefen in der Modellierung der Gebäudegeometriemodelle und der Zonierung (der Aufteilung des Gebäudevolumens in thermische Zonen, für die jeweilige Energiebilanzen simuliert werden) beschäftigt. Chen/Hong (2018) haben für einen Gebäudedatensatz in nordamerikanischen Städten drei verschiedene Algorithmen zur Zonierung untersucht. Sie zeigen dabei, dass die Simulationsdauern bei detaillierten Zonierungsalgorithmen zwar deutlich erhöht, die Abweichungen zu den Messdaten jedoch im Vergleich zu vereinfachten Zonierungsformen reduziert werden können.

Auch Faure et al. (2021) kommen in ihren Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass die Art der Zonierung einen Einfluss auf die berechneten Energiebedarfe hat. Sie schließen sich Chen/Hong an und raten zu einer detaillierteren Zonierung auch in Quartiersmodellen, verbleibende Abweichungen quantifizieren sie auf unter 5 %.

Bewersdorff (2021) untersucht zunächst an einem Einzelgebäude verschiedene Modellvereinfachungen, wie das Zusammenlegen von Fensterflächen oder Zonierungen. Er kommt zu dem Schluss, dass eine stockwerkweise Zonierung für Mehrfamilienhäuser geeignet erscheint. Zudem untersucht er an einem kleinen Quartier den Unterschied zwischen einer Einzelgebäudesimulation und der deutlich rechenintensiveren,

gemeinsamen Simulation aller Gebäudekörper. Hier kommt es zwar zu Abweichungen, insbesondere durch Verschattungen, die bei den Einzelgebäuden nicht betrachtet werden, diese bewegen sich jedoch in einer Größenordnung von unter einem Prozent.

Alle voran genannten Studien haben gemeinsam, dass diese den Energiebedarf deterministisch bestimmen. Es ist demnach nicht klar, inwieweit in den Modellen noch vorhandene Parameterstreuungen für die Abweichungen zwischen den Modell- und Messwerten verantwortlich sind. Eine Quantifizierung von Modellunsicherheiten ist daher im Kontext der Energiebedarfsmodellierung schwierig. Durch eine möglichst detaillierte Modellierung kann sie jedoch reduziert werden und ist daher insbesondere bei der Verwendung von stark vereinfachten Modellen relevant.

3.6 Szenariungewissheiten

Neben den zuvor beschriebenen Parameter- und Modellunsicherheiten werden in der Literatur zusätzlich häufig Szenariunsicherheiten klassifiziert [Tian et al. (2018)]. Die Unterscheidung ist nicht immer ganz eindeutig, wie sich am Beispiel der Klimaparameter (siehe Kapitel 3.4.5.1) zeigt, die teilweise als Parameter- und teilweise als Szenariunsicherheiten deklariert werden [Mavromatidis et al. (2018); de Wit (2003); Tian et al. (2018)].

Allgemein werden vor allem Unsicherheiten subsumiert, die sich eher auf externe Faktoren des Untersuchungsgegenstand beziehen und somit nicht direkt im Einflussbereich der relevanten Entscheidenden liegen. Zudem beziehen sich die Unsicherheiten oft auf Parameter, die über den Betrachtungszeitraum variabel sind. Ein Beispiel hierfür ist die bereits angesprochene Änderung des Klimas am Standort. Zudem werden Parameter, die zwar keine Auswirkung auf den Energiebedarf des Untersuchungsgegenstands, jedoch auf die Bewertung eines Sanierungs- oder Versorgungskonzeptes haben, oft in den Bereich der Szenariunsicherheiten eingeordnet. Dies umfasst die ökonomischen und ökologischen Dimensionen, die mit der Energieversorgung von Quartieren verbunden sind (siehe Kapitel 4.2). [Tian et al. (2018)]

Zur Quantifizierung dieser Unsicherheiten werden entweder verschiedene Prognoseverfahren oder, analog zu den anderen Parameterstreuungen, Wahrscheinlichkeitsfunktionen definiert [Tian et al. (2018)]. Da der epistemische Anteil aufgrund der temporalen Dimension jedoch nicht verringert werden kann (kein „Blick in die Zukunft“ möglich), wird in der Literatur oft auf die Definition von denkbaren Zustandsentwicklungen in Form von Szenarien zurückgegriffen, die nebeneinanderstehend einen möglichen Entwicklungskorridor aufspannen, um so die Unsicherheiten abzubilden [Waddicor et al. (2016)]. Auf die Szenariunsicherheiten wird im Verlauf des folgenden Kapitels nochmals eingegangen, wenn die Bewertungsdimensionen eines Energieversorgungskonzeptes vorgestellt werden.

3.7 Modellierungsansätze für Energiebedarfsmodelle von Quartieren unter Berücksichtigung der Unsicherheiten

Prataviera et al. (2022) haben ein Energiebedarfsmodell für Stadtquartiere entwickelt, bei dem die Unsicherheiten einer Reihe von Inputparametern berücksichtigt werden. Der Energiebedarf wird über ein dynamisches Simulationsmodell ermittelt, welches die Gebäudemodelle vereinfacht über Widerstandsgleichungen abbildet. Die Unsicherheiten der Inputparameter werden durch die Abbildung über Zufallsvariablen dargestellt. Dies wird sowohl für geometrische Parameter als auch für die Qualität der Gebäudehülle sowie das Nutzerverhalten vorgenommen. Die Quantifizierung der Unsicherheiten geschieht dann mittels Monte-Carlo Analyse.

Für die Verwendung im Verbrauchscontrolling von großen Wohnungsbeständen haben Loga et al. (2021) im Rahmen des Forschungsprojekts „Modellierung der Bandbreiten und systematischen Abhängigkeiten des Energieverbrauchs zur Anwendung im Verbrauchscontrolling von Wohngebäudebeständen“ (MOBASY) eine umfangreiche Quantifizierung der Unsicherheiten bei der Energiebedarfsmodellierung vorgenommen. Sie ermitteln die Energiebedarfe für Wohngebäudebestände über ein vereinfachtes Monatsbilanzverfahren, bei welchem die Streuungen der Eingangsparameter additiv berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Energiebedarfe wird ein Satz von Monitoring-Indikatoren festgelegt, der durch eine Eigentümerbefragung oder eine kurze Ortsbegehung erfasst werden kann. Diese Indikatoren werden in Basisvariablen für die Energiebedarfsberechnung überführt. Hierbei erfolgt die Berücksichtigung der Unsicherheit in Abhängigkeit der Datenqualität der aufgenommenen Monitoring-Indikatoren über die Bildung von fünf Unsicherheitsklassen. Je schlechter die Qualität der Daten eingestuft wird, desto höher werden die Unsicherheiten quantifiziert. Die Ergebnisse der von den Autoren als „Realbilanzierung“ bezeichneten Methode werden zum Abgleich mit tatsächlichen Verbräuchen verwendet, um Ausreißer identifizieren zu können. Es erfolgt somit keine Bewertung hinsichtlich vorteilhafter Sanierungs- und Energieversorgungskonzepte. Da dies jedoch Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist, werden im nächsten Kapitel Bewertungsmodelle für ebenjene Konzepte thematisiert.

4 BESTEHENDE BEWERTUNGSMODELLE VON ENERGIEVERSORGUNGS- UND SANIERUNGSKONZEPTEN

4.1 Bewertung von energetischen Quartierssanierungskonzepten als Entscheidungsproblem

4.1.1 Hinführende Erläuterungen

In den vorherigen Kapiteln wurde ein Überblick über die Grundlagen der Energiebedarfe und deren Deckung über Energieversorgungskonzepte von Gebäuden im Allgemeinen und Quartieren im Speziellen gegeben. Zudem wurden Modelle zur Berechnung dieser Energiebedarfe vorgestellt sowie detailliert auf die Unsicherheiten, die den Modellen zugrunde liegen, eingegangen.

Für den in der Zielsetzung dieser Arbeit definierten Variantenvergleich sind neben den Energiebedarfen jedoch auch noch andere Größen Grundlage zur Unterstützung einer Sanierungsentscheidung. In der derzeitigen kapitalistischen Wirtschaftsordnung ist ein zentrales Kriterium für eine Sanierungsentscheidung die Wirtschaftlichkeit bzw. ökonomische Dimension einer Maßnahme. Zudem sind durch die gesetzlichen Vorgaben Obergrenzen bezüglich der ökologischen Auswirkungen gesetzt, sodass die ökologische Komponente der Maßnahmen eine zunehmende Rolle spielt.

Im Folgenden soll daher zunächst ein kurzer Überblick über die Definition des Variantenvergleichs als Entscheidungsproblem mit den dazugehörigen theoretischen Grundlagen gegeben werden. Daran anschließend werden die ökologische und ökonomische Bewertungsdimension mit den populärsten Bewertungsmethoden vorgestellt. Hierbei wird insbesondere auch auf bestehende Unsicherheiten, analog zur Beschreibung der Unsicherheiten der Energiebedarfsmodelle in Kapitel 3, eingegangen. Zum Abschluss des Kapitels folgt ein Überblick über bestehende Bewertungsmodelle von Energieversorgungs- und Sanierungskonzepten für Quartiere. Hieraus werden Forschungslücken insbesondere hinsichtlich der Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Bewertung abgeleitet.

4.1.2 Klassifizierung von Entscheidungsproblemen

Ein Entscheidungsproblem liegt immer dann vor, wenn mehrere Alternativen zur Erreichung eines Zielzustands existieren, von denen möglichst die zur Zielerreichung am besten geeignete Alternative gewählt werden soll [Roth (2011)]. Generell lassen sich Entscheidungsprobleme auf Basis mehrerer Aspekte klassifizieren. Liegt eine begrenzte Anzahl an Alternativen vor, so charakterisiert dies ein *Wahlproblem*. Die (nahezu) uneingeschränkte Anzahl an Alternativen ist ein Merkmal eines *Gestaltungsproblems*. Zudem lässt sich zwischen der Anzahl der Ziele unterscheiden. Bei einem *einwertigen Entscheidungsproblem* wird lediglich eine Zielsetzung bei der Entscheidung verfolgt,

während bei einem *mehrwertigen Entscheidungsproblem* mehrere Zielsetzungen zu berücksichtigen sind. Eine weitere zentrale Unterscheidung bezieht sich auf die Vorhersagbarkeit der Konsequenzen aus dem Entscheidungsproblem. Ein eher theoretischer Fall ist die *Entscheidung unter Sicherheit*, bei der sämtliche Konsequenzen bekannt sind. Bei der *Entscheidung unter Unsicherheit* existieren unsichere Prognosen über die Konsequenzen, für die Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeschätzt werden können. Lassen sich die Wahrscheinlichkeiten aufgrund mangelnder Informationen über den Charakter der Konsequenzen nicht abschätzen, handelt es sich um ein *Entscheidungsproblem unter Ungewissheit*. [Grünig/Kühn (2017)]

Um ein Entscheidungsproblem zu lösen, liegen eine Reihe von Lösungsverfahren vor. In der Regel werden dabei für die Entscheidungsziele Kriterien festgelegt, die für jede der Alternativen bewertet werden können. Liegen mehrere dieser Kriterien vor, so wird von einer *multikriteriellen Bewertung* gesprochen. Hierbei können für jede Alternative und jedes Kriterium Bewertungsergebnisse errechnet werden, die zusammenfassend in einer Ergebnismatrix darstellbar sind. [Grünig/Kühn (2017)]

Bei einer Nutzwertanalyse wird jedem Kriterium ein Nutzen zugeordnet, der den Erfüllungsgrad eines Kriteriums beschreibt. Gewählt wird dann die Alternative, die den höchsten Gesamtnutzen über alle Kriterien aufweist. Optional können Kriterien mit einer Wichtung versehen werden, um ihren Fokus in der Entscheidungsfindung zu betonen. [Kühnapfel (2021)] Nutzwertanalysen werden bspw. in der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden häufig eingesetzt [DGNB (2018)].

Liegt eine Entscheidung unter Unsicherheit bzw. Ungewissheit vor, so sind zusätzliche Umweltzustände zu definieren, für die jeweils eine Bewertung der Kriterien vorgenommen werden kann. Wenn verschiedenen Umweltzuständen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können (Entscheidung unter Unsicherheit), lassen sich bspw. mit der Bayes-Regel die Erwartungswerte der Kriterienbewertungen über die Umweltzustände bilden. Diese können zur Entscheidungsfindung verwendet werden. Sind keine Wahrscheinlichkeiten bekannt, so lassen sich bspw. Regeln zur Entscheidungsfindung verwenden, die eine Risikobereitschaft der Entscheidenden berücksichtigen, indem eine Schadensminimierung oder ein möglicher Best-Case die Ergebnisauswahl bedingen. [Götze (2014)] Eine ausführlichere Darstellung der Entscheidungsverfahren kann Roth (2011) entnommen werden.

4.1.3 Einordnung im Kontext der vorliegenden Fragestellung

Wie bereits erläutert sind bei der Sanierungsentscheidung neben den energetischen Auswirkungen insbesondere die ökonomischen und ökologischen Dimensionen zu beachten. Es handelt sich demnach um ein mehrwertiges Entscheidungsproblem, welchem eine multikriterielle Bewertung zugrunde liegt. Auch wenn theoretisch eine unbeschränkte Anzahl von verschiedenen Sanierungskonzepten denkbar wäre, so wird in der Praxis die Sanierungsentscheidung auf eine begrenzte Zahl von Varianten beschränkt werden, sodass das Entscheidungsproblem des Variantenvergleichs als Wahlproblem klassifiziert werden kann. Zudem wurde in Kapitel 3 deutlich, dass die Energiebedarfsmodelle mit Unsicherheiten belegt sind, die sich in ihrer Mehrheit quantifizieren lassen, teilweise jedoch auch dem Bereich der Szenariounsicherheiten zuzuordnen sind, für die keine Quantifizierung möglich ist. Das Entscheidungsproblem des Sanierungsvariantenvergleichs ist daher teilweise unter Unsicherheit und teilweise unter Ungewissheit zu sehen.

Die Modelle zur Ermittlung der Energiebedarfe sowie deren Unsicherheiten wurden bereits in den vorherigen Kapiteln detailliert vorgestellt. Im Folgenden sollen nun auch für die anderen Bewertungsdimensionen die prominentesten Bewertungsmethodiken sowie die mit ihrer Anwendung verbundenen Unsicherheiten dargestellt werden. Hierfür ist zunächst kurz auf die Lebenszyklusbetrachtung einzugehen, welche in der Regel die Basis für die ökologischen und ökonomischen Bewertungsmethoden bildet.

4.2 Abbildung der ökonomischen und ökologischen Bewertungsdimensionen

4.2.1 Lebenszyklusbetrachtung

4.2.1.1 Lebenszyklusphasen

Gebäude sowie einzelne Bauteile und Komponenten der Anlagentechnik durchlaufen in der Regel über ihren Lebenszyklus drei Phasen: Die Herstellungs-, die Nutzungs- sowie die Beseitigungsphase. Während die Herstellungsphase sowohl die Planung als auch Bauausführung sowie die Herstellung der Bauprodukte und Anlagenteile umfasst, wird unter der Beseitigungsphase der Rückbau sowie die Entsorgung oder Aufbereitung zur weitergehenden Verarbeitung verstanden. Die Nutzungsphase, als die mit Abstand längste Phase des Lebenszyklus, besteht im Allgemeinen aus Betriebs- und Instandsetzungsprozessen. [Roth (2011)]

Betriebsprozesse lassen sich gemäß DIN 18960 in Ver- und Entsorgung, Reinigung und Pflege, Bedienung, Inspektion und Wartung einteilen. Unter einer Instandsetzung versteht man gemäß DIN EN 13306 die Wiederherstellung eines Soll-Zustands eines Bauteils bzw. einer Komponente. Hat ein Bauteil oder eine Komponente der Anlagentechnik seine bzw. ihre Nutzungsdauer erreicht, so findet in der Regel ein für den Weiterbetrieb des Gebäudes notwendiger Austausch statt. Wichtig ist hierbei die Unterscheidung zwischen der technischen und wirtschaftlichen Nutzungsdauer. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer ist erreicht, wenn bspw. durch technischen Fortschritt Alternativprodukte verfügbar sind, die einen Austausch einer Komponente wirtschaftlich vorteilhaft werden lassen, obwohl diese noch funktionsfähig ist. [Roth (2011)]

4.2.1.2 Unsicherheiten in den Nutzungsdauern

Bei der deterministischen Betrachtung von Nutzungsdauern, auch technische Lebensdauern (TLD) genannt, werden oft rechnerische Nutzungsdauern angesetzt, die aus Mittelwerten oder Expertenschätzungen abgeleitet werden [Welsch (2011)]. Diese werden bspw. in der VDI 2067-1 für Komponenten der Anlagentechnik oder vom BBSR (2017) für Bauteile festgelegt. Die tatsächlichen Nutzungsdauern variieren jedoch stark und sind mit Unsicherheiten belegt, die als aleatorisch klassifiziert werden können.

Ritter (2011) hat bereits Untersuchungen zu Streuungen bezüglich der Nutzungsdauern von Bauteilen durchgeführt. Diese beruhen auf einer Analyse der die Nutzungsdauern beeinflussenden Faktoren. Für die Abbildung der Einflüsse der einzelnen Faktoren verwendet Ritter Dreiecksverteilungen. Er gibt neben Mittelwerten auch Quantilwerte an, zwischen denen sich die Nutzungsdauern üblicherweise im Gebäudebestand bewegen.

Davon unabhängig haben Goulouti et al. (2020) für die Schweiz die Nutzungsdauern verschiedener Komponenten in Gebäuden untersucht. Daraus konnten beschreibende

Statistik Kennzahlen wie Mittel- und Quantilwerte abgeleitet werden. Zudem haben die Autoren gezeigt, dass sich die empirischen Verteilungsfunktionen gut mit Log-Normalverteilungen schätzen lassen können. Die Daten der Nutzungsdauern sowie der Verteilungsfunktionen wurden separat von Goulouti et al. (2021) veröffentlicht.

4.2.2 Ökologische Bewertung

4.2.2.1 Ökobilanzierung

Mit der allgemein in der DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 beschriebene Methode der Ökobilanzierung (LCA) können Umweltwirkungen und Ressourceninanspruchnahmen von Produkten über den Lebenszyklus berechnet werden. Der prinzipielle Ablauf umfasst dabei die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Bildung einer Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung sowie die Auswertung.

Für die Anwendung auf Gebäude steht die DIN EN 15978 zur Verfügung. Diese beschreibt in Form von Modulen, welche Prozesse des Lebenszyklus in der Ökobilanz zu berücksichtigen sind. Die Prozesse sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Die Module der Gruppe A umfassen die Herstellungs- und Errichtungsphase, die Module der Gruppe B die Nutzungsphase und der Gruppe C die Entsorgungsphase. Mögliche Gutschriften für eine Wiederverwendung oder das Recyclingpotenzial der Baustoffe werden im Modul D angegeben. Hierzu zählen auch die innerhalb der Systemgrenzen und in das öffentliche Netz eingespeisten Energiemengen. Die Ergebnisse für das Modul D sind separat auszuweisen.

Darüber hinaus hat sich insbesondere im Zuge der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden eine vereinfachte Ökobilanzierung etabliert, welche lediglich die Module A1-A3, B6 sowie C3-C4 und D beinhaltet [DGNB (2018)].

Die Wirkungsabschätzung der einzelnen Bauprodukte wird in der DIN EN 15804 geregelt. Hier sind Vorgaben enthalten, wie Umweltproduktdeklarationen (engl. *Environmental Product Declarations*) (EPD) zu erstellen sind, welche die Umweltwirkungen und Ressourceninanspruchnahmen für die einzelnen Module der Sachbilanz darstellen. Für eine Vielzahl üblicher Bauprodukte wurden bereits produktspezifische oder generische EPDs erstellt, die in Datenbanken zusammengestellt sind. Martínez-Rocamora et al. (2016) geben einen guten Überblick über verfügbare Datenbanken im internationalen Kontext. Im deutschsprachigen Raum wird insbesondere die „ÖKOBAUDAT“-Datenbank in diesem Zusammenhang verwendet [BMWSB (2021)].

Von den möglichen Umweltindikatoren einer Ökobilanz haben sich in den vergangenen Jahren der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf und insbesondere das Treibhauspotential (engl. *Global Warming Potential*) (GWP) als Leitindikatoren entwickelt, auf deren Ausweisung sich Ökobilanzen fokussieren [Lützkendorf (2022)].

4 Bestehende Bewertungsmodelle von Energieversorgungs- und sanierungskonzepten

Tabelle 4-1: Module der Ökobilanz gemäß DIN EN 15978, grau hinterlegt die in vereinfachten Verfahren verwendeten Module

Lebenszyklusphase		Modul gemäß DIN EN 15978
Herstellungsphase	Rohstoffbeschaffung	A1
	Transport	A2
	Produktion	A3
Errichtungsphase	Transport (zur Baustelle)	A4
	Einrichtung/Einbau	A5
Nutzungsphase	Nutzung	B1
	Instandhaltung	B2
	Instandsetzung	B3
	Austausch	B4
	Modernisierung	B5
	Energieverbrauch im Betrieb	B6
	Wasserverbrauch im Betrieb	B7
Entsorgungsphase	Rückbau/Abriss	C1
	Transport	C2
	Abfallbehandlung	C3
	Beseitigung	C4
Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen	Potenzial für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling	D

4.2.2.2 Unsicherheiten bei der Durchführung einer Ökobilanzierung

Auch wenn in der bestehenden Zertifizierungspraxis deterministische Berechnungen der Ökobilanzen den Standard darstellen, unterliegt die Betrachtung der Umweltwirkungen von Prozessen einer Reihe von Unsicherheiten [Lloyd/Ries (2007)]. Die fehlende Berücksichtigung der Unsicherheiten wird jedoch als eines der zentralen Probleme bei der Verwendung der LCA identifiziert [Anand/Amor (2017)].

In der Literatur existiert daher eine Vielzahl an Studien, in welchen die Abbildung der Unsicherheiten bei der Erstellung von Ökobilanzen untersucht wird. Ein umfangreicher Überblick kann Marsh et al. (2023) entnommen werden. Die Autoren zeigen darin, dass insbesondere Monte-Carlo Methoden in der Literatur verwendet werden, um die Unsicherheiten in der LCA zu quantifizieren.

Wichtig ist hierbei, dass die Unsicherheiten teilweise aus Szenariounsicherheiten entspringen und teilweise epistemischer Natur sind, sofern bspw. Herstellungsprozesse nicht detailliert bekannt sind. Bei der Erzeugung von generischen EPD Datensätzen werden

daher in der Regel pauschale Sicherheitszuschläge von 10-30% berücksichtigt, um die Emissionen nicht zu unterschätzen [Figl/Kusche (2020)].

Einen erwähnenswerten Ansatz zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bei Verwendung der LCA hat Weißenberger (2016) entwickelt, der insbesondere auf den Spezifizierungsunsicherheiten in frühen Planungsphasen beruht. Hierbei wird ein möglicher Lösungsraum an Szenarien von Bauausführungen der Gebäudehülle und insbesondere Versorgungskonzepten aufgespannt, für die jeweils eine LCA berechnet wird. Die Unsicherheit quantifiziert Weißenberger über die Spannen zwischen den Ökobilanzergebnissen der verschiedenen Szenarien.

4.2.3 Ökonomische Bewertung

4.2.3.1 Lebenszykluskostenrechnung

Zur Abbildung der ökonomischen Dimension werden in der Regel projektbezogene Verfahren der Lebenszykluskostenrechnung (LCC) verwendet. Im Allgemeinen werden hierbei die zu Beginn anfallenden Investitionskosten für die Sanierungsmaßnahmen mit den Einsparungen, die sich in den Betriebskosten in der Nutzungsphase ergeben, verglichen, unabhängig davon, wer die jeweiligen Kosten zu tragen hat [Enseling/Vaché/Hinz 2015]. Dies ist vor allem mit dem ordnungsrechtlichen Verständnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu begründen. Im GEG wird in § 47 Abs. 1 eine Befreiung von der Pflicht der Durchführung energetischer Sanierungsmaßnahmen festgelegt, wenn die erforderlichen Aufwendungen innerhalb einer angemessenen Frist nicht durch die eintretenden Einsparungen erwirtschaftet werden können. Diese Definition der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung greift den Gedanken der Amortisation auf.

Die Amortisationsdauer bezeichnet in der Investitionsrechnung die Zeitspanne, die benötigt wird, bis die anfänglichen Investitionsauszahlungen durch die späteren Erträge (bzw. eingesparten Ausgaben) wieder zugeflossen sind. Diese kann statisch oder dynamisch, also unter Berücksichtigung des Zeitwertes der Zahlungen, berechnet werden, wobei die dynamische Berechnung den Status Quo in der Immobilienwirtschaft darstellt. Im Kontext der energetischen Sanierung ergibt sich die Amortisationsdauer als Zeitspanne, in der die diskontierten Kosteneinsparungen je Periode dem Wert der Investitionskosten C_{Invest} für die Durchführung der Sanierungsmaßnahme entsprechen. [Götze (2014)]

Die Amortisationsdauer kann auch als Zeitspanne interpretiert werden, für die der *Kapitalwert* der Investition C_0 den Wert Null annimmt. Der Kapitalwert beschreibt den Wert aller Einzahlungen und Auszahlungen im Betrachtungszeitraum T , die mit dem Kalkulationszinssatz r auf den Zeitpunkt $t = 0$ abgezinst werden. Verwendet man die in einer Periode t anfallenden Betriebskosten für Wartung und Instandsetzung $C_{\text{Betrieb},t}$, Versorgungskosten für den Bezug der Energieträger $C_{\text{Versorg},t}$, Ersatzkosten $C_{\text{Ersatz},t}$, die anfallen, wenn

ein Bauteil oder eine Komponente das Ende der Nutzungsdauer erreicht hat, sowie etwaige Erlöse aus der Veräußerung von im Quartier erzeugter Energie $C_{\text{Erlös},t}$, so ergibt sich der Kapitalwert gemäß Gl. 4-1. Eine Sanierungsvariante mit einem höheren Kapitalwert bzw. einer kürzeren Amortisationsdauer ist aus Investorensicht als wirtschaftlicher zu betrachten. [Götze (2014)]

$$C_0 = -C_{\text{Invest}} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{\text{Erlös},t} - C_{\text{Betrieb},t} - C_{\text{Versorg},t} - C_{\text{Ersatz},t}}{(1+r)^t} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Eine weitere Form der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Sanierungskonzepten ist die *Annuitätenmethode*. Hierbei wird der Kapitalwert C_0 mit einen Annuitätsfaktor, der vom Betrachtungszeitraum T und Kalkulationszinssatz r abhängt, multipliziert. Die Annuität an ergibt sich dann gemäß Gl. 4-2 als durchschnittliche jährliche Summe, die dem Investor über den Betrachtungszeitraum durch die Investition zusätzlich zur Verfügung steht. [Ermschel et al. (2016)] Auch die VDI 2067-1, die zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen verwendet wird, empfiehlt die Anwendung der Annuitätenmethode.

$$an = C_0 * \frac{(1+r)^T * r}{(1+r)^T - 1} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Wichtig für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist, dass diese immer nur relativ, d. h. gegen eine Alternativinvestition, zu ermitteln ist. Je nach Wahl dieser Alternativinvestition kann es sinnvoll sein, den Barwert der Lebenszykluskosten C_{BW} als additive Inverse des Kapitalwerts aus der Investitionsrechnung gemäß Gl. 4-3 zu bilden. Die Darstellung ist insbesondere dann vorzuziehen, wenn alle Kapitalwerte negativ sind. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gilt dann, dass die Variante mit dem geringsten Barwert der Lebenszykluskosten als die wirtschaftlichste eingestuft werden kann. Auch hier kann analog die Annuität der Lebenszykluskosten an_C gebildet werden, die als zusätzliche Ausgabe pro Periode über den Betrachtungszeitraum zur Durchführung der Sanierung interpretiert werden kann.

$$C_{\text{BW}} = (-1) * C_0 \quad \text{Gl. 4-3}$$

Neben den vorgestellten Methoden der projektbezogenen Lebenszykluskostenrechnung wurden in der Vergangenheit insbesondere Vollständige Finanzpläne verwendet, um die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen akteursbezogen zu bewerten [bspw. Pfnür/Müller (2013); Müller/Pfnür (2016)]. Im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit am Institut für Massivbau der TU Darmstadt wurde die Übertragung dieser Methodik auf den Quartiersmaßstab untersucht [Koert (2019)]. Diese setzt allerdings eine Vielzahl von Annahmen insbesondere hinsichtlich der Finanzierungsstruktur bei heterogenen Eigentümerverhältnissen voraus, was schnell zu einer Komplexität sowie zusätzlichen

Unsicherheiten und mangelnder Übertragbarkeit auf andere Untersuchungsgegenstände führen kann.

4.2.3.2 Unsicherheiten bei Verwendung der Lebenszykluskostenrechnung

Bei der Verwendung der Lebenszykluskostenrechnung treten eine Reihe von Unsicherheiten auf. Jede der im vorherigen Kapitel beschriebenen Kostenarten kann als unsicher bezeichnet werden. Die Investitionskosten bestehen hauptsächlich aus den Anschaffungskosten für die Bauteile und Anlagenkomponenten des Sanierungskonzepts. Baupreise unterliegen regionalen wie temporalen Schwankungen und sind daher als unsicher einzustufen. Erst wenn konkrete Angebote eingeholt wurden, können die Unsicherheiten verringert werden, die jedoch auch dann noch aufgrund von unvorhergesehenen Ereignissen im Beschaffungsprozess und Bauablauf Schwankungen unterliegen können [Kochendorfer et al. (2021)]. Einen guten Anhaltspunkt für mögliche Variationsbreiten liefern die vom Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKI) jährlich auf Basis von abgerechneten Projekten veröffentlichten statistische Kostenkennwerte für verschiedene Bauelemente oder Positionen. Die Angabe erfolgt dabei in Form von Mittelwerten sowie „von/bis“ Angaben, die übliche Streubereiche angeben, sowie „Min/Max“ Werten für Extrema. [BKI (2022a); BKI (2022b)]

Für alle anderen Kostengruppen wie Versorgung- oder Betriebskosten ist eine Fortschreibung über den Betrachtungszeitraum nötig. Die Unsicherheiten haben demnach einen starken aleatorischen Charakter. Die zukünftigen Entwicklungen werden häufig als Szenariounsicherheiten deklariert. Es kommen entweder Verfahren der Zeitreihenanalyse zur Prognose der zukünftigen Preisentwicklungen zur Anwendung, für welche die Unsicherheiten quantifiziert werden können, oder die Abbildung erfolgt in Form von Szenarien, die Entwicklungskorridore definieren. [Sun/Carmichael (2018)]

4.3 Überblick über bestehende Modellansätze energetischer Quartierskonzepte

Eine erste Bewertungsmethodik, welche die ökologische, ökonomische und energetische Dimension berücksichtigt und zudem die Energiebedarfe im Quartier mittels zeitlich hochaufgelöster dynamischer Simulationen berechnet, wurde von Weißmann (2017) entwickelt. Zu diesem Zweck hat Weißmann in der Simulationssoftware „IDA ICE“, neben der Modellierung von Typgebäuden zudem ein Wärmenetzmodell für Quartiere entworfen. Die Bewertungsmethodik berücksichtigt die ökonomische und ökologische Dimension mittels Lebenszyklusbetrachtungen und errechnet so den Kapitalwert sowie das GWP und den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf auf Basis einer LCC und LCA. Die Methodik basiert auf einer Bibliothek vordefinierter Profile für Gebäudeenergie-, Trinkwarmwasser- und Anwendungsstrombedarfe sowie Erzeugungslastprofile. Allerdings hat Weißmann die Methodik lediglich für Neubau-, nicht aber für Sanierungskonzepte entwickelt. Zudem ist die Methodik rein deterministisch. Im Zuge ihrer Anwendung untersucht Weißmann zwar einige Szenarien, bei denen jedoch nur einzelne Modellparameter wie Batteriegroßen oder Modulflächen der PV-Anlagen variiert werden, um kosten- bzw. emissionsoptimale Konfigurationen zu ermitteln.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Versorgung vernetzter Quartiere (E⁴Q)“ und als Grundlage für die vorliegende Arbeit wurde die vorgestellte Methodik durch den Autor weiterentwickelt. Die zugrundeliegende Profilibibliothek wurde für definierte Typquartiere umfassend vergrößert und die Methodik auf die Verwendbarkeit für Sanierungskonzepte erweitert. Dazu wurde insbesondere eine Fortschreibung des Ausgangszustands als Referenz für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit definiert. Als Projektergebnis ist zudem ein „Microsoft Excel“-basiertes Tool entstanden, mit dem auf Basis der erstellten Profilibibliothek Sanierungskonzepte für verschiedene Typquartiere bewertet werden können. Anwendende können Parameter der ökonomischen und ökologischen Bewertung frei anpassen und zudem können zukünftige Entwicklungen der Preise und Emissionsfaktoren über Szenarien abgebildet werden. Darüber hinaus findet in dieser Methodik jedoch noch keine Berücksichtigung von Unsicherheiten statt. [Müller/Koert (2022)]

Eine weitere multikriterielle Bewertungsmethodik für Quartierssanierungskonzepte hat Conci (2019) entwickelt. In dieser werden neben den energetischen auch die ökologischen und ökonomischen Dimensionen eines Versorgungskonzepts über den Lebenszyklus betrachtet. Neben dem Kapitalwert wird das GWP als Bewertungsindikator ausgegeben. Die Energiebedarfe des Quartiers werden hierbei über eine vereinfachte Wärme- und Strombilanz für die Gebäude in stündlichen Zeitschritten berechnet. Ein Vorteil der von ihr entwickelten Methodik ist die vollständige Implementierung in einer „Microsoft Excel“-Arbeitsmappe, sodass alle Berechnungsschritte nachvollziehbar sind und eine breite Anwendbarkeit gewährleistet ist. Auch in dieser Methodik findet keine Berücksichtigung

der Unsicherheiten statt, allerdings wird die Durchführung von Sensitivitätsanalysen explizit im Ausblick als weiterführender Forschungsbedarf genannt.

Auf Ebene der Einzelgebäude wurde die Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Bewertung von Energieversorgungsvarianten jedoch bereits vorgenommen. Burhenne (2013) hat eine Methodik auf Basis einer Monte-Carlo Analyse entwickelt, bei der eine Simulation des Energiebedarfs sowie eine anschließende LCC zur Berechnung eines Kapitalwerts unter Unsicherheit durchgeführt werden. Das Simulationsmodell ist dabei ein vereinfachtes Zonenmodell, mit dem stündliche Energiebedarfe ermittelt werden. Die Unsicherheiten werden für das Nutzerverhalten (Trinkwarmwasserbedarf, Luftwechsel, Anwesenheiten und Soll-Temperatur) durch normalverteilte Zufallsvariablen abgebildet. Als Output des Simulationsmodells wird der solare Deckungsgrad durch die Versorgung mit einem Solarkollektor verwendet, welcher in die LCC einfließt. Bei der LCC modelliert Burhenne die Investitionskosten sowie den Kalkulationszins über normalverteilte Zufallsvariablen. Die zukünftigen Entwicklungen der Inflationsrate und des Gaspreises werden über Prognoseverfahren der Zeitreihenanalyse abgebildet. Die ökologische Dimension wird jedoch vernachlässigt. Um den benötigten Stichprobenumfang für die Monte-Carlo Analyse zu minimieren, untersucht Burhenne verschiedene Verfahren der Zufallszahlgenerierung und kommt zu dem Schluss, dass eine Verwendung von Sobol-Sequenzen zu empfehlen ist.

4.4 Zusammenfassung und Implikationen für die Entwicklung eines stochastischen Bewertungsmodells

Durch den in diesem Kapitel gegebenen Überblick über die bestehenden Bewertungsmethoden ist deutlich geworden, dass in der Literatur bisher keine Methodik beschrieben wird, welche direkt für die Beantwortung der im Rahmen dieser Arbeit formulierten Forschungsfragen verwendet werden kann. Es bedarf demnach der Entwicklung einer eigenständigen Methodik. Insbesondere die Berücksichtigung von Unsicherheiten in Kombination mit der Verwendung von dynamischen Ingenieursmodellen zur zeitscharfen Abbildung der Energieflüsse im Quartier und einer multikriteriellen Bewertung verschiedener Bewertungsdimensionen findet in keiner der vorgestellten Bewertungsmethoden Anwendung.

Jedoch sind einige der bereits vorhandenen Ansätze durchaus übertragbar auf das vorliegende Bewertungsproblem. Dies umfasst die Betrachtung der verschiedenen Bewertungsdimensionen, die Weißmann (2017) vorgenommen hat. Auch die Definition von Unsicherheitsklassen und die resultierende Ableitung der Unsicherheiten einzelner Eingangsparameter des Energiebedarfsmodells, die Loga et al. (2021) vorgenommen haben (siehe Kapitel 3.7), wird als sehr zielführend angesehen. Burhenne (2013) hat darüber hinaus gezeigt, dass sich Monte-Carlo Simulationen gut eignen, um die Unsicherheiten bei dynamischen Simulationsmodellen zu berücksichtigen und sich darüber hinaus auch mit weiterführenden Bewertungsdimensionen koppeln lassen.

Ziel der im folgenden Kapitel 5 dargestellten Methodenentwicklung ist es daher, alle notwendigen Eigenschaften in einer Methodik zu vereinen und auf den gewählten Bewertungsanlass zu übertragen.

5 BEWERTUNG VON SANIERUNGSKONZEPTEN VON WOHNQUARTIEREN UNTER UNSICHERHEIT

5.1 Ablauf der Methodenentwicklung

Im letzten Kapitel wurde deutlich, dass es keine Bewertungsmethodik gibt, die alle erforderlichen Dimensionen eines Entscheidungsproblems bei der Auswahl eines Quartierssanierungskonzeptes betrachtet und dabei auch die zugrundeliegenden Unsicherheiten adäquat abbildet. Um eine solche Methodik im Folgenden zu entwickeln, müssen mehrere Schritte vollzogen werden, die in Abbildung 5-1 zusammenfassend als Schaubild dargestellt sind.

Zunächst werden in Kapitel 5.2 der Bewertungsanlass sowie das Bewertungsziel definiert. Zudem werden die Systemgrenzen der Bewertung festgelegt. Daran anschließend wird in Kapitel 5.3 eine grundlegende Methodik ausgewählt, mit der die Unsicherheiten berücksichtigt werden können. Innerhalb des Schrittes zur Festlegung der Berücksichtigungsart der Unsicherheiten werden in Kapitel 5.4 die zur Abbildung des Bewertungsziels geeigneten Bewertungsindikatoren und deren grundlegenden Berechnungsmethoden ausgewählt. Die Auswahl erfolgt anhand der Ergebnisse der in Kapitel 4 vorgestellten Literaturrecherche zu bereits bestehenden Modellen.

Zentraler Bestandteil der Methodik ist die Ermittlung der Quartiersenergiebedarfe unter Berücksichtigung der Unsicherheiten. Hierfür wird ein Modell in Kapitel 5.5 entwickelt. Im Anschluss erfolgt in Kapitel 5.6 die Beschreibung der Integration der ökologischen und ökonomischen Bewertungskomponenten in die Methodik sowie der Abbildung der diese Komponenten betreffenden Unsicherheiten. Der letzte Schritt der Methodenentwicklung ist die softwareseitige Umsetzung zur Integration aller Einzelkomponenten, die eine anschließende Anwendung ermöglicht und in Kapitel 5.7 dargestellt wird.

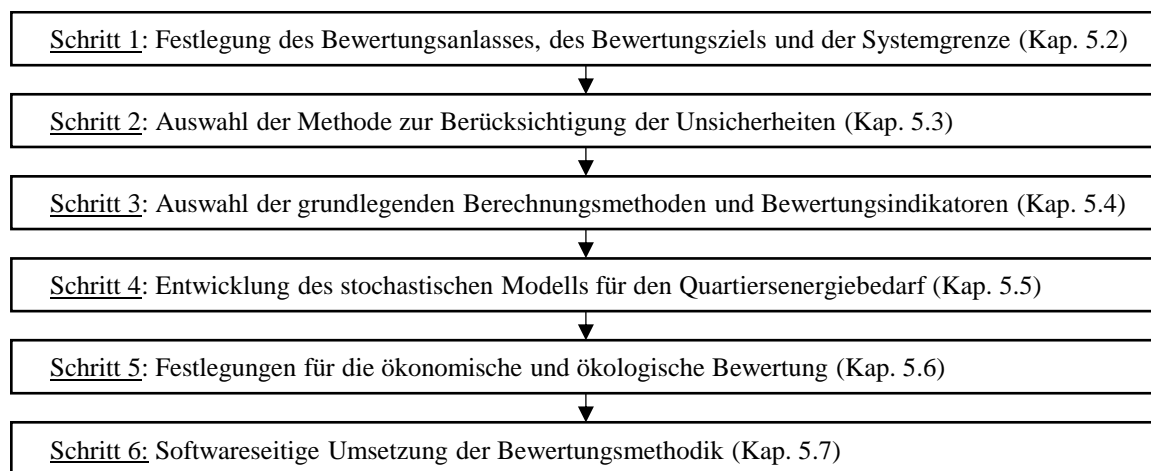


Abbildung 5-1: Ablauf der Methodenentwicklung

5.2 Festlegung des Bewertungsanlasses, Bewertungsziels und der Systemgrenzen

Anlass der Bewertung ist in der vorliegenden Arbeit die Fragestellung, welche Quartiersanierungskonzepte am besten geeignet sind, um die Energieeffizienz zu erhöhen und die Treibhausgasemissionen zu mindern. Die Bewertungssituation lässt sich daher in den Kontext der in Kapitel 2.1 vorgestellten, politisch und gesellschaftlich erforderlichen Transformation des Gebäudebestands einordnen. Im Regelfall steht die Fragestellung am Zeitpunkt eines Planungsprozesses, bei dem mehrere Sanierungskonzeptvarianten denkbar sind, jedoch Unklarheit in Bezug auf die zu realisierenden Minderungspotenziale und damit verbundenen Kosten herrscht.

Ziel ist es daher, dass unter Anwendung der zu entwickelnden Methodik verschiedene Sanierungsvarianten hinsichtlich der für die Entscheidenden relevanten Bewertungsdimensionen miteinander verglichen werden können. Diese umfassen gemäß den Ausführungen in Kapitel 4 die ökonomische, ökologische sowie energetische Dimension. Alle drei Dimensionen sind über einen, in Abhängigkeit von den jeweiligen Entscheidenden definierten Betrachtungszeitraum zu beurteilen. Dieser sollte aufgrund der Nutzungsdauern im Gebäudesektor in der Regel mehrere Jahrzehnte betragen. Die Bewertungsmethodik muss daher die Auswirkungen verschiedener Sanierungskonzepte in den drei Dimensionen über den festgelegten Betrachtungszeitraum adäquat abbilden können und miteinander vergleichbar machen. Zudem sollten die Ergebnisse anschaulich darstellbar sein, um eine Anwendung durch verschiedene Anspruchsgruppen zu ermöglichen.

Die Systemgrenzen der Bewertung sind so zu definieren, dass alle entscheidungsrelevanten Bestandteile abgebildet werden. Ein Quartier wurde im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 2.2 als Verbund von mindestens zwei Gebäuden inkl. der Komponenten der Anlagentechnik, die zur Deckung des Wärme- und Strombedarfs notwendig sind, definiert. Im Falle einer wärmevernetzten Versorgung beinhaltet dies auch die Leitungsinfrastruktur sowie Erzeugungsanlagen in einer Quartierszentrale. Die Betrachtung wurde zudem auf Wohngebäude eingeschränkt.

Diese Bestandteile sind in mehreren Zuständen zu betrachten. Offensichtlich sind die Zustände des Quartiers nach Durchführung der jeweiligen Sanierungskonzepte. Zusätzlich ist jedoch auch ein Referenzzustand für die Bewertung relevant, der sich aus dem vorhandenen Ausgangszustand des Quartiers ableitet. Zum einen ist für die Bewertung von Minderungspotenzialen und der Wirtschaftlichkeit nicht nur der Vergleich von Sanierungsvarianten untereinander, sondern auch immer die Gegenüberstellung mit dem Ausgangszustand notwendig. Zum anderen ist es somit möglich, die Bewertung schon vor dem Zeitpunkt durchzuführen, an dem die Entscheidung zur Durchführung *irgendeiner* Sanierung getroffen wurde. Sie lässt sich somit nutzen, um als Ergebnis den Anreiz für die Durch-

führung einer Sanierung zu geben, da im Ergebnis die Minderungspotenziale im Vergleich zum Ausgangszustand verdeutlicht werden können.

Da der Bewertungsgegenstand einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten berücksichtigen soll, ist eine Fortschreibung des Ausgangszustandes, der zum jetzigen Zeitpunkt in der gebauten Umwelt vorliegt, von Nöten. Bei dieser Fortschreibung sind jedoch die gesetzlichen Vorgaben des GEG zu berücksichtigen, die für den Austausch von Bauteilen der thermischen Gebäudehülle und Komponenten der Anlagentechnik gelten. Die Fortschreibung des Ausgangszustands über den Betrachtungszeitraum, die als Referenz für die Bewertung der Sanierungsvarianten fungiert, wird im Folgenden als *Basisvariante* bezeichnet, um Verwechslungen mit dem Begriff des Referenzgebäudes aus dem GEG zu vermeiden, obgleich sich der Zustand dieser Basisvariante aus ebenjenen Vorgaben des GEG ableitet.

Des Weiteren sind die zu betrachtenden Prozesse zu definieren, welche die aus ihnen entstehenden Energiemengen, Umweltwirkungen und Kosten umfassen. Wird eine Zählvariable t für die Jahre innerhalb des Betrachtungszeitraums T eingeführt, so beginnen die Prozesse innerhalb der Systemgrenzen für die Sanierungsvarianten ab der Herstellung der neu einzubringenden Anlagenkomponente und Bauteile zum Zeitpunkt $t = 0$. Zudem wird festgelegt, dass die Entsorgung der zum Zeitpunkt der Bewertung vorhandenen Anlagentechnik nicht innerhalb der Systemgrenzen liegt. Dieses Prinzip lässt sich als „Leerer-Keller“ beschreiben, bei dem zu Beginn und zum Ende des Betrachtungszeitraums keine Anlagentechnik vorhanden ist. Dies garantiert, dass auch bei einer wiederholten Anwendung der Methodik nach dem Ende des ersten Betrachtungszeitraums keine Prozesse doppelt erfasst werden und alle relevanten Auswirkungen nichtsdestotrotz bei nur einfacher Bewertung Berücksichtigung finden.

Daran schließen die Prozesse für den jährlichen Betrieb des Quartiers für jede Periode über den Betrachtungszeitraum $t = [1, \dots, T]$ an. Haben Komponenten das Ende ihrer Lebensdauer vor Ablauf des Betrachtungszeitraums erreicht, werden Austauschprozesse aus dem Rückbau und der Entsorgung der eingebrachten Komponenten sowie deren Wiederbeschaffung bzw. Wiedereinbau berücksichtigt. Die Basisvariante startet im Gegensatz zu den Sanierungsvarianten mit dem jährlichen Betrieb im Ausgangszustand für $t = 1$.

Zum Ende des Betrachtungszeitraums $t = T$ wird der Prozess des Rückbaus und der Entsorgung aller eingebrachten Anlagen- und Bauteile berücksichtigt. Gutschriften, die durch Recyclingpotenziale entstehen, sollten gemäß DIN EN 15978 lediglich separat ausgewiesen werden. Die Länge des Betrachtungszeitraums T kann frei durch die Anwendenden gewählt werden. Üblich sind im Gebäudebereich 50 Jahre [DGNB (2018)], allerdings kann auch ein kürzerer Zeitraum sinnvoll erscheinen, der sich bspw. an den politisch-motivierten Zielzuständen der Transformation zur Klimaneutralität (siehe Kapitel

5 Bewertung von Sanierungskonzepten von Wohnquartieren unter Unsicherheit

2.1.1) orientiert. Im Zuge der Anwendung der Methodik in Kapitel 6 wird hierauf nochmals eingegangen.

In Abbildung 5-2 sind die getroffenen Festlegungen zu den Prozessen innerhalb der Systemgrenzen graphisch zusammengefasst. Zur Unterscheidung der Varianten wird die Zählvariable $v \in [0, 1, \dots, V]$ eingeführt. Die Basisvariante wird dabei mit $v = 0$ definiert, die Anzahl der Sanierungsvarianten wird als V beschrieben.

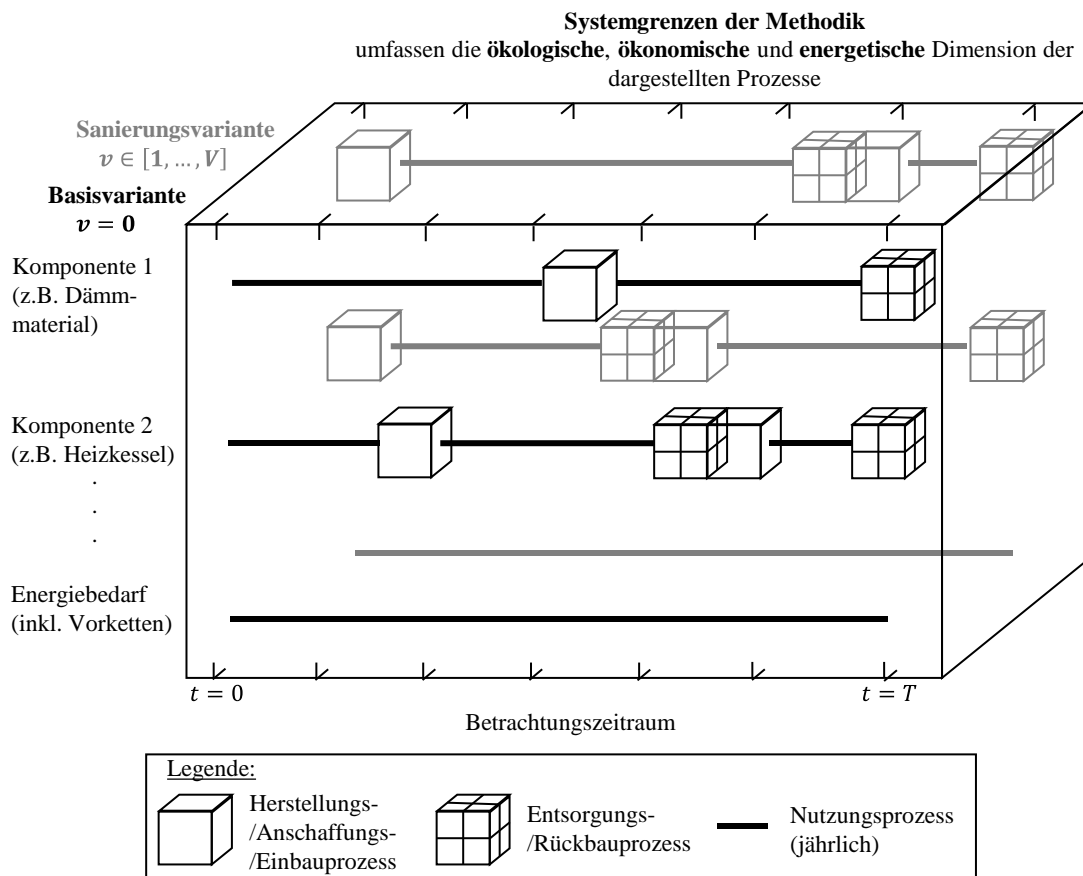


Abbildung 5-2: Darstellung der Systemgrenzen der Bewertungsmethodik über den Betrachtungszeitraum

Eine weitere Festlegung hinsichtlich der Systemgrenzen ist für die betrachteten Energieströme innerhalb des jährlichen Nutzungsprozesses zu treffen. Berücksichtigt werden die zur Deckung der Energiebedarfe in das Quartier eingebrachten Energieträger (Strom, fossile Energieträger, Biomasse) inkl. der für ihre Bereitstellung an der Quartierskante notwendigen Vorketten. Auch der Anwendungsstrombedarf sollte, im Gegensatz zum ordnungsrechtlichen Rahmen des GEG, mitberücksichtigt werden, da nur so die physikalischen Gegebenheiten in Bezug auf Eigennutzungsgrade von innerhalb des Quartiers erzeugter Energie richtig abgebildet werden können [Weißmann (2017); Müller et al. (2021)].

Damit einher geht auch die bessere Abbildbarkeit des Überschussstroms, der aus dem Quartier in das öffentliche Netz eingespeist wird. Ökonomische Auswirkungen in Form von Erlösen sind auf jeden Fall innerhalb der Systemgrenzen zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung von ökologischen Gutschriften aufgrund der Verdrängung von fossil erzeugtem Strom wird jedoch lediglich separat ausgewiesen. Dies folgt den Vorgaben der DIN EN 15978. Insbesondere in einem durch die fortschreitende Dekarbonisierung aufgrund des Zubaus erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen charakterisierten Stromnetz ist die Annahme einer Verdrängung von fossilem Strom bspw. durch PV-Strom in Mittagsstunden kritisch zu hinterfragen.

Eine weitere wichtige Voraussetzung für die möglichst genaue Abbildung der Energieflüsse ist eine hohe zeitliche Auflösung der energetischen Bilanzierung entsprechend der Ausführungen in Kapitel 2.5. Abbildung 5-3 stellt die getroffenen Festlegungen zu den Energiebedarfen der Nutzungsphase und ihrer ökologischen und ökonomischen Auswirkungen innerhalb der Systemgrenzen dar.

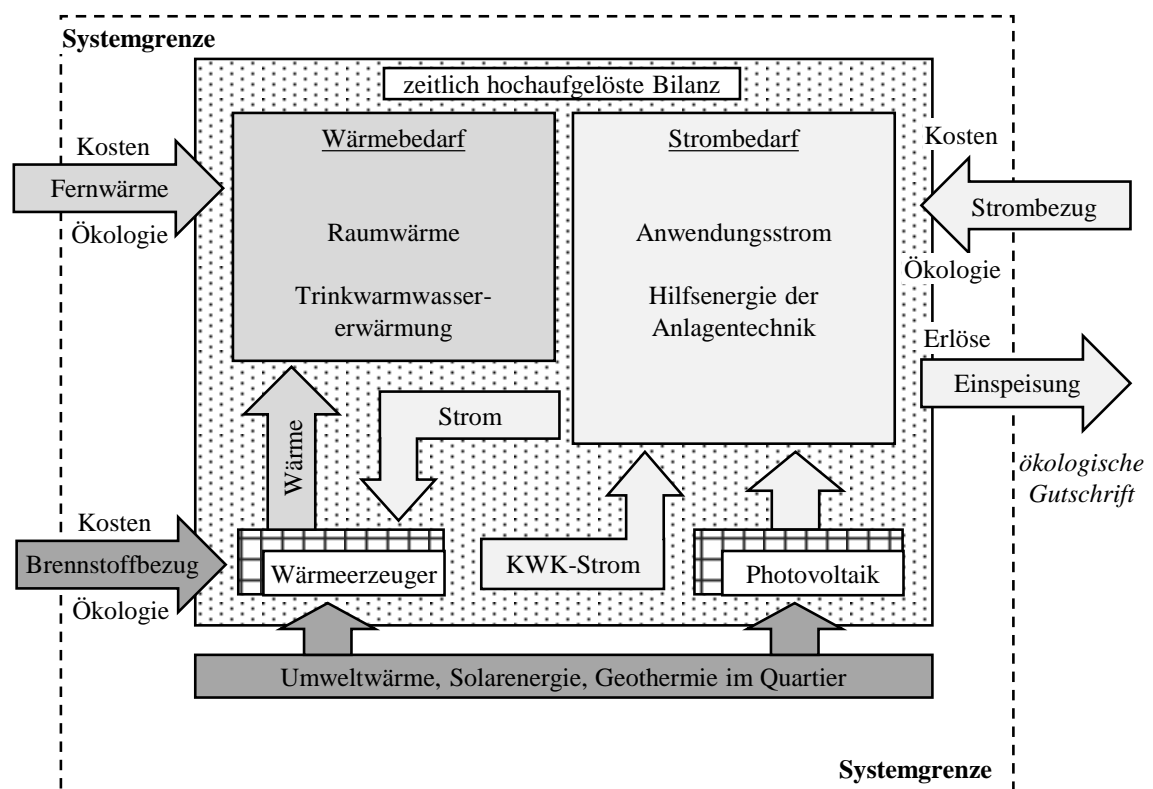


Abbildung 5-3: In der Nutzungsphase betrachtete Energieflüsse in den Systemgrenzen

An dieser Stelle soll zudem nochmals die Problematik der hier erfolgten Vernachlässigung des Verkehrssektors in der Bewertung diskutiert werden. Die zunehmende Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs führt mit der ebenfalls fortschreitenden

Elektrifizierung der Wärmeversorgung durch Wärmepumpen sowie der dezentralen Stromerzeugung mit PV-Anlagen zu einer Kopplung des Verkehrs-, Gebäude- und Stromsektors [BCG (2021)].

Durch die Diskrepanz zwischen den möglichen Erlösen aus einer Einspeisung von lokal erzeugtem Strom und den Ersparnissen durch Eigennutzung ist heute insbesondere die Nutzung von Elektrofahrzeugen ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit von PV-Konzepten [Ritter et al. (2021)]. Soll dies in einer Bewertungsmethodik abgebildet werden, wären die Energiebedarfe (in Form von Lastprofilen) der Ladevorgänge der Elektrofahrzeuge als Bestandteil in die Systemgrenzen aufzunehmen.

Um nun jedoch einen Variantenvergleich mit Varianten ohne Elektromobilität zu ermöglichen, müssten auch die Energiebedarfe von Personenkraftwagen mit Verbrennungsmotoren sowie anderer Mobilitätsformen in die Bewertung mit integriert werden. All diese Komponenten sind dann zusätzlich mit den ihnen zugrundeliegenden Unsicherheiten abzubilden. Dies würde den Betrachtungsrahmen dieser Arbeit deutlich ausdehnen und den Fokus weg von den Gebäuden und Versorgungskonzepten lenken und wird daher nicht realisiert.

Nichtsdestotrotz ist damit die Problematik verbunden, dass insbesondere die ökonomischen Potenziale einer Sektorkopplung im Bereich von Konzepten mit Eigenstromerzeugung nicht berücksichtigt werden können. Dies wird im Rahmen der Methodenentwicklung bedacht und im Laufe der Arbeit wird daher an den entsprechenden Stellen ein Ausblick gegeben, wie sich die Methodik in weiteren Schritten erweitern lässt, um auch diese Potenziale abbilden zu können.

5.3 Definition der Methode zur Berücksichtigung der Unsicherheiten

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Systemgrenzen definiert wurden, soll im Folgenden die Methode zur Berücksichtigung der Unsicherheiten festgelegt werden. In Kapitel 3.2 wurden die möglichen Methoden der Unsicherheitsquantifizierung dargestellt. Es wurde deutlich, dass für Energiebedarfsmodelle insbesondere die Monte-Carlo Analyse (MCA) eine weitverbreitete und passende Methodik zur Berücksichtigung der Parameterstreuungen darstellt. Auch bei der Ökobilanzierung (LCA) als Standardmethode der lebenszyklusbezogenen ökologischen Bewertung wird die MCA häufig verwendet (siehe Kapitel 4.2.2.2). Zudem hat sich durch die Arbeit von Burhenne (2013) auch die gemeinsame Anwendbarkeit einer MCA für ein Energiebedarfsmodell und eine Lebenszykluskostenrechnung (LCC), zur Bewertung der ökonomischen Dimension als geeignet gezeigt (siehe Kapitel 4.3).

Voraussetzung für die Anwendung ist jedoch die Abbildung der Modelleingangsparameter über Zufallsvariablen, denen eindeutige Wahrscheinlichkeitsfunktionen zugeordnet werden

können. Für einen Großteil der Parameter der Energiebedarfsmodelle kann eine solche Zuordnung aus der Literatur abgeleitet werden (siehe Kapitel 3.4). Insbesondere bei den für die ökologische und ökonomische Bewertungsdimensionen notwendigen Parametern, die durch externe Vorgaben definiert sind und sich über den Betrachtungszeitraum ändern, ist eine solche Zuordnung jedoch oft nicht möglich (siehe Kapitel 4.2.2.2, 4.2.3.2). Hierbei kann die Bewertung als Hilfsmittel für die Entscheidung unter Ungewissheit charakterisiert werden, sodass eine Abbildung der Unsicherheiten über einen Szenarienraum für verschiedene zukünftige Umweltzustände sinnvoll erscheint (siehe Kapitel 4.1.2, 3.6).

In dieser Arbeit wird daher eine Kombination beider Methoden zur Abbildung der Unsicherheiten in der Bewertung verwendet. Insbesondere die Energiebedarfsmodellierung sowie Teile der ökologischen und ökonomischen Bewertung, die zu Beginn des Betrachtungszeitraums stehen (bspw. Anschaffungskosten, Lebensdauern), werden in eine Monte-Carlo Analyse mit dem Stichprobenumfang N eingebettet. Für die entsprechenden Parameter sind daher Zufallsvariablen zu definieren und deren Verteilungsfunktionen festzulegen. Dies wird in Kapitel 5.5.3 für das Energiebedarfsmodell und in 5.6.2 für die Parameter der Bewertungsmethoden der anderen Dimensionen vorgenommen.

Vor der Monte-Carlo Analyse werden zudem Szenarien gebildet, in denen die über den Betrachtungszeitraum veränderlichen Modellparameter (bspw. Energiepreise), deren Unsicherheiten eher aus externen Quellen außerhalb der Systemgrenzen resultieren, variiert werden. Als Zählvariable der Szenarien wird $z \in [0,1, \dots, Z]$ eingeführt, mit Z als Anzahl betrachteter Szenarien. Für jedes Szenario z sind nun im Rahmen der Monte-Carlo Analyse für jede Stichprobe n die Quartiersbewertungen durchzuführen, um die Bewertungsindikatoren zu berechnen.

Der vorgestellte Rahmen der Berücksichtigung der Unsicherheiten ermöglicht es die Bewertungsergebnisse nicht mehr als Skalare, sondern anhand ihrer statistischen Kennzahlen, bspw. in Form von in Boxplots dargestellten Quantilwerten für die jeweiligen Szenarien anzugeben. Abbildung 5-4 zeigt schematisch das festgelegte Konzept der Berücksichtigung der Unsicherheiten für die verschiedenen Bewertungsdimensionen. Die Auswahl der grundlegenden Bewertungsmethoden und der daraus resultierenden Bewertungsindikatoren, die verwendet werden, um die energetische, ökonomische und ökologische Dimension abzubilden, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

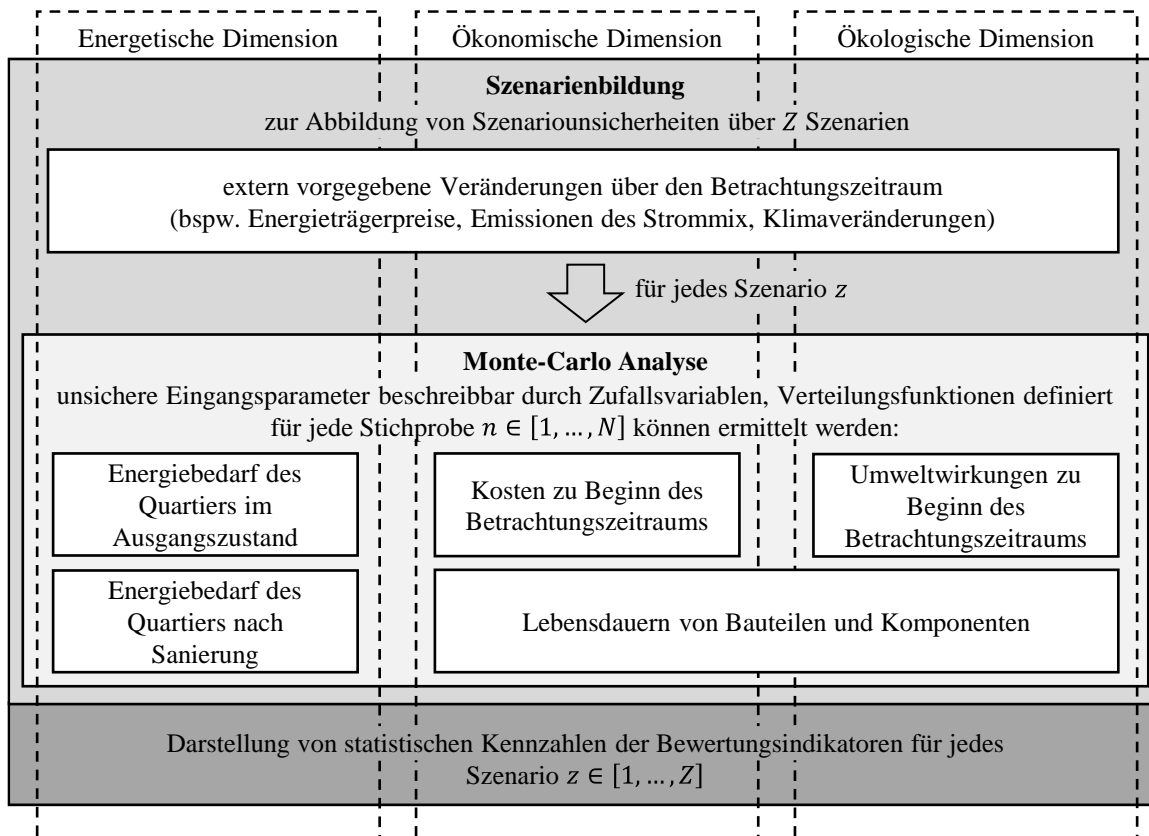


Abbildung 5-4: Grundkonzept der Berücksichtigung der Unsicherheiten und Ungewissheiten im Rahmen der zu entwickelnden Bewertungsmethodik

5.4 Auswahl der Bewertungsindikatoren und ihrer Berechnungsmethoden

5.4.1 Erläuterungen zum Indikatorensatz

Zur Abbildung der Erreichung der voran dargestellten Bewertungsziele sind im nächsten Schritt geeignete Bewertungsindikatoren auszuwählen sowie deren Berechnungsmethoden im gesetzten Rahmen der Unsicherheitsbetrachtung festzulegen. Wie in Kapitel 5.2 festgelegt, sollen mit der Methodik die Auswirkungen der verschiedenen Sanierungsvarianten in den drei Dimensionen Energie, Ökologie und Ökonomie jeweils in einer Betrachtung über einen mehrjährigen Zeithorizont bewertet werden können. Mit der Gesamtheit der gewählten Indikatoren soll das Ziel der Bewertung, d.h. ein Variantenvergleich, erreichbar gemacht werden.

Prinzipiell ist dafür die Verwendung einer Mehrzahl von Indikatoren als sinnvoll zu erachten, sofern diese einen zusätzlichen Informationsgewinn bieten. Dementgegen stehende Nachteile aus einem erhöhten Rechenaufwand können durch eine softwareseitige Implementierung der Berechnungen ausgeglichen werden. Eine zu große Anzahl an gewählten Indikatoren kann die Darstellung der Bewertungsergebnisse jedoch unübersichtlich machen. Im Rahmen der Methodenentwicklung wird daher die Entscheidung getroffen, den kleinstmöglichen Indikatorensatz, in dieser Arbeit als *Kernindikatoren*

bezeichnet, als Bewertungsgrundlage zu wählen, gleichzeitig aber in der softwareseitigen Implementierung die Möglichkeit der Ableitung und Transformation weiterer Indikatoren, als *erweiterte Indikatoren* bezeichnet, für die jeweiligen Anwendungsgruppen zu ermöglichen.

Ein Beispiel sei hierbei die Darstellung einer Größe als absoluter Wert oder als flächenspezifische Angabe. In der Praxis sind oft flächenspezifische Angaben gewählt, um Projekte unterschiedlicher Größe vergleichbar zu machen. Für den Variantenvergleich eines festgelegten Untersuchungsgegenstandes ist jedoch der Flächenbezug nicht notwendig. Ein weiteres Beispiel ist die Darstellung der Indikatoren als absolute Größen für jede betrachtete Variante oder als Darstellung von Differenzen zwischen einer Sanierungsvariante und der Basisvariante. In der ökologischen Dimension lässt sich argumentieren, dass eine Differenz im Sinne einer Emissionsminderung ebenso als gewünschter Indikator anzusehen ist wie die absoluten Emissionsmengen, die für die Betrachtung der noch verbleibenden Emissionsbudgets verwendet werden können. Sind die absoluten Emissionsmengen als Kernindikatoren festgelegt, lassen sich die Differenzen als erweiterte Indikatoren jederzeit ableiten, sofern die Berechnungsschritte softwareseitig implementiert sind.

Durch die in Kapitel 5.3 vorgenommene Festlegung der Berücksichtigung der Unsicherheiten über eine Monte-Carlo Analyse in Verbindung mit einer Szenarienbildung sind die Bewertungsindikatoren jeder Variante v für jede Stichprobe n der MCA und jedes Szenario z zu bewerten. Werden die Stichprobenergebnisse zusammengefasst, lassen sich für jede Variante für jedes Szenario statistische Kennzahlen wie Quantilwerte der Indikatoren ermitteln. Deren Darstellung kann bspw. in Form von Boxplots erfolgen.

5.4.2 Auswahl der energetischen Bewertungsindikatoren

Der Deckungsgrad $\eta_{cover,v,n}$ einer Variante v in der Stichprobe n berechnet sich gemäß Gl 5-1 aus dem Verhältnis der durch erneuerbare Energieträger im Quartier selbst produzierten Energiemenge $Q_{EE,prod,v,n}$ und dem Jahresendenergiebedarf des Quartiers $Q_{f,v,n}$. Diese Größe kann als ein Indikator für den Autarkiegrad einer Versorgungsvariante verwendet werden und wird daher als Kernindikator festgelegt.

$$\eta_{cover,v,n} = \frac{Q_{EE,prod,v,n}}{Q_{f,v,n}} \quad \text{Gl. 5-1}$$

$Q_{EE,prod,v,n}$ ist hierbei gemäß Gl. 5-2 die Summe der Stromproduktion aus PV $Q_{PV,prod,v,n}$ sowie der erzeugten Wärmeenergie aus Solarthermie $Q_{ST,prod,v,n}$ und Geothermie $Q_{Geo,prod,v,n}$.

$$Q_{EE,prod,v,n} = Q_{PV,prod,v,n} + Q_{ST,prod,v,n} + Q_{Geo,prod,v,n} \quad \text{Gl. 5-2}$$

Der Endenergiebedarf des Quartiers $Q_{f,v,n}$ ergibt sich aus der Summe der Energiebedarfe $Q_{m,f,v,n}$ aller Brennstoffe $m \in [1, \dots, M]$, der vor Ort produzierten Energiemenge $Q_{EE,prod,v,n}$ und dem Strombezug aus dem öffentlichen Netz $Q_{purchase,v,n}$ abzüglich der ins öffentliche Netz eingespeisten Strommenge $Q_{feed,f,v,n}$ gemäß Gl. 5-3.

$$Q_{f,v,n} = \sum_{m=1}^M Q_{m,f,v,n} + Q_{purchase,v,n} + Q_{EE,prod,v,n} - Q_{feed,v,n} \quad \text{Gl. 5-3}$$

Für die energetische Dimension ist zudem eine Bewertung der Energieeffizienz für eine Entscheidung interessant. Denkbar wäre also die Nutzung des Endenergiebedarfs oder des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs des Quartiers als Bewertungsindikator. Der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf kann dabei auch zur Abbildung der ökologischen Bewertungsdimension beitragen und wird daher in Kapitel 5.4.3 erörtert.

Darüber hinaus liefert auch der von Weißmann (2017) verwendete Indikator des Eigennutzungsgrads von im Quartier erzeugten Stroms $\eta_{self,v,n}$ einer Variante v in der Stichprobe n eine zusätzliche Information bezüglich einer Überdimensionierung von Anlagenkonzepten. Durch die wirtschaftlichen Randbedingungen wird eine solche Überdimensionierung allerdings auch durch die Lebenszykluskosten bewertbar sein. Der Eigennutzungsgrad errechnet sich gemäß Gl. 5-4 über das Verhältnis des eingespeisten Stroms aus PV- oder KWK-Erzeugung im Quartier $Q_{PV,feed,v,n}$ bzw. $Q_{KWK,feed,v,n}$ und der Gesamtmenge des erzeugten Stroms aus PV und KWK $Q_{PV,prod,v,n}$ und $Q_{KWK,prod,v,n}$ und wird als erweiterter Indikator aufgenommen.

$$\eta_{self,v,n} = 1 - \frac{Q_{PV,feed,v,n} + Q_{KWK,feed,v,n}}{Q_{PV,prod,v,n} + Q_{KWK,prod,v,n}} \quad \text{Gl. 5-4}$$

5.4.3 Auswahl der ökologischen Bewertungsindikatoren

Zur Bewertung der ökologischen Dimension wird als Kernindikator das Treibhauspotenzial $GWP_{v,z,n}$ in kg CO_{2,äq} einer Variante v im Szenario z und der Stichprobe n verwendet. Der Indikator lässt sich im Rahmen einer Ökobilanzierung (siehe Kapitel 4.2.2.1) über eine Sachbilanz für den Betrachtungszeitraum gemäß Gl. 5-5 ermitteln. Dabei wird für jeden Herstellungs- oder Entsorgungsprozess j jeweils das Produkt aus der Anzahl der Prozesse $anz_{LCA,v,j,n}$, der Input-/Outputmenge des Prozesses $m_{LCA,v,j,n}$ und dem spezifischen Treibhauspotenzial des Prozesses pro Mengeneinheit $gwp_{j,n}$ gebildet. Zudem werden für die Nutzungsphase die jährlichen Energiemengen $Q_{m,f,v,n}$ der Energieträger m sowie des Strombezugs $Q_{purchase,v,n}$ des Quartiers mit ihren spezifischen Treibhauspotenzialen pro Mengeneinheit $gwp_{m,z,t}$ für jede Periode t berücksichtigt. Die Entwicklung der spezifischen Treibhauspotenziale ist dabei gemäß den Ausführungen in Kapitel 5.3 Teil der

Szenariougewissheiten und ist daher für jedes Szenario z zu definieren. Die jeweiligen spezifischen Treibhauspotenziale bleiben während der MCA über alle Stichproben konstant. Die anderen Bestandteile können hingegen zwischen den Stichproben variieren, was durch den Index n verdeutlicht wird. Bei der Wirkungsabschätzung werden in Anlehnung an DGNB (2018) und Weißmann (2017) nur die Module der vereinfachten Ökobilanz A1–A3, B6, C3–C4 und (separat ausgewiesen) D berücksichtigt.

$$GWP_{v,z,n} = \sum_{j=1}^J an_{LCA,j,v,n} * m_{LCA,j,v,n} * gwp_{j,n} + \sum_{t=1}^T \sum_m Q_{m,t,v,n} * gwp_{m,z,t} + Q_{purchase,v,n} * gwp_{Strom,z,t} \quad Gl. 5-5$$

Über das Treibhauspotenzial können die für die Transformation des Gebäudesektors maßgebenden Emissionen der verschiedenen Varianten bewertet und verglichen werden. Dies ist für eine Abbildung der ökologischen Dimension daher ausreichend. Nichtsdestotrotz ist insbesondere im ordnungsrechtlichen Kontext des GEG der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf PE_{ne} als Kenngröße festgelegt, die sowohl eine ökologische als auch energetische Dimension umfasst. Im GEG wird der Primärenergiebedarf jedoch nicht über den Lebenszyklus, sondern lediglich für einige der Energiemengen der Nutzungsphase erfasst (siehe Kapitel 2.1.2). Eine solche Einschränkung spiegelt nicht die kompletten Ressourceninanspruchnahmen der Varianten wider und ist deshalb im Rahmen der definierten Bewertungsziele nicht passend. Eine Aufnahme des Indikators als erweiterter Indikator kann dennoch sinnvoll sein, um einen Indikator für die Energieeffizienz einer Maßnahme in Verbindung mit den ökologischen Ressourceninanspruchnahmen zu haben, der die Auswirkungen aller Energieträger vereint.

Als weiterer erweiterter Indikator lässt sich die Treibhausgasemissionsdifferenz $\Delta GWP_{v,z,n}$ zwischen der Basisvariante und der Sanierungsvariante v als Emissionsminderung bei Durchführung der Sanierung mit Gl. 5-6 berechnen. Zusätzlich kann es für Anwendende auch interessant sein, die ökologischen Indikatoren als spezifische, auf die Nutz- oder Wohnfläche bezogene Größen anzugeben.

$$\Delta GWP_{v,z,n} = GWP_{0,z,n} - GWP_{v,z,n} \quad Gl. 5-6$$

5.4.4 Auswahl der ökonomischen Bewertungsindikatoren

Zur Bewertung der ökonomischen Dimension wird der Barwert der Lebenszykluskosten $C_{BW,v,z,n}$ in € einer Variante v im Szenario z und der Stichprobe n verwendet. Dieser berechnet sich gemäß Gl. 5-7 durch die Summe der Anschaffungskosten $C_{Invest,v,n}$ in der Periode $t = 0$ und den mit dem Kalkulationszins r_z diskontierten Versorgungs- ($C_{Versorg,t,v,z,n}$), Betriebs- ($C_{Betrieb,t,v,n}$) und Ersatzkosten $C_{Ersatz,t,v,z,n}$ sowie den Erlösen $C_{Erlös,t,v,z,n}$ jeder Periode t des Betrachtungszeitraums T . Die zukünftige Entwicklung der Größen über den Betrachtungszeitraum wird dabei analog zum Vorgehen beim Treibhauspotenzial $GWP_{v,z,n}$ in verschiedenen Szenarien z abgebildet. Im Rahmen der Arbeit werden die realen Kostenentwicklungen verwendet. Der Kalkulationszins r_z ist demnach als Realzins zu definieren.

$$C_{BW,v,z,n} = C_{Invest,v,n} + \sum_{t=1}^T \frac{(C_{Versorg,t,v,z,n} + C_{Betrieb,t,v,n} + C_{Ersatz,t,v,z,n} - C_{Erlös,t,v,z,n})}{(1+r_z)^t} \quad \text{Gl. 5-7}$$

Als erweiterte Indikatoren können zusätzlich eine Annuität der Lebenszykluskosten $an_{C,z,v}$ in €/a aus dem Barwert mit Gl. 5-8 abgeleitet werden sowie Differenzen zwischen der Basisvariante und der Sanierungsvariante $\Delta C_{BW,v,z,n}$ in € als zusätzliche Kosten bzw. Erlöse aufgrund der Durchführung einer Sanierung mit Gl. 5-9 berechnet werden. Zudem kann es für Anwendende interessant sein, die ökonomischen Indikatoren als spezifische, auf die Nutz- oder Wohnfläche bezogene Größen anzugeben.

$$an_{C,v,z,n} = C_{BW,v,z,n} * \frac{(1+r_z)^T * r_z}{(1+r_z)^T - 1} \quad \text{Gl. 5-8}$$

$$\Delta C_{BW,v,z,n} = C_{BW,v,z,n} - C_{BW,0,z,n} \quad \text{Gl. 5-9}$$

Des Weiteren können neben dem Vergleich der Lebenszykluskosten der Varianten als Maß der Wirtschaftlichkeit auch die zu Beginn des Betrachtungszeitraums durch die unmittelbare Umsetzung des Sanierungskonzepts anfallenden Investitionskosten $C_{Invest,v,n}$ in € ein aus ökonomischer Perspektive relevanter Bewertungsindikator sein. Oft muss ein verfügbares Budget eingehalten werden, sodass Varianten, die dieses überschreiten, als nicht durchführbar ausscheiden, auch wenn die ökonomischen Auswirkungen über den Lebenszyklus im Vergleich zu anderen Varianten vorteilhaft wären. Die Investitionskosten gehen als Teil der Lebenszykluskosten in die Berechnung des Barwerts ein, werden also entsprechend in der Methodik berechnet, allerdings nur den erweiterten Indikatoren zugeordnet, die rein informativ oder zur Entscheidungsfindung bei einer bestehenden Budgetbeschränkung verwendet werden können.

Allen vorgestellten ökonomischen Bewertungsindikatoren ist gemein, dass diese die ökonomische Dimension einer Sanierungsvariante nur gebündelt für alle Prozesse im Quartier darstellen. Ein Akteursbezug ist durch die gewählten Berechnungsverfahren der Indikatoren nicht möglich. In der Realität werden die Anwendenden der Bewertungsmethodik jedoch nur die Auswirkungen auf die eigene wirtschaftliche Situation als Bewertungsindikator zu Rate ziehen wollen. Aufgrund einer Vielzahl an möglichen Akteurskonstellationen und der Prämisse der möglichst breiten Anwendbarkeit der Methode wird jedoch darauf verzichtet, den Akteursbezug in der Bewertung darzustellen. Sollte sich herausstellen, dass eine Sanierungsvariante für das Quartier in seiner Gesamtheit die niedrigsten Kosten verursacht, so lässt sich über die Ausgestaltung von Geschäftsmodellen auch eine vorteilhafte Aufteilung der Kosten auf die verschiedenen Anspruchsgruppen vornehmen. Dabei anfallende Transaktionskosten sind separat zu berücksichtigen, was allerdings außerhalb des Untersuchungsrahmens dieser Arbeit liegt.

5.4.5 Zusammenfassung der gewählten Bewertungsindikatoren und Berechnungsgrundlagen

In Abbildung 5-5 sind aufbauend auf der Darstellungsweise von Abbildung 5-4 die ausgewählten Bewertungsindikatoren mit ihren jeweiligen Berechnungsmethoden im Kontext der gewählten Methode zur Berücksichtigung der Unsicherheiten dargestellt. Es sei explizit anzumerken, dass sich die Berechnungsmethoden, welche auf einer Lebenszyklusbetrachtung basieren, fundamental von den ordnungsrechtlichen Vorgaben im GEG unterscheiden. Die Bewertungsergebnisse können daher nicht für den ordnungsrechtlichen Nachweis verwendet werden. Allerdings wird nur so die Abbildung des Lebenszyklus und damit aller relevanten Auswirkungen der Sanierungsentscheidung ermöglicht. Die Aufnahme der Lebenszyklusbetrachtung wird im Rahmen einer weiteren Überarbeitung des GEG bereits vermehrt gefordert [Pehnt et al. (2021)] und in den zuständigen Ministerien diskutiert [BMWK/BMWSB (2022)].

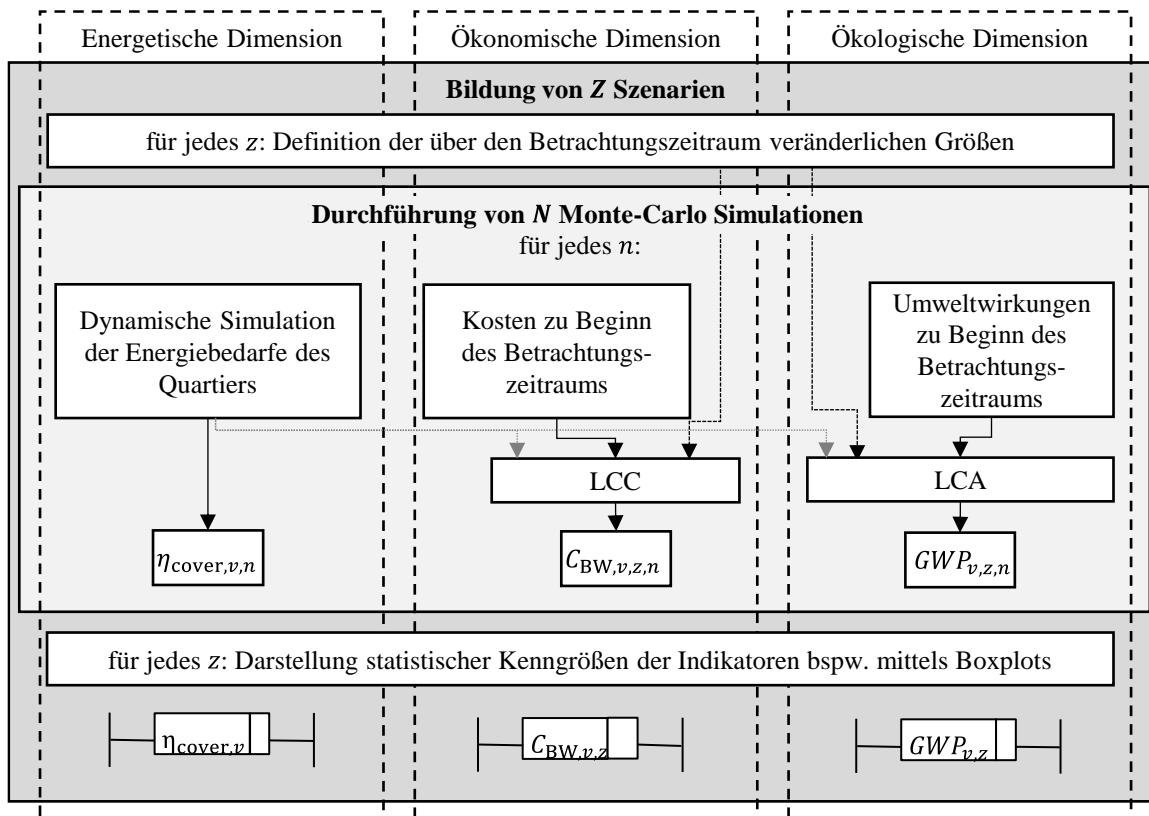


Abbildung 5-5: Darstellung des Bewertungsablaufs zur Ermittlung der Bewertungsindikatoren einer Variante v

In Kapitel 4.1.2 wurde dargestellt, dass bei einer hier vorliegenden multikriteriellen Bewertung geeignete Entscheidungsregeln festzulegen sind, um zu einer eindeutigen Lösung des Bewertungsproblems zu gelangen. Dies bedingt jedoch eine Gewichtung der verschiedenen Dimensionen. Im vorliegenden Bewertungsfall wird es als nicht zielführend angesehen, eine Gewichtung zwischen den Bewertungsindikatoren vorzugeben, um die Bewertung auf einen einzigen Indikator zu verdichten. Stattdessen soll den Anwendenden selber die Möglichkeit gelassen werden, verschiedene Dimensionen zu fokussieren. So könnten bspw. Budgetrestriktionen bzgl. verfügbarer Emissionen oder Kosten sowie Mindestwerte für den erneuerbaren Deckungsgrad vorgegeben werden, um den Lösungsraum der Varianten einzugrenzen. Auch ist es denkbar aus dem Treibhauspotenzial und den Lebenszykluskosten einen weiteren Indikator abzuleiten, der die Kosten pro Emissionsminderung darstellt und somit zwei Bewertungsdimensionen vereint, dabei allerdings verfügbare Budgets nicht mehr darstellen kann. All diese Entscheidungen sollen durch die Bewertungsmethodik per se nicht vorgegeben werden und sind daher hier nicht als Teil der Methodik dargestellt.

5.5 Entwicklung des stochastischen Quartiersenergiebedarfsmodells

5.5.1 Auswahl der grundlegenden Modellierung

Im Zuge der Vorstellung der verschiedenen Arten der Energiebedarfsmodellierung in Kapitel 2.5.1 wurde deutlich, dass insbesondere für die Abbildung von Versorgungskonzepten mit dem Einbezug erneuerbarer Energieträger und für den technischen Variantenvergleich die dynamische Modellierung einem statischen Monatsbilanzverfahren vorzuziehen ist. Bei der Wahl der Systemgrenzen wurde daher festgelegt, dass zur korrekten Abbildung der Energieströme in der Nutzungsphase eine hohe zeitliche Auflösung des Quartiersenergiebedarfsmodells nötig ist (siehe Kapitel 5.2). Der Jahresquartiersenergiebedarf ist daher im Rahmen der Methodik durch eine dynamische Simulation zu ermitteln. Die Methodik ist dabei prinzipiell unabhängig von der Wahl der Simulationsumgebung. Lediglich die softwareseitige Umsetzung der Algorithmen zur Erstellung der Modelle in Abhängigkeit der definierten Modellvariablen ist bei einer Übertragung auf eine andere Simulationsumgebung anzupassen.

Für die spätere Anwendung in Kapitel 6 sowie für die bereits im Laufe der Methodentwicklung notwendigen Untersuchungen ist jedoch eine Simulationsumgebung für diese Arbeit auszuwählen. Dies erfolgt aufgrund pragmatischer Überlegungen zu bereits vorhandener Software und bereits geleisteten Vorarbeiten. Als Simulationsumgebung kommt daher „IDA ICE“ der Firma EQUA SE zum Einsatz. Vorteilhaft für die Verwendung im Rahmen dieser Arbeit ist zum einen die Möglichkeit der Einsehbarkeit des Quellcodes aller Modellkomponenten in einem sogenannten „Advanced Level“, sodass Berechnungsschritte transparent nachvollzogen werden können. Im „Advanced Level“ können die Komponenten zudem beliebig angepasst und modular miteinander kombiniert werden, um komplexe Versorgungssysteme abzubilden. Zum anderen bietet das Programm die Möglichkeit Skriptbefehle auszuführen, mit denen Automatisierungsprozesse für eine Vielzahl von Modellerstellungen und Simulationen von anderen Programmen aus durchgeführt werden können und somit die Nutzbarkeit im Rahmen einer Monte-Carlo Analyse gewährleistet wird.

Des Weiteren lassen sich die Vorarbeiten von Weißmann (2017) zur Modellierung der Quartiersnetze nutzen. Das Modell beruht auf einem zweistufigen Prozess, bei dem zunächst die ans Wärmenetz angeschlossenen Einzelgebäude simuliert werden, um damit Netzanschlussprofile zu erzeugen. Diese Anschlussprofile werden in einem zweiten Schritt als Input eines Netzmodells verwendet, welches die Leitungen sowie die zentralen Wärmeerzeugungsanlagen abbildet. Dieses zweistufige Verfahren verkürzt die Rechenzeit erheblich und wurde in der entsprechenden Ausarbeitung von Weißmann bereits für Neubauprojekte validiert. In Kapitel 5.7 ist die softwareseitige Umsetzung der Energiebedarfsmodellierung dargestellt.

Für die Einzelgebäudemodelle ist zudem die Zonierung und geometrische Detaillierung in der Modellierung festzulegen. Den Ausführungen in Kapitel 3.4.1 und Kapitel 3.5 ist zu entnehmen, dass gemäß der Literatur, bei verfügbarer Rechenkapazität und kleinen Quartiersausmaßen, eine möglichst stockwerkweise Zonierung der Gebäude modelliert werden sollte. Um die Abweichungen des Nutzerverhaltens ordentlich darstellen zu können, wird die Zonierung wohnungsweise vorgenommen. Dies stellt einen hohen Detaillierungsgrad dar, der somit auch einen gewissen Zeitaufwand in der Modellierung erfordert. Um hier Einsparungen zu erhalten, werden alle Fenster als verbundenes Fensterelement je Wand zusammengefasst. Eigene Überprüfungen haben gezeigt, dass sich die Abweichungen auf die Energiebedarfe unter 0,2 % beschränken, bei einer Einsparung von 10-15 % der Simulationsdauer. Dies deckt sich mit den Ergebnissen anderer Studien bspw. den Ausführungen von Bewersdorff (2021). Zudem werden größere Mehrfamilienhäuser in mehrere Simulationsmodelle für die einzelnen Hausaufgänge aufgeteilt. Durch dieses Vorgehen kann nochmals circa 25 % der Simulationszeit eingespart werden. Die Abweichungen in den Energiebedarfen liegen bei unter einem Prozent.

Es wird zudem für die Modellierung festgelegt, dass lediglich eine Periode von einem Jahr simuliert wird und die ermittelten Energiebedarfe für die LCA und LCC über den kompletten Betrachtungszeitraum konstant angesetzt werden. Eine Reihe von Parametern der Energiebedarfsmodelle sind als über die Zeit variabel anzunehmen. Es ist davon auszugehen, dass sich bspw. die U-Werte der Bauteile ebenso wie Wirkungsgrade von Wärmeerzeugern über den Betrachtungszeitraum verschlechtern [Wilde et al. (2011); Eleftheriadis/Hamdy (2017)]. Diese Verschlechterungen sind bei der Festlegung der Unsicherheiten zu berücksichtigen.

Die Grundsätze, welche für die Energiebedarfsmodellierung festgelegt wurden, sind zusammenfassend in Tabelle 5-1 dargestellt. In einem nächsten Schritt müssen die Eingangsvariablen des Modells aus den möglichen Modellparametern ausgewählt und für diese Wahrscheinlichkeitsfunktionen zur Quantifizierung der Parameterstreuungen festgelegt werden, da die Energiebedarfsmodellierung im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtung in die Monte-Carlo Analyse eingebettet ist.

Durch die hohe Detaillierung in der Modellierung ist davon auszugehen, dass die verbleibende Modellunsicherheit im Gegensatz zu den Unsicherheiten aus Parameterstreuungen vernachlässigbar ist. Es ist anhand der in Kapitel 3.5 dargestellten Erfahrungswerte davon auszugehen, dass diese, wenn auch nicht eindeutig quantifizierbar, bei einem hohen Detaillierungsgrad im unteren einstelligen Prozentbereich liegt. Wie die im späteren Verlauf der Arbeit durchgeführten Sensitivitätsanalysen (siehe Kapitel 6.4.1) zeigen, sind die Parameterstreuungen teils deutlich höher, sodass die Nichtberücksichtigung der Modellunsicherheiten angemessen erscheint.

Tabelle 5-1: Grundsätze der Quartiersenergiebedarfsmodellierung

Modellierungsentscheidung	Festlegung im Rahmen der Bewertungsmethodik
Modellart	Dynamisches Simulationsmodell
Modellzeitraum	Repräsentatives Jahr des Betrachtungszeitraums
Simulationsumgebung	Prinzipiell frei; im Rahmen der Arbeit „IDA ICE“ verwendet
Umfang der Modellierung	Quartiersnetz und Gebäude separat; MFHs separiert nach Hausaufgängen
Zonierung der Gebäudemodelle	Wohnungsweise; Fensterflächen zusammengefasst

5.5.2 Einführung von Informationsniveaus

In Kapitel 3.4 wurden Angaben aus der Literatur für die Unsicherheiten vorgestellt, denen die Parameter von Energiebedarfsmodellen unterliegen. Ein Großteil der Unsicherheiten kann als epistemisch kategorisiert werden, die Unsicherheiten hängen somit maßgeblich vom a priori Wissen über die Parameter bei Modellerstellung ab. Beispielsweise kann die Geometrie der Gebäude im Quartier über Planangaben bekannt oder nur durch eine grobe Messung vor Ort ermittelt worden sein. Ein weiteres Beispiel sind die genauen Bauteilaufbauten der Gebäudehülle. Im Gebäudebestand sind diese oft unbekannt und daher ist deren Wärmedurchgangskoeffizient als Eingangsparameter in die Energiemodellierung mit Unsicherheiten behaftet. Allerdings kann auch hier die Unsicherheit verringert werden, indem Planunterlagen zu Aufbauten vorliegen oder Messungen zu Schichtdicken im Bestand vorgenommen werden. Allgemein lässt sich postulieren, dass bei größeren Gebäudebeständen in der Regel die vorhandenen Informationen gering sind und deren Beschaffung im Zuge von Ortsbegehungen oder Befragungen zeit- und kostenintensiv sein kann. Es ist daher maßgeblich zu wissen, welche Parameter die Streuungen des Energiebedarfs am stärksten beeinflussen, um diese gezielt genauer spezifizieren zu können.

Um unterschiedliche Niveaus über die vorliegenden Informationen der Eingangsparameter abbilden zu können, werden in Anlehnung an die Unsicherheitsklassen von Loga et al. (2021) sogenannte *Informationsniveaus* für das Modell des Bestandquartiers eingeführt. Die Niveaus beschreiben die Verfügbarkeit von a priori Informationen über den Zustand der verschiedenen, den Energiebedarf beeinflussenden Modellparameter. Je höher der Informationsgehalt zu den Parametern ist, desto geringer ist in der Regel die Streubreite der Werte, die die Parameter in der Modellierung annehmen können. Von einer direkten Übertragung der Unsicherheitsklassen von Loga et al. (2021) wird aufgrund des unterschiedlichen Ansatzes der Energiebedarfsmodellierung abgesehen. Die Methodik von Loga et al. basiert stark auf dem Rahmenwerk der IWU-Gebäudetypologie sowie auf dem Monatsbilanzverfahren für die Energiebedarfsberechnung und kann daher nicht ohne Anpassungen übernommen werden.

Tabelle 5-2 gibt einen Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit definierten vier Informationsniveaus. Das Informationsniveau lässt sich für jeden Parameter separat festlegen, auch wenn in der praktischen Anwendung vermutlich die Informationsniveaus von Parametergruppen häufig identisch sein werden. Werden g als Zählvariable der Gebäude-Modelle, $anw \in [1, \dots, Anw]$ als Zählvariable der Haushalte mit der Gesamtanzahl der Wohnungen Anw im Quartier und ka als Laufvariable für die Parameter des Gebäudeenergiebedarfsmodells im Ausgangszustand festgelegt, dann beschreibt $in_{ka,g}$ das Informationsniveau des Parameters ka vom Gebäudemodell g bzw. $in_{ka,anw}$ das Informationsniveau des Parameters ka des Haushalts anw . Mit K_A wird die Anzahl der unsicheren Modellparameter bezeichnet.

Das höchste Informationsniveau $in_{ka,g} = 1$ wird verwendet, wenn genaue Informationen vorliegen und zu deren Informationsgehalt auch eine hohe Zuverlässigkeit angenommen werden kann. Für geometrische Parameter sind dies bspw. Planunterlagen oder Typenschilder für Komponenten der Anlagentechnik. Die verbleibenden Unsicherheiten über die tatsächlichen Parameterwerte können als sehr gering eingestuft werden. Für die Parameter des Nutzerverhaltens wird das höchste Informationsniveau nicht definiert. Damit wird dem hohen aleatorischen Charakter der Unsicherheiten des Nutzerverhaltens Rechnung getragen.

Das zweithöchste Informationsniveau $in_{ka,g}$ bzw. $in_{ka,anw} = 2$ beschreibt den Informationsstand, der von geschulten Personen bei einer Vor-Ort Begehung mit einem nicht allzu hohen Zeitaufwand, bspw. im Rahmen einer typischen Energieberatung, erreicht werden kann. Geometrien und Bauteilaufbauten lassen sich hier mit einer geringeren Präzision messen. Über das Nutzerverhalten können bspw. über Thermostateinstellungen Aussagen getroffen werden.

Das definierte Informationsniveau $in_{ka,g}$ bzw. $in_{ka,anw} = 3$ stellt den Informationsstand dar, der durch eine Eigentümerbefragung erreicht werden kann. Hierfür kann bspw. der von Loga et al. (2021) entwickelte Fragebogen verwendet werden. Die Angaben können viele Informationen enthalten, die auch bei der Vor-Ort Begehung für $in_{ka,g}$ bzw. $in_{ka,anw} = 2$ ermittelt werden können, allerdings ist die Datengüte schlechter einzuschätzen.

Sind keine weiterführenden Informationen bekannt, so wird dies über das Informationsniveau $in_{ka,g}$ bzw. $in_{ka,anw} = 4$ abgebildet. Hier muss auf Schätzungen und Hochrechnungen zurückgegriffen werden. Die epistemischen Unsicherheiten sind entsprechend voll anzusetzen.

Für die Modellierung der Sanierungsvarianten stellt sich der Charakter der Unsicherheiten für die das Gebäude und die Anlagentechnik betreffenden Parameter anders als beim Bestand dar. Die aleatorischen Anteile, bspw. aus Herstellprozessen, die im Bestand theoretisch durch Messungen bestimmt werden können, sind bei der Sanierung unbekannt.

Dahingegen verbleiben vom epistemischen Anteil lediglich die Spezifizierungsunsicherheiten. Die Methodik wird jedoch so konzipiert, dass die zu untersuchenden Sanierungsvarianten bereits hinsichtlich des Versorgungskonzepts und der Dämmqualität bestimmt werden, sodass die Spezifizierungsunsicherheiten (bspw. aus einer noch fehlenden Wahl eines Dämmstoffes) vernachlässigt werden. Für die Parameter der Sanierungskonzepte, mit der Laufvariable kv beschrieben, wie Dämmstoffdicken oder Wirkungsgraden der Wärmeerzeuger wird daher definitorisch das Informationsniveau $in_{kv} = 1$ festgelegt. Die Anpassungen des Nutzerverhaltens sind hingegen vor der Sanierung nicht näher einzugrenzen. Für diese Parameter wird daher einzig das Informationsniveau $in_{kv} = 4$ definiert. Die Anzahl der Modellparameter einer Sanierungsvariante v wird mit K_{Vv} bezeichnet.

Tabelle 5-2: Beschreibung des Informationsgehalts in den definierten Informationsniveaus für verschiedene Parametergruppen

Informationsniveau ($in_{ka,g}/in_{ka,anw}$)	Parametergruppe	Beschreibung des Informationsgehalts
$in_{ka,g} = 1$	Geometrie	Planunterlagen, evtl. sogar BIM Modelle vorhanden
	Bauteilqualitäten	Planunterlagen zu Bauteilaufbauten und verwendeten Materialien
	Nutzerverhalten	<i>nicht definiert</i>
	Anlagentechnik	Typenschilder der Komponenten bekannt
$in_{ka,g} / in_{ka,anw} = 2$	alle	Vor-Ort Begehung
$in_{ka,g} / in_{ka,anw} = 3$	alle	Eigentümbefragung
$in_{ka,g} / in_{ka,anw} = 4$	alle	Schätzung / keine Angaben

5.5.3 Festlegung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen für mögliche Parameter

5.5.3.1 Hinführung

In Kapitel 3.4 wurden die für die Energiebedarfsmodelle relevanten Parameter vorgestellt sowie ein Überblick über Unsicherheitsquellen dieser Parameter und Ansätze in der Literatur zu deren Quantifizierung gegeben. Um die Unsicherheiten innerhalb der in Kapitel 5.3 definierten Methode der Monte-Carlo Analyse abbilden zu können, sind daher Zufallsvariablen zu definieren. Für diese sind jeweils ein Funktionstyp sowie die dazugehörigen Funktionsparameter wie Mittelwerte, Standardabweichungen oder Intervallgrenzen für die im vorherigen Abschnitt eingeführten Informationsniveaus festzulegen. Prinzipiell wird versucht, Unsicherheiten, die sich aus aleatorischem Materialverhalten ergeben, durch eine Verteilungsfunktion abzubilden, welche den Charakter der Unsicherheiten widerspiegelt. Oft kann hierfür eine Normalverteilung oder eine Log-Normalverteilung verwendet werden.

Die Variablen bilden jedoch physikalische Parameter ab, ihnen sind entsprechend physikalische aber auch baupraktische Grenzen gesetzt. Statt den unbegrenzten Normalverteilungen sollten daher die in Kapitel 3.1.3.2 vorgestellten begrenzten Normalverteilungen verwendet werden.

Sind keinerlei Informationen über den Charakter einer Unsicherheit bekannt und es liegt ein hoher epistemischer Anteil vor, so wird die in Kapitel 3.1.3.4 vorgestellte allgemeine Trapezverteilung zur Modellierung der Zufallsvariablen verwendet. Im Vergleich zur begrenzten Normalverteilung sind hier die Grenzbereiche stärker repräsentiert (siehe Kapitel 3.1.3).

Allgemein wird die Zufallsvariable, die den Parameter ka im Ausgangszustand eines Gebäudes g oder Haushalts anw im Quartier beschreiben, als $X_{ka,g}$ bzw. $X_{ka,anw}$ mit den Realisierungen $x_{ka,g,n}$ bzw. $x_{ka,anw,n}$ bezeichnet. Die Zufallsvariablen, die einen Sanierungsparameter kv einer Variante v beschreiben, werden $X_{kv,g,v}$ bzw. $X_{kv,anw,v}$ mit Realisierungen $x_{kv,g,v,n}$ bzw. $x_{kv,anw,v,n}$ genannt.

5.5.3.2 Geometrieparameter

Der Gebäudetyp, welcher die Anzahl der Stockwerke und der Wohnungen im Gebäude, den Dachtyp sowie die Bebauungssituation an den Seiten definiert, wird nicht als unsicherer Geometrieparameter, sondern als Modellprämisse angesehen. Solche Informationen sind in der Regel von Gebäuden im Quartier bekannt und können über Satellitenbilder oder durch eine Besichtigung vor Ort nahezu aufwandlos beschafft werden. Als zusätzliche Vereinfachungen wird die Modellierung auf rechteckige Grundrisse und einheitliche Regelgeschosse begrenzt. Die möglichen Gebäudetypen, die hiermit abgebildet werden können, sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Die Abbildung der genauen Gebäudegeometrien erfolgt über bis zu sieben unsichere Geometrieparameter. In allen Gebäuden sind dies die Grundfläche, die Geschosshöhe, das Länge zu Breiterhältnis, der Fensteranteil sowie die Ausrichtung des Gebäudes. Das Verhältnis der Gebäudebreite zur Länge spiegelt dabei die Kompaktheit des Grundrisses wider. Die Ausrichtung wird über die Lage der Haustür bzw. die Achse des Dachfirsts definiert. Bei Gebäuden mit Schrägdächern ist zudem die Dachneigung als Parameter relevant. Für die Mehrfamilienhäuser wird zusätzlich ein Anteil der beheizten Fläche als Parameter verwendet. In der Modellierung wird dies über die Aufteilung zwischen dem als unbeheizter Raum definierten Treppenhaus und den als beheizte Zonen modellierten Wohnungen dargestellt.

Tabelle 5-3: Gebäudetypen in der Modellierung

Gebäudetyp	Dachform SD = Satteldach; FD = Flachdach	Anzahl Hauseingänge	Anzahl Stockwerke	Wohnungen je Hauseingang	Über Zufallsvariablen abgebildete unsichere Modellparameter							
					Grundfläche	Geschosshöhe	Länge/Breite	Fensteranteil	Ausrichtung	Dachneigung	Wohnflächenanteil	
					$X_{gfl,g}$	$X_{gh,g}$	$X_{lbv,g}$	$X_{fea,g}$	$X_{aus,g}$	$X_{neig,g}$	$X_{wfl,g}$	
Einfamilienhaus	SD	1	2	1	x	x	x	x	x	x		
Reihenhaus	SD	>2	2	1	x	x	x	x	x	x		
freistehendes Mehrfamilienhaus	SD	1	>2	2 je Ge- schoss	x	x	x	x	x	x	x	
	FD	1	>2		x	x	x	x	x		x	
Zeilenbauten	SD	>2	>2		x	x	x	x	x	x	x	
Plattenbauten	FD	>2	>2		x	x	x	x	x		x	
Blockrand	SD	>2	>2		x	x	x	x	x	x	x	x
					x	x	x	x	x	x	x	x

Diese unsicheren Parameter, aus denen sich die tatsächlichen Gebäudegeometriemodelle als Abwandlungen der Gebäudetypen ergeben, werden im Rahmen der Monte-Carlo Analyse mit Zufallsvariablen abgebildet. Für das Informationsniveau $in_{ka,g} = 1$ sind die jeweiligen Parameter aus den Plänen bekannt. Diese bilden die Mittelwerte der als begrenzte Normalverteilungen definierten Zufallsvariablen. Die Standardabweichungen ergeben sich aus den Toleranzen für den Hochbau gemäß DIN 18202. Die Intervallgrenzen $[a, b]$ der begrenzten Normalverteilung werden aus ingenieurtechnischen Überlegungen festgelegt. So sind für die Geschosshöhen beispielsweise untere Grenzwerte aufgrund der Bauordnungen für Aufenthaltsräume vorgegeben. Zudem sind die Dachneigungen der Schrägdächer auf praxisübliche Neigungen von 10° bis 60° beschränkt.

Für die Informationsniveaus $in_{ka,g} = 2$ bzw. $in_{ka,g} = 3$ werden die Mittelwerte aus Messungen vor Ort oder den Ergebnissen einer Eigentümerbefragung ermittelt. Die Streuungen werden über Variationskoeffizienten dargestellt, die von Loga et al. (2021) übernommen werden. Analog zu $in_{ka,g} = 1$ werden begrenzte Normalverteilungen als Funktionstypen gewählt mit den gleichen, aus ingenieurstechnischen Überlegungen abgeleiteten Grenzintervallen.

Für das Informationsniveau $in_{ka,g} = 4$ liegen qua Definition keine Angaben zu den Geometrieparametern vor, die als Mittelwerte verwendet werden können. Es werden daher Typgebäudemodelle zur Abbildung der verschiedenen Gebäudetypen herangezogen, die von Klauß (2010) eingeführt und im Rahmen des Forschungsprojekts „E⁴Q“ weiter-

entwickelt wurden [Koert (2023)]. Die Definition der Variationskoeffizienten erfolgt wieder anhand der Angaben von Loga et al. (2021).

Die Geometrieparameter sind für den Ausgangszustand des Quartiers festzulegen und in den Sanierungsvarianten unveränderlich. Über sie werden die Bauteilflächen determiniert, die Eingang in die ökonomische und ökologische Bewertung finden (siehe Kapitel 5.6.1). Eine Übersicht über die definierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zufallsvariablen ist in Tabelle A-1 bis Tabelle A-4 in Anhang A für die verschiedenen Informationsniveaus gegeben.

5.5.3.3 Gebäudehülle im Ausgangszustand

Die energetische Qualität der Gebäudehülle im Ausgangszustand wird vornehmlich über die U-Werte der Bauteile bestimmt. Für die Modellierung werden die Bauteile in Massivbauweise definiert. Bei Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass der genaue Bauteilaufbau nur einen unerheblichen Einfluss auf den Energiebedarf aufweist und daher eine Abbildung über den U-Wert ausreichend ist. Die Zufallsvariablen werden demnach für die einzelnen Bauteilgruppen definiert. Da die Unsicherheiten vor allem aus unbekanntem Materialparametern resultieren, werden analog zu den Geometrieparametern begrenzte Normalfunktionen als Verteilungstyp verwendet.

Für die Variationskoeffizienten der Wahrscheinlichkeitsfunktionen werden in Abhängigkeit der Informationsniveaus die Angaben aus der Literatur von Loga et al. (2021) verwendet, die in Tabelle 5-4 dargestellt sind. Die Definition des Mittelwerts erfolgt für $in_{ka,g} = 1$ aus den Bauteilaufbauten der Planunterlagen. Für $in_{ka,g} = 2$ und $in_{ka,g} = 3$ werden die Mittelwerte anhand der Angaben zum Baualter und evtl. bereits vorhandener Sanierungszustände aus der IWU-Gebäudetypologie nach Loga et al. (2015) abgeleitet. Sind keinerlei Informationen über den Zustand der Gebäudehülle vorhanden ($in_{ka,g} = 4$), so werden die U-Werte des mittleren Gebäudebestands gemäß Müller/Heit (2022) verwendet. Für den Wärmebrückenzuschlag wird dieses Vorgehen analog durchgeführt.

Tabelle 5-4: Definition der Standardabweichung gemäß den Angaben von Loga et al. (2021)

Parameter der Gebäudehülle	Einheit	Zufallsvariablen	σ gemäß Loga et al. (2021)			
			$in_{ka,g} = 1$	$in_{ka,g} = 2$	$in_{ka,g} = 3$	$in_{ka,g} = 4$
U-Wert opaker Bauteile	W/(m ² K)	$X_{Uaw,g}; X_{Uog,g}; X_{Uda,g}; X_{Ukd,g}$	0,10 μ	0,25 μ	0,30 μ	0,50 μ
U-Wert der Fenster	W/(m ² K)	$X_{Ufe,g}$	0,10 μ	0,15 μ	0,30 μ	0,50 μ
Wärmebrückenzuschlag	W/(m ² K)	$X_{Uwb,g}$	0,01	0,05	0,07	0,1

Zu den Unsicherheiten in Bezug auf den Infiltrationsluftwechsel ist die Datenbasis in der Literatur nicht im gleichen Maße verfügbar wie für die anderen Parameter der Gebäudehülle. Allerdings können aus den Vorgaben von Münzenberg (2004) und Strobl (2017) Anhaltspunkte für die Streubreiten entnommen werden. Für den Informationsstand $in_{inf,g} = 1$ wird die Durchführung eines Blower-Door Tests vorausgesetzt. Die Abbildung erfolgt dann über eine begrenzt-normalverteilte Zufallsvariable $X_{inf,g}$. Jedoch hat auch der Blower-Door Test eine hohe Unsicherheit [Weithaas (2003)], die als Standardabweichung in der Zufallsvariable aufgenommen wird. Für den Regelfall, dass kein solcher Test durchgeführt wurde, wird für $in_{inf,g} = 2$ und $in_{inf,g} = 3$ die Streubreite erhöht. Als Mittelwert wird eine Expertenschätzung aufbauend auf einer Begehung bzw. einer Eigentümerbefragung verwendet. Diese ergibt sich in Anlehnung an die Angaben von Strobl (2017) aus der Qualität der Gebäudehülle. Sind keine Informationen zum Zustand der Gebäudehülle vorhanden ($in_{inf,g} = 4$), so wird der Mittelwert von Weithaas (2003) verwendet, der eine Luftwechselrate von $0,26 \text{ h}^{-1}$ als Mittel der von ihm untersuchten Bestandsgebäude berechnet hat.

Eine Übersicht über die definierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zufallsvariablen ist in Tabelle A-5 bis Tabelle A-8 in Anhang A für die verschiedenen Informationsniveaus gegeben.

5.5.3.4 Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle

Wie in Kapitel 5.5.2 ausgeführt, wird für die Sanierung nur das Informationsniveau $in_{kv} = 1$ definiert. Die Auswahl der Materialien sowie Dicken ist für die Dämmstoffe für die einzelnen Varianten zum Zeitpunkt der Bewertung bereits erfolgt. Die verbleibenden Unsicherheiten sind demnach insbesondere aleatorischer Natur.

Für die Dämmstoffdicken werden analog zu den Überlegungen zu den Geometrieparametern in 5.5.3.2 begrenzt normalverteilte Zufallsvariablen für die verschiedenen Bauteile $X_{dda,g,v}$ (Dach), $X_{daw,g,v}$ (Außenwand), $X_{dog,g,v}$ (oberste Geschossdecke) und $X_{dkd,g,v}$ (Kellerdecke/Bodenplatte) für jede Variante v definiert, deren Standardabweichungen sich über die Bautoleranzen ergeben.

Zudem wird der Materialparameter der Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe für jedes Bauteil über die begrenzt normalverteilten Zufallsvariablen $X_{lda,g,v}$, $X_{law,g,v}$, $X_{log,g,v}$ und $X_{lkd,g,v}$ definiert. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 5.5.1 ist hierbei jedoch auch die Alterung der Baustoffe zu berücksichtigen, da das Energiebedarfsmodell für ein repräsentatives Jahr des Betrachtungszeitraums berechnet wird. Als Mittelwert werden daher nicht Herstellerangaben, sondern eine um 10 % vergrößerte Wärmeleitfähigkeit verwendet. Zudem wird ein Variationskoeffizient von 5 % festgelegt, um Alterungseffekte

analog zu den in der Literatur gegebenen Spannbreiten (bspw. von Eleftheriadis/Hamdy (2017) oder Waddicor et al. (2016)) zu berücksichtigen.

Für die Fenster wird nach der Sanierung der U-Wert über die begrenzt normalverteilte Zufallsvariable $X_{Ufe,g,v}$ abgebildet. Diese entspricht in ihrer Standardabweichung der Variable des Ausgangszustands für $in_{ka,g} = 1$ die Intervallgrenzen sind jedoch enger gefasst, um die deutlich geringeren U-Werte neu eingebauter Fenster abzubilden.

Sowohl beim Wärmebrückenzuschlag als auch beim Infiltrationsluftwechsel ist davon auszugehen, dass diese nach einer umfangreichen Sanierung im Vergleich zum Ausgangszustand sinken. Wird die Sanierung qualitätsgesichert durchgeführt, so lassen sich die Niveaus der Parameter über typische Werte für die Sanierungsniveaus abschätzen. Zur Abbildung der verbleibenden Unsicherheiten werden analog zum Vorgehen beim Ausgangszustand für $in_{ka,g} = 1$ zwei begrenzt normalverteilte Zufallsvariablen $X_{Uwb,g,v}$ und $X_{Inf,g,v}$ definiert.

Eine Übersicht über die definierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zufallsvariablen ist in Tabelle A-9 in Anhang A gegeben.

5.5.3.5 Anlagentechnik

Um die Unsicherheiten der Anlagentechnik im Modell abzubilden, werden mehrere Zufallsvariablen definiert. Hierbei werden die gleichen Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Anlagentechnik im Ausgangszustand $v = 0$ sowie für die Sanierungsvarianten $v \in [1, \dots, V]$ verwendet. Wie bei der Sanierung der Gebäudehülle wird auch für die neu in die Gebäude eingebrachte Anlagentechnik für die Versorgungsvarianten lediglich das Informationsniveau $in_{kv} = 1$ definiert.

Der Wirkungsgrad der Anlagenkomponenten unterliegt ähnlich wie die im vorherigen Abschnitt erläuterte Wärmeleitfähigkeit der Dämmmaterialien über die Nutzungsdauer einer stetigen Verschlechterung. Für den Wirkungsgrad liegt die Abnutzung gemäß den Angaben in der Literatur zwischen 5 % und 20 % [Eleftheriadis/Hamdy (2017)]. Für das Informationsniveau $in_{ka,g} = in_{kv} = 1$, wenn die genauen Komponenten der Anlagentechnik bekannt sind, werden daher analog zum Vorgehen in Kapitel 5.5.3.4 die Verschlechterungen über die Nutzungsdauer mit in die Parameter der Zufallsvariablen für die Unsicherheiten der Wirkungsgrade der Heizkessel $X_{ke,g,v}$, Wärmepumpen $X_{wp,g,v}$, Wärmeübergabestationen $X_{fern,g,v}$, BHKWs $X_{bhkw,g,v}$ und Pumpen $X_{pump,g,v}$ aufgenommen. Für den elektrischen Wirkungsgrad der BHKWs wird die Zufallsvariable $X_{bhel,g,v}$ definiert. Dieser sinkt im Mittel um 4,5 % über die Nutzungsdauer [Aschmann/Effenberger (2012)].

Für die schlechteren Informationsniveaus sind keine Herstellerangaben zu den Wirkungsgraden bekannt. Es werden daher Mittelwerte aus der Literatur verwendet, um die Wirkungsgrade in Abhängigkeit von den Erzeugertypen und Baujahren abzuschätzen. Auch hier werden die Unsicherheiten für die Abnutzung mit in den Parametern der Wahrscheinlichkeitsfunktionen berücksichtigt. Zudem sind die epistemischen Unsicherheiten über den Anfangszustand der Wärmeerzeuger mit zu berücksichtigen, sodass die Standardabweichungen im Vergleich zu dem höheren Informationsniveau als steigend angenommen werden können.

Die Verteilverluste sind eine weitere wesentliche den Endenergiebedarf der Gebäude betreffende Größe. Sie erhöhen sich in der Regel über die Nutzungsdauer und sind nur schwer messbar. Eine Abschätzung lässt sich über den Zustand der Verteilleitungen und über den Sanierungszustand des Gebäudes sowie das Temperaturniveau der Wärmeverteilung treffen. Für die Quantifizierung der Verteilverluste gibt es in der Literatur nicht viele Anhaltspunkte: Die Zufallsvariable zur Abbildung der Unsicherheiten $X_{\text{verlust},g,v}$ wird daher als Trapezverteilung modelliert. Sie bewegt sich zwischen den für verschiedene Sanierungsniveaus und Versorgungskonzepte (zentrale oder dezentrale Trinkwarmwasserversorgung) typischen Bandbreiten der Verteilverluste und wird in Prozent der Gesamtwärmemenge angegeben.

Für die Abbildung der Unsicherheiten der Speichergrößen für Heizung oder Trinkwarmwasser wird eine begrenzt normalverteilte Zufallsvariable $X_{\text{vol},g,v}$ verwendet. Für $in_{kv} = 1$ erfolgt die Definition anhand der Herstellerangaben sowie üblicher Bautoleranzen. Für die anderen Niveaus werden übliche Speichergrößen für die jeweiligen Versorgungskonzepte als Mittelwerte verwendet und die Standardabweichungen respektive erhöht.

Kommen solarthermische oder PV-Anlagen in einem Versorgungskonzept vor, so sind auch hierfür Unsicherheiten im Modell abzubilden. Zum einen betrifft dies die Fläche der Module bzw. Kollektoren. Für $in_{kv} = 1$ kann diese analog zu anderen Geometrieparametern als begrenzt normalverteilte Zufallsvariable $X_{\text{solA},g,v}$ behandelt werden. Für PV-Module ist der Wirkungsgrad über die Nutzungsdauer einer Degradation ausgesetzt, die bei etwa 5 % bis 15 % über die Nutzungsdauer liegt [Wirth (2023)]. Diese Degradation wird über die begrenzt normalverteilte Zufallsvariable $X_{\text{solWk},g,v}$ abgebildet.

Eine Übersicht über die definierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zufallsvariablen ist in Tabelle A-10 bis Tabelle A-13 in Anhang A für die verschiedenen Informationsniveaus gegeben.

5.5.3.6 Nutzerverhalten im Ausgangszustand

Zur Abbildung der in Kapitel 3.4.3 dargestellten Unsicherheiten des Nutzerverhaltens werden mehrere Zufallsvariablen verwendet. Wie in Kapitel 5.5.2 ausgeführt, wird das Informationsniveau $in_{ka,anw} = 1$ für die Variablen des Nutzerverhaltens nicht vergeben, da diese hohen aleatorischen Unsicherheiten unterliegen.

Das Nutzerverhalten wird hierbei wohnungsweise, also für jeden Haushalt zusammengefasst berücksichtigt. Auf eine personengenaue Abbildung des Nutzerverhaltens wird aufgrund der entstehenden Komplexität, die den Detaillierungsgrad im Vergleich zu den anderen Parametergruppen übersteigen würde, verzichtet.

Für die Quantifizierung der Unsicherheiten werden überwiegend die Angaben von Loga et al. (2019) verwendet. Die verwendeten Zufallsvariablen sind in Tabelle 5-5 dargestellt. Es werden Trapezverteilungen verwendet, die in der Regel als Dreiecks- oder Gleichverteilung ausgestaltet sind, um den hoch unsicheren Charakter der Parameter abzubilden. Wenn über eine Vor-Ort Begehung ($in_{ka,anw} = 2$) oder eine Eigentümerbefragung ($in_{ka,anw} = 3$) Merkmale der Nutzer wie die Personenanzahl oder Thermostateinstellungen ermittelt werden können, so werden diese als Anhaltspunkte, bspw. zum Trinkwarmwasserbedarf oder den Soll-Temperaturniveaus verwendet. Für $in_{ka,anw} = 4$ werden die Spannweiten aus Loga et al. (2019) als Grenzen einer Gleichverteilung verwendet.

Tabelle 5-5: Definition der Zufallsvariablen des Nutzerverhaltens

Parameter des Nutzerverhaltens	Einheit	Zufallsvariable
Sollwert Raumtemperatur	°C	$X_{tSet,anw} \sim \mathcal{T}$
Nachtabenkung	K	$X_{tSenk,anw} \sim \mathcal{T}$
Beginn Nachtabenkung	h	$X_{hSenk,anw} \sim \mathcal{T}$
Dauer Absenkung	h	$X_{dSenk,anw} \sim \mathcal{T}$
Luftwechsel aus Fensterlüftung	h^{-1}	$X_{ach,anw} \sim \mathcal{T}$
Interne Wärmegewinne	W/m ²	$X_{int,anw} \sim \mathcal{T}$
Trinkwarmwasserbedarf	kWh/(m ² a)	$X_{tww,anw} \sim \mathcal{T}$

Eine Übersicht über die definierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zufallsvariablen ist in Tabelle A-14 bis Tabelle A-16 in Anhang A für die verschiedenen Informationsniveaus gegeben.

5.5.3.7 Änderung des Nutzerverhaltens nach der Sanierung

Für die Änderung des Nutzerverhaltens nach der Sanierung kommt lediglich das Informationsniveau $in_{kv} = 4$ in Betracht, da das zukünftige Nutzerverhalten als rein aleatorisch bezeichnet werden kann. Wie in Kapitel 3.4.3 dargestellt, sind in der Literatur höhere Raumtemperaturen bei höheren Sanierungsniveaus der Gebäudehülle beobachtbar. Auch die höhere Luftdichtheit der Gebäudehülle wird häufig durch einen vergrößerten manuellen Luftwechsel durch Fensterlüftung kompensiert. Im Rahmen der Unsicherheitsmodellierung werden daher die trapezverteilten Zufallsvariablen $X_{tZus,anw} \sim \mathcal{T}$ für die Steigerung der Solltemperaturen sowie $X_{achZus,anw} \sim \mathcal{T}$ für die Steigerung des Luftwechsels definiert. Die Höhe der jeweiligen Steigerungen wird in Anlehnung an die Unterschiede zwischen dem Altbau und den Sanierungszuständen in Loga et al. (2019) festgelegt.

Eine Übersicht über die definierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zufallsvariablen ist in Tabelle A-17 in Anhang A gegeben.

5.5.3.8 Klima

Die Abbildung der Unsicherheiten beim Klima gestaltet sich anders als für die übrigen bisher diskutierten Modellparameter. Die Problemstellung, die hierbei adressiert werden muss, ist die Vereinfachung der lediglich ein Jahr des Betrachtungsraums umfassenden Simulation des Energiebedarfsmodells. Dieses Jahr soll stellvertretend für den Betrachtungszeitraum stehen.

In Kapitel 3.4.5.1 wurde dargestellt, dass die Testreferenzjahre (TRJ) des DWD speziell für die Verwendung in Energiebedarfssimulationen entwickelt wurden. Bei der Entwicklung dieser Klimadatenreihen wurde ein besonderes Augenmerk auf die Abbildung der zwischenjährlichen Schwankungen innerhalb der Betrachtungsperiode gelegt. Zudem liegen die TRJ seit 2017 örtlich hochaufgelöst für das ganze Bundesgebiet vor. Diese werden im Folgenden als TRJ2017 bezeichnet. Sie stellen somit die fundierteste Grundlage für die Berücksichtigung des Klimas bei der Energiebedarfssimulation dar. Aufgrund des komplexen Erstellungsprozesses der TRJ2017, der in BBR/DWD (2017) nachvollzogen werden kann, erscheint es nicht zielführend, die Unsicherheiten über eine Anpassung der TRJ2017 abzubilden.

Allerdings basieren die TRJs des DWD auf den Klimadaten von 1995-2012. Es ist davon auszugehen, dass es über den Betrachtungszeitraum der Bewertungsmethodik aufgrund der bereits stattfindenden Erwärmung (siehe Kapitel 1.1) zu Veränderungen in den langjährigen Mittelwerten der Klimadaten kommen wird.

Der DWD hat daher auf Basis regionaler Klimamodelle TRJs für den Zeitraum 2031-2060, als TRJ2045 bezeichnet, erstellt. Diese können genutzt werden, um diesen Zeitraum in der Bewertung abzudecken. Allerdings lässt sich keine fundierte Eintrittswahrscheinlichkeit

der zugrundeliegenden Klimamodelle ableiten, sodass auch eine Quantifizierung der Unsicherheiten schwierig bis unmöglich ist.

Die Abbildung der Unsicherheiten, insbesondere aus der zu erwartenden Klimaänderung über den Betrachtungszeitraum der Bewertung, wird daher über eine Szenariobetrachtung berücksichtigt. Dazu wird die Binärvariable $klima_z$ eingeführt, über die definiert wird, ob die Klimaänderungen über den Betrachtungszeitraum in der Bewertung berücksichtigt werden oder nicht. Falls eine Berücksichtigung stattfindet ($klima_z = 1$), werden die TRJ2045 für den Standort des Betrachtungsgegenstandes für die Simulationen verwendet. Ansonsten ($klima_z = 0$) werden die TRJ2017 Datensätze verwendet. $klima_z$ ist bei der Methodenanwendung für jedes Szenario z zu definieren.

5.5.3.9 Quartierswärmenetz

Für die Abbildung der Unsicherheiten der Anlagentechnik in der Quartierszentrale bei einer wärmevernetzten Quartiersversorgung können die in Kapitel 5.5.3.5 dargestellten Zufallsvariablen für $g = 0$ verwendet werden. Für die Netzparameter wird die Laufvariable kq eingeführt. Zudem werden die Zufallsvariablen $X_{l_{\text{Netz},v}} \sim \mathcal{TN}$ und $X_{d_{\text{Netz},v}} \sim \mathcal{TN}$ für die Leitungslängen und -durchmesser zur Abbildung der Geometrieparameter sowie $X_{u_{\text{Netz},v}} \sim \mathcal{TN}$ für die U-Werte der Leitungen zur Abbildung der Wärmeverluste definiert. Als Wahrscheinlichkeitsfunktionen werden begrenzte Normalverteilungen gewählt. Sofern das Netz als Teil einer Sanierungsvariante geplant wird, ist als Informationsniveau lediglich $in_{kq} = 1$ definiert. Für Bestandsnetze werden die Informationsniveaus analog zu den Geometrie- und Hüllparametern der Gebäude verwendet. Die Standardabweichungen der Wahrscheinlichkeitsfunktionen zur Abbildung der Parameterstreuungen sinken mit zunehmendem Informationsstand. Eine Übersicht über die definierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zufallsvariablen ist in Tabelle A-20 bis Tabelle A-23 in Anhang A gegeben.

5.5.3.10 Anwendungsstrombedarf

Um die Unsicherheiten beim Anwendungsstrom in der Modellierung zu berücksichtigen, werden die Ergebnisse von Wörner (2020) verwendet. Dieser hat, wie in Kapitel 3.4.3.5 vorgestellt, für zehn verschiedene Haushaltsgruppen Standardlastprofile entwickelt, welche das charakteristische, strombedarfsrelevante Verhalten der Bewohner abbilden. Zudem gibt er für die Haushaltsgruppen deren relative Häufigkeiten sowie typische Jahresstrombedarfe an. In Tabelle 5-6 sind die 10 von Wörner definierten Haushaltstypen zusammenfassend dargestellt. Die zusätzliche Haushaltsgruppe H0 entspricht dabei dem Durchschnitt der Bevölkerung. Hierfür hat Wörner das Standardlastprofil des VDEW aktualisiert.

5 Bewertung von Sanierungskonzepten von Wohnquartieren unter Unsicherheit

Tabelle 5-6: Übersicht über die von Wörner (2020) definierten Haushaltsgruppen

Haushaltsgruppe	Beschreibung des Haushalts	Personenanzahl	Anteil an allen Haushalten	Jahresstromverbrauch (ohne Warmwasserbereitung)
H0	repräsentiert die Gesamtbevölkerung	1-5	100 %	2.526 kWh
H1	Single, erwerbstätig	1	19,6 %	1.714 kWh
H2	Single, nicht erwerbstätig, unter 65 Jahre alt	1	6,8 %	1.714 kWh
H3	Single, nicht erwerbstätig, mind. 65 Jahre alt	1	12,8 %	1.714 kWh
H4	Paar ohne Kinder (im Haushalt), beide Personen vollzeitbeschäftigt	2	5,6 %	2.812 kWh
H5	Paar ohne Kinder (im Haushalt), beide Personen erwerbstätig, mind. 1 Person teilzeitbeschäftigt	2	4,3 %	2.812 kWh
H6	Paar ohne Kinder (im Haushalt), mind. 1 Person nicht erwerbstätig, mind. 1 Person unter 65 Jahre alt	2	12,0 %	2.812 kWh
H7	Paar ohne Kinder (im Haushalt), beide Personen nicht erwerbstätig, beide Personen mind. 65 Jahre alt	2	8,9 %	2.812 kWh
H8	Haushalt mit Kind(ern), alle erwachsenen Personen vollzeitbeschäftigt	2-4	3,1 %	3.557 kWh
H9	Haushalt mit Kind(ern), alle erwachsenen Personen erwerbstätig, mind. 1 erwachsene Person teilzeitbeschäftigt	2-5	8,8 %	4.046 kWh
H10	Haushalt mit Kind(ern), mind. 1 erwachsene Person nicht erwerbstätig, mind. 1 erwachsene Person unter 65 Jahre alt	2-5	4,5 %	4.001 kWh

Zur Abbildung der Unsicherheiten des Anwendungsstrombedarfs werden im Rahmen der Modellierung die stetige Zufallsvariable $X_{pwr,anw} \sim \mathcal{TN}$ für die absolute Höhe des Jahresstrombedarfs eines Haushalts und die diskrete Zufallsvariable $X_{profil,anw}$ für das verwendete Jahreslastprofil definiert. Für die Jahresprofile werden die von Wörner entwickelten Profile für die Haushaltsgruppen verwendet. Sind genügend Informationen über die Bewohner des Haushalts bekannt ($in_{profil,anw} = 2$), so kann eine direkte Zuordnung vorgenommen werden. Ist lediglich die Personengröße bekannt ($in_{profil,anw} = 3$), so wird die kumulierte Verteilungsfunktion von $X_{profil,anw}$ als Treppenfunktion über die relativen Häufigkeiten der Haushaltsgruppen mit entsprechender Personenanzahl definiert. Liegen über die Zusammensetzung der Haushalte keinerlei Informationen vor ($in_{profil,anw} = 4$), so werden die relativen Häufigkeiten der Haushaltsgruppen an der Gesamtheit der Haushalte für die Bildung der Treppenfunktion verwendet. Für Einfamilienhäuser wird aufgrund der Gebäudegröße die Einschränkung verwendet, dass die Ein-Personen-Haushaltsgruppen H1 und H2 nicht betrachtet werden.

Für die absolute Höhe des Jahresstrombedarfs wird für $X_{pwr,anw}$ als Mittelwert die Angabe von Wörner für die jeweilige Haushaltsgruppe verwendet. Die Standardabweichung wird mit steigendem Informationsgehalt verringert. Ist der Strombedarf der letzten Abrechnungsperioden bekannt, so kann dieser als Mittelwert verwendet werden. Dieser Informationsstand wird mit dem Informationsniveau $in_{pwr,anw} = 1$ definiert, und stellt damit die einzige das Nutzerverhalten betreffende Variable dar, für die dieses Informationsniveau definiert wird. In der Praxis ist jedoch insbesondere in Quartieren mit einem hohen Mietanteil nicht davon auszugehen, dass diese Informationen in der Breite vorliegen.

Eine Übersicht über die definierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zufallsvariablen ist in Tabelle A-19 und Tabelle A-20 in Anhang A gegeben.

5.5.4 Berücksichtigung der Korrelation der Zufallsvariablen

Nachdem für alle unsicheren Modellparameter Zufallsvariablen definiert wurden, ist die Korrelation zwischen den Variablen festzulegen. Die Korrelation zweier Zufallsvariablen beschreibt die Beziehung zueinander (siehe Kapitel 3.1.2) und wird über den Korrelationskoeffizient ρ_{XY} ausgedrückt. Aus der Literatur lassen sich keine fundierten Rückschlüsse zu einer Quantifizierung der Korrelationskoeffizienten der definierten Modellvariablen herleiten. Dies gilt insbesondere auf Ebene des Quartiers, da hier noch keinerlei vergleichbare Untersuchungen durchgeführt wurden. Für die Variablen des Nutzerverhaltens sind Korrelationen denkbar, da diese teilweise von gleichen Basisgrößen, wie der Bewohneranzahl abhängen. Allerdings wurde dies im Rahmen der Festlegung der Funktionsparameter der Verteilungsfunktionen über die Informationsniveaus bereits berücksichtigt. Ist die Anzahl der Bewohner bekannt, so ergeben sich andere Informationsniveaus und damit auch andere Verteilungsfunktionen, welche die vorhandene Korrelation dann bereits „implizit“ berücksichtigen. Es wird daher für die Methodik die Entscheidung getroffen, die definierten Variablen eines Gebäudemodells als unkorreliert anzunehmen.

Auf Ebene des Quartiers muss zudem die Korrelation zwischen den Gebäuden beziffert werden. Baulich getrennte Gebäude werden zunächst ebenso als unkorreliert angenommen. Ist in einem Quartier jedoch bekannt, dass mehrere Gebäude gemeinsam errichtet wurden, so kann in der Anwendung eine perfekte Korrelation bspw. zwischen den Geometrievariablen angesetzt werden. Im Zuge der Modellierung werden die größeren Mehrfamilienhäuser in mehrere Simulationsmodelle für die einzelnen Treppenaufgänge aufgeteilt (siehe Kapitel 5.5.1). Hier wird für einen Baukörper eine perfekte Korrelation $\rho_{XY} = 1$ zwischen den Geometrie- und Gebäudehüllvariablen der Gebäudeteile angenommen.

5.5.5 Festlegung der Stichprobenanzahl und Zufallszahlgenerierung

Im vorliegenden Fall ist die Durchführung eines Simulationslaufs der Monte-Carlo Analyse zeitintensiv. Es ist daher für die spätere Modellanwendung anzustreben, dass die Stichprobenanzahl N der MCA möglichst klein gewählt wird. Maßgeblich für die Größe von N ist, dass eine Konvergenz des Mittelwerts und der Varianz der Ergebnisse der MCA erreicht wird (siehe Kapitel 3.2.2). Um diese Konvergenz mit einer möglichst geringen Anzahl an Simulationsdurchläufen zu erreichen, bieten sich verschiedene Methoden der Generierung der gleichverteilten Zufallszahlen der inversen Verteilungsfunktionen (engl. *Sampling*) an.

Burhenne (2013) kommt im Rahmen seiner Untersuchungen an einem Energiebedarfsmodell (siehe Kapitel 4.3) zu dem Schluss, dass die Zufallszahlgenerierung mit Sobol-Sequenzen eine ausreichende Konvergenz des Mittelwerts und der Varianz des von ihm untersuchten solaren Deckungsgrads bei einer Stichprobenanzahl von $N = 128$ erreicht. Diese Methodik der Zufallszahlgenerierung ist dabei dem Latin Hypercube Sampling (LHS), anderen Methoden der Stratifizierung sowie einem Pseudozufallszahlgenerator überlegen.

Um dies auf die im Rahmen dieser Ausarbeitung verwendeten Energiebedarfsmodelle, die zudem nicht nur einen solaren Deckungsgrad, sondern auch die verschiedenen Energiebedarfe der Gebäude- und Quartiersnetzmodelle betrachten, zu übertragen, wird im Folgenden eine Untersuchung der Konvergenz an verschiedenen Untersuchungsgegenständen und mit verschiedenen Sampling-Methoden durchgeführt.

Für die softwareseitige Ausführung der Zufallszahlgenerierung wird die Programmiersprache R [R Core Team (2022)] über die Anwendung „RStudio“ in der Version 2022.12.0.353 [Posit Team (2022)] verwendet. Hier sind die entsprechenden Funktionen bereits in den Paketen „lhs“ [Carnell (2022)] und „randtoolbox“ [Dutang/Savicky (2022)] hinterlegt.

Als Untersuchungsgegenstand für die Konvergenz der Ergebnisse des Gebäudeenergiebedarfsmodells wird zunächst ein freistehendes Einfamilienhaus in einer Qualität der Gebäudehülle, die den mittleren Gebäudebestand abbildet sowie mit einem Niedertemperatur-Gaskessel für die Wärmeversorgung verwendet. Da hier nur ein Gebäude mit einem Haushalt betrachtet wird, wird zur Übersichtlichkeit im Folgenden auf die Indizes $g = 1$ und $anw = 1$ für die Zufallsvariablen verzichtet.

Für alle Variablen wird das Informationsniveau $in_{ka} = 4$, also die mit der größten Streuung behaftete Parameterkombination, betrachtet. Die Anzahl der im Rahmen der MCA variierten Modellparameter beträgt $K_A = 24$. Für die Ziehung der Zufallszahlen werden Sobol-Sequenzen als Quasi-Zufallsgenerator, Latin Hypercube Sampling und der SIMD-oriented Fast Mersenne Twister (SFMT) Algorithmus als Pseudozufallszahlgenerator verwendet.

Die Sobol-Sequenzen sind nur für ein $N = 2^j$ mit $j \in \mathbb{N}^+$ definiert. Daher werden für die drei verschiedenen Sampling Methoden jeweils 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 und 512 Zufallszahlkombinationen gezogen und für diese die Simulationen im Rahmen der MCA am definierten Untersuchungsgegenstand durchgeführt.

In Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 sind die Ergebnisse des Stichprobenmittels $\bar{x}(Q_{f,Geb})_N$ respektive der empirischen Standardabweichung $s(Q_{f,Geb})_N$ des Endenergiebedarfs des Gebäudes $Q_{f,Geb}$, bezogen auf den Wert beim maximal betrachteten $N = 512$, für die verschiedenen Sampling Methoden dargestellt. Wird die von Burhenne (2013) verwendete Abweichung von 5 % zum Wert des maximal betrachteten N als Definition für die Konvergenz herangezogen, so zeigt sich, dass alle Methoden der Zufallszahlgenerierung schnell für das Stichprobenmittel konvergieren. Die Zufallszahlgenerierung mit Sobol-Sequenzen konvergiert bereits vor den anderen Methoden bei einem $N = 64$ auch für die empirische Standardabweichung.

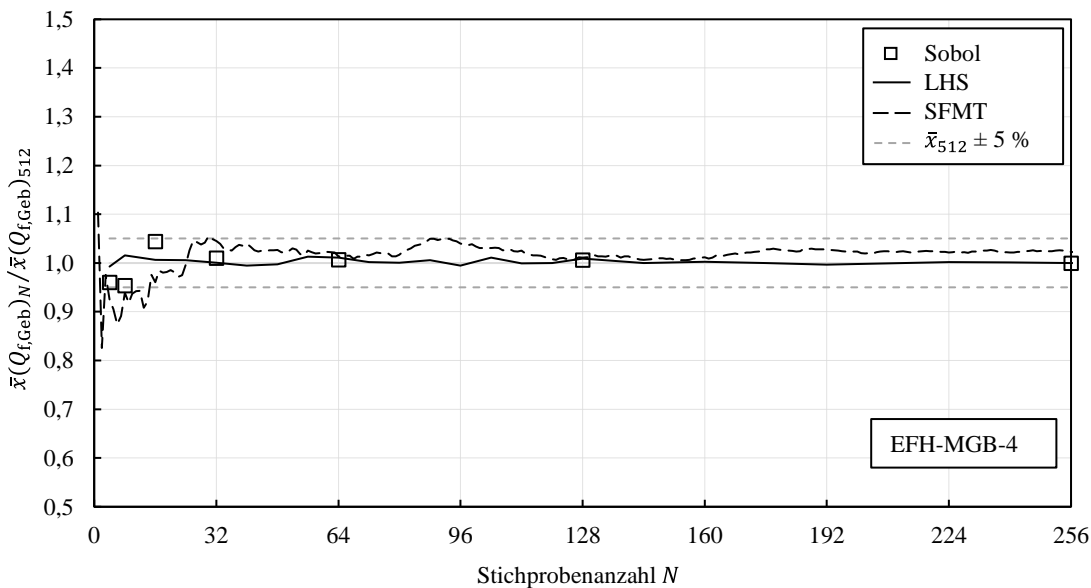


Abbildung 5-6: Konvergenz des Stichprobenmittels des Endenergiebedarfs eines freistehenden EFHs mit Gebäudehülle des mittleren Gebäudebestands (MGB), Gaskessel, Informationsniveau $in_{ka} = 4$ für alle ka , für verschiedene Stichprobenanzahlen N mit unterschiedlichen Sampling-Methoden

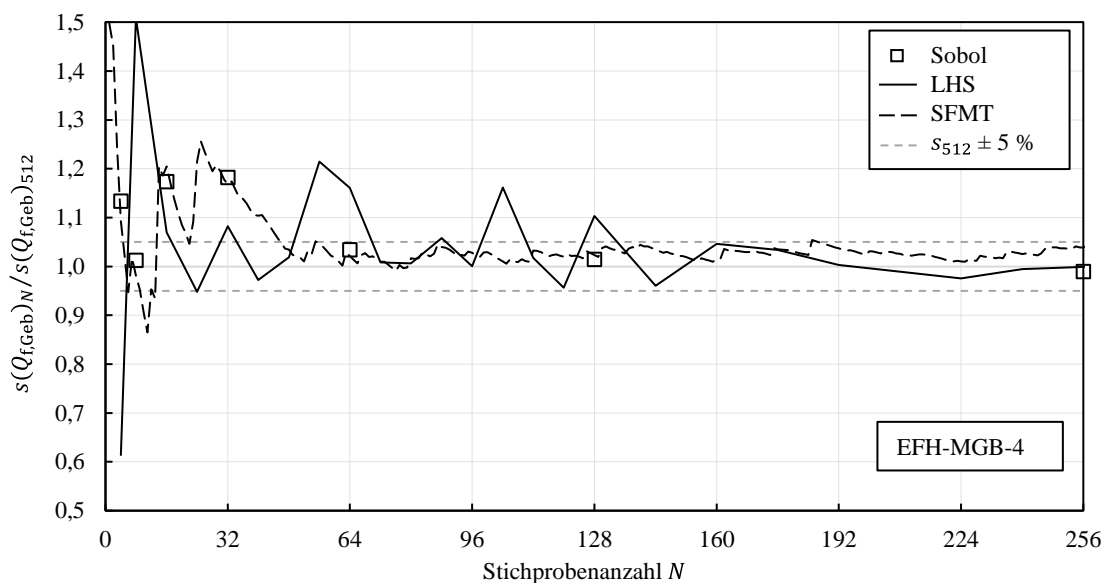


Abbildung 5-7: Konvergenz der empirischen Standardabweichung des Endenergiebedarfs eines freistehenden EFHs mit Gebäudehülle des mittleren Gebäudebestands, Gaskessel, Informationsniveau $\ln_{ka} = 4$ für alle ka , für verschiedene Stichprobenanzahlen N mit unterschiedlichen Sampling-Methoden

Um zu überprüfen, dass diese Wahl der Stichprobenanzahl auch für andere Modellkonfigurationen mit mehr Basisvariablen ausreichend ist, werden die in Tabelle 5-7 zusammengestellten Modellkonfigurationen untersucht. Hierbei wird sich auf die Zufallszahlgenerierung mittels Sobol-Sequenzen beschränkt, da diese den anderen Methoden der Zufallszahlgenerierung in Bezug auf die Konvergenz vorzuziehen ist. Als Konvergenzkriterium wird wieder eine maximale Abweichung von 5 % zum Wert beim maximal betrachteten $N = 512$ definiert. Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 zeigen, dass alle untersuchten Modelle sowohl für das Stichprobenmittel als auch für die empirische Standardabweichung spätestens bei $N = 128$ konvergieren.

5 Bewertung von Sanierungskonzepten von Wohnquartieren unter Unsicherheit

Tabelle 5-7: Modellkonfigurationen für die Untersuchung der Konvergenz der MCS

Modellnummer	Grundkonfiguration des Modells	Anzahl Modellvariablen (Informationsniveau)	Zufallszahl- generierung
EFH-MGB-1	EFH freistehend, mittlerer Gebäudebestand, NT-Kessel	24 ($in_{ka} = 1$ für alle ka außer Nutzerverhalten $in_{Nutzer} = 2$)	Sobol
EFH-GEG-1	EFH freistehend, GEG-Niveau, Brennwertkessel + PV	26 ($in_{ka} = 1$ für alle ka außer Nutzerverhalten $in_{Nutzer} = 2$)	Sobol
EFH-GEG-4	EFH freistehend, GEG-Niveau, Brennwertkessel + PV	26 ($in_{ka} = 4 \forall ka$)	Sobol
MFH-MGB-1	MFH freistehend, mittlerer Gebäudebestand, NT-Kessel	74 ($in_{ka} = 1$ für alle ka außer Nutzerverhalten $in_{Nutzer} = 2$)	Sobol
MFH-MGB-4	MFH freistehend, mittlerer Gebäudebestand, NT-Kessel	74 ($in_{ka} = 4$ für alle ka)	Sobol
MFH-GEG-1	MFH freistehend, GEG-Niveau, Brennwertkessel + PV	76 ($in_{ka} = 1$ für alle ka außer Nutzerverhalten $in_{Nutzer} = 2$)	Sobol
MFH-GEG-4	MFH freistehend, GEG-Niveau, Brennwertkessel + PV	76 ($in_{ka} = 4$ für alle ka)	Sobol

EFH: Einfamilienhaus; MFH: Mehrfamilienhaus; GEG: Gebäudeenergiegesetz;
MGB: Mittlerer Gebäudebestand; NT: Niedertemperatur; PV: Photovoltaik

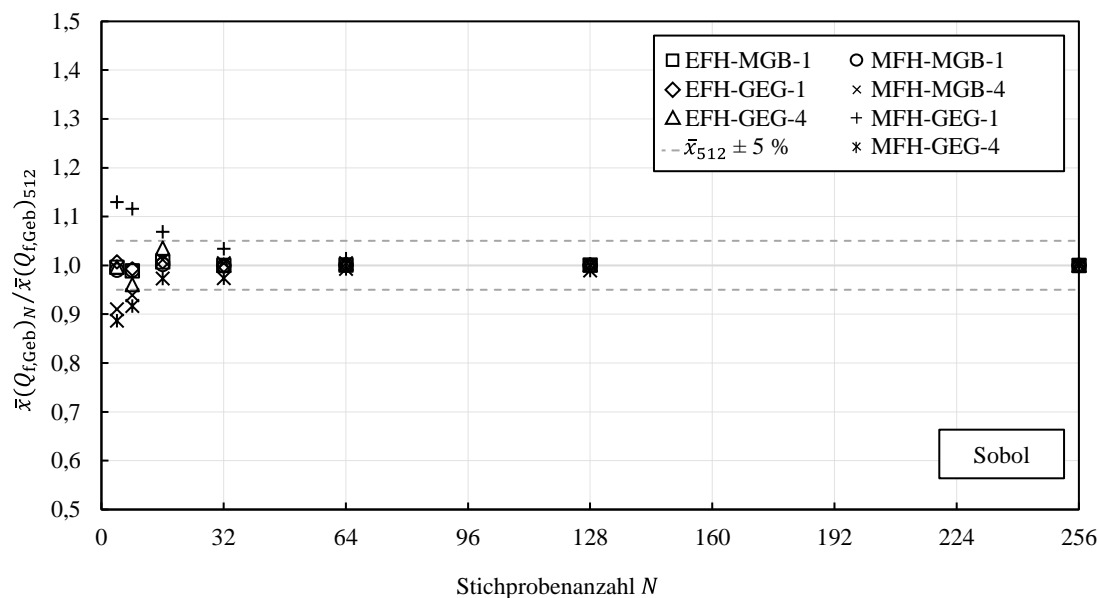


Abbildung 5-8: Konvergenz des empirischen Mittels des Endenergiebedarfs der untersuchten Gebäude-
modelle für verschiedene Stichprobenanzahlen N , Zufallszahlgenerierung auf Basis von
Sobol-Sequenzen

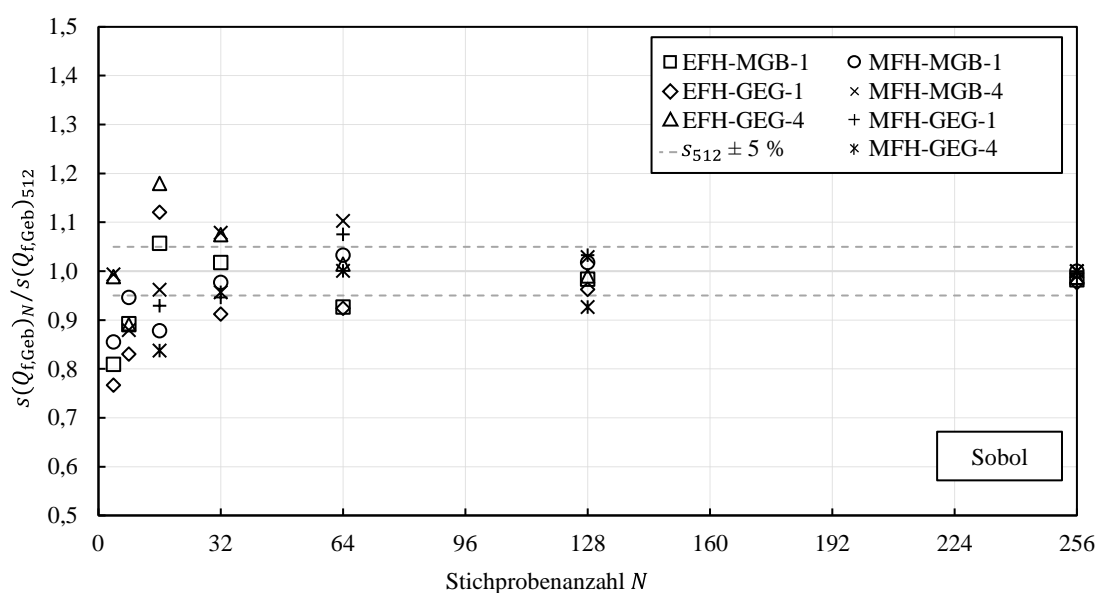


Abbildung 5-9: Konvergenz der empirischen Standardabweichung des Endenergiebedarfs der untersuchten Gebäudemodelle für verschiedene Stichprobenanzahlen N , Zufallszahlgenerierung auf Basis von Sobol-Sequenzen

Zum Abschluss der Konvergenzuntersuchung wird ein Quartier mit Wärmenetz untersucht. Das Quartier wird aus zehn freistehenden Einfamilienhäusern mit einer dem mittleren Gebäudebestand entsprechenden Qualität der Gebäudehülle zusammengesetzt. Die Wärmeversorgung erfolgt über ein Wärmenetz mit einem zentralen Heizkessel. Denkbar wäre hier eine Biogasanlage. Für alle Variablen wird das Informationsniveau $in_{ka} = 4$ festgelegt. Wird wie in den vorherigen Betrachtungen eine maximale Abweichung von 5 % von dem maximal betrachteten Stichprobenumfang $N = 512$ als Konvergenzkriterium zugrunde gelegt, so zeigt sich in Abbildung 5-10, dass dies sowohl für das Stichprobenmittel als auch für die empirische Standardabweichung bereits nach $N = 64$ erreicht wird.

Unter Berücksichtigung der vorgestellten Ergebnisse wird in dieser Ausarbeitung die erforderliche Stichprobenanzahl der Monte-Carlo Analyse für die Quartiersenergiebedarfsmodelle zu $N = 128$ festgelegt. Mit dieser Stichprobenanzahl konvergieren alle untersuchten Fälle, sodass davon auszugehen ist, dass das Stichprobenmittel sowie die empirische Standardabweichung ausreichend genau ermittelt werden können.

5 Bewertung von Sanierungskonzepten von Wohnquartieren unter Unsicherheit

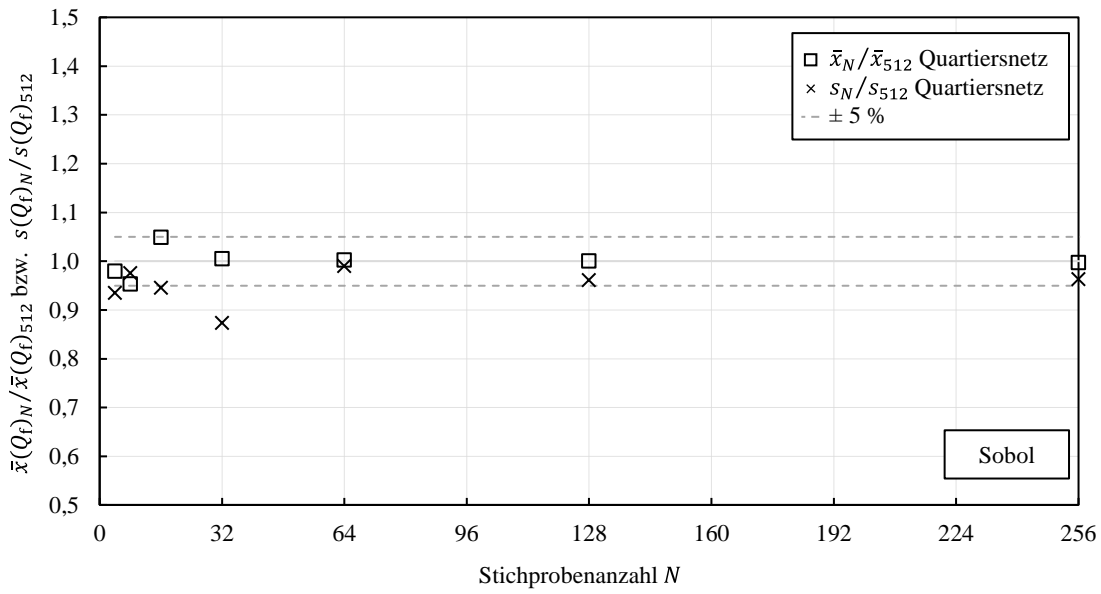


Abbildung 5-10: Konvergenz des Stichprobenmittels und der empirischen Standardabweichung des GEG-relevanten Endenergiebedarfs des Quartierswärmenetzmodells für verschiedene Stichprobenanzahlen N , Zufallszahlgenerierung auf Basis von Sobol-Sequenzen

5.5.6 Zusammenfassung des stochastischen Quartiersenergiebedarfsmodells

Im Folgenden wird das entwickelte stochastische Quartiersenergiebedarfsmodell nochmals zusammenfassend vor- und in Abbildung 5-11 dargestellt. Den Startpunkt setzt die Festlegung der Informationsniveaus $in_{ka,g}$ bzw. $in_{ka,anw}$ für die Modellparameter ka des Quartiers im Ausgangszustand. Diese können für die Parametergruppen jedes Gebäudes g und für die Parameter des Nutzerverhaltens jeder Wohnung anw definiert werden. Für die unsicheren Gebäudeparameter werden Zufallsvariablen $X_{ka,g}$ und für die Parameter des Nutzerverhaltens $X_{ka,anw}$ sowie korrespondierende, im Intervall $[0,1]$ gleichverteilte Zufallsvariablen $Y_{ka,g}$ und $Y_{ka,anw}$ definiert. Abhängig vom Gebäudetyp liegt die Anzahl der Variablen K_A zwischen 24 und 76.

Die Berücksichtigung der Klimaanpassungen am Standort wird über die Binärvariable $klima_z$ beschrieben. Diese ist vorgelagert für das Szenario z festzulegen. Anschließend wird die eigentliche Monte-Carlo Analyse mit dem Stichprobenumfang von $N = 128$ durchgeführt.

Für jede Stichprobe n der Monte-Carlo Analyse werden für jedes Gebäude g sowie Haushalte anw und jeden Parameter ka die Realisierungen $y_{ka,g,n}$ bzw. $y_{ka,anw,n}$, im Weiteren auch Zufallszahlen genannt, aus einer Sobol-Sequenz gezogen. Die Korrelation zwischen Variablen verschiedener Gebäude wird entweder als vollständig (bspw. gleiche Ausrichtung verschiedener Gebäude) oder nicht vorhanden angenommen. Aus den Zufallszahlen und den Informationsniveaus berechnen sich die Realisierungen der Modellvariablen über die definierten inversen Verteilungsfunktionen gemäß Gl. 5-10 bzw. Gl. 5-11.

$$x_{ka,g,n} = F^{-1}(y_{ka,g,n}, in_{ka,g}) \quad \text{Gl. 5-10}$$

$$x_{ka,anw,n} = F^{-1}(y_{ka,anw,n}, in_{ka,anw}) \quad \text{Gl. 5-11}$$

Die Realisierungen der Zufallsvariablen werden als Parameterwerte für die Erzeugung eines dynamischen Simulationsmodells jedes Einzelgebäudes verwendet. Mit dem Modell werden die Energiebedarfsprofile des Einzelgebäudes unter Verwendung des durch $klima_z$ und den Standort definierte Testreferenzjahrs berechnet.

In einem nächsten Schritt werden die gewählten Sanierungsvarianten betrachtet. Hierfür werden für jede Variante v für jedes Gebäude g für die unsicheren Parameter kv der Bauteilsanierungen und der Anpassung des Nutzerverhaltens Zufallsvariablen $X_{kv,g,v}$ und $X_{kv,anw,v}$ sowie korrespondierende, im Intervall $[0,1]$ gleichverteilte Zufallsvariablen $Y_{kv,g,v}$ und $Y_{kv,anw,v}$ definiert. Für die Parameter nach der Sanierung ist im Gegensatz zum Ausgangszustand jeweils nur ein Informationsniveau festgelegt.

Für jede Stichprobe n ergeben sich die Realisierungen der Modellvariablen daher gemäß Gl. 5-12 oder Gl. 5-13. Anhand der Realisierungen werden die Parameterwerte des Gebäudemodells des Ausgangszustands verändert und die Energiebedarfe über das Jahr simuliert.

$$x_{kv,g,v,n} = F^{-1}(y_{kv,g,v,n}) \quad \text{Gl. 5-12}$$

$$x_{kv,anw,v,n} = F^{-1}(y_{kv,anw,v,n}) \quad \text{Gl. 5-13}$$

Sofern im Ausgangszustand ein Wärmenetz vorhanden ist, oder in einer Versorgungsvariante ein solches geplant wird, wird für dieses ein Wärmenetzmodell erstellt. Im Ausgangszustand sind analog zu den Gebäudemodellen für die unsicheren Netzparameter kq Informationsniveaus in_{kq} festzulegen. Für Sanierungsvarianten wird aufgrund der Planung $in_{kq} = 1$ für alle Netzparameter angenommen. Zur Abbildung der unsicheren Netzparameter werden die Zufallsvariablen $X_{kq,v}$ sowie die gleichverteilten Zufallsvariablen $Y_{kq,v}$ definiert.

Die Realisierungen $x_{kq,v,n}$ ergeben sich gemäß Gl. 5-14 und werden als Parameterwerte für das Wärmenetzmodell verwendet. Zudem werden die Netzanbindungen, bestehend aus den Masseströmen $\dot{m}_{i,g,v,n}$ und Temperaturen $\vartheta_{i,g,v,n}$ in den Übergabestationen für alle Zeitschritte i der Simulation der jeweiligen Gebäudemodelle im Wärmenetzmodell verwendet.

$$x_{kq,v,n} = F^{-1}(y_{kq,v,n}, in_{kq}) \quad \text{Gl. 5-14}$$

Ergebnis der Gebäudeenergiebedarfs- und Wärmenetzmodelle sind die Leistungen der Wärme- und Stromerzeuger $\dot{Q}_{i,v,n}$ und $P_{i,v,n}$ für alle $i = 1, \dots, 35040$ 15-Minuten Zeitschritte des Referenzjahrs.

Zusammen mit den Anwendungsstrombedarfsprofilen $P_{i,anw,n}$ sowie in den Varianten evtl. vorhandenen Batteriespeichern werden die Simulationsergebnisse zu Jahresbedarfen bilanziert. Damit ergeben sich die Endenergiebedarfe der Energieträger m $Q_{m,f,v,n}$, der Strombezug aus dem öffentlichen Netz $Q_{\text{purchase},v,n}$, die jährliche Stromeinspeisung $Q_{\text{feed},v,n}$ sowie der erneuerbare Deckungsgrad $\eta_{\text{cover},v,n}$.

$\eta_{\text{cover},v,n}$ stellt dabei einen der definierten Bewertungsindikatoren dar. Die anderen Indikatoren sind über eine ökologische und ökonomische Bewertung zu ermitteln. Die entsprechenden Methoden werden im folgenden Abschnitt ausgewählt und in die entwickelte Methodik eingebettet. Eingang finden dabei die bilanzierten Energiebedarfe sowie die aus den jeweiligen Parameterkombinationen der Stichprobe resultierenden Flächen- und Mengenangaben der Bauteile und Anlagenkomponenten.

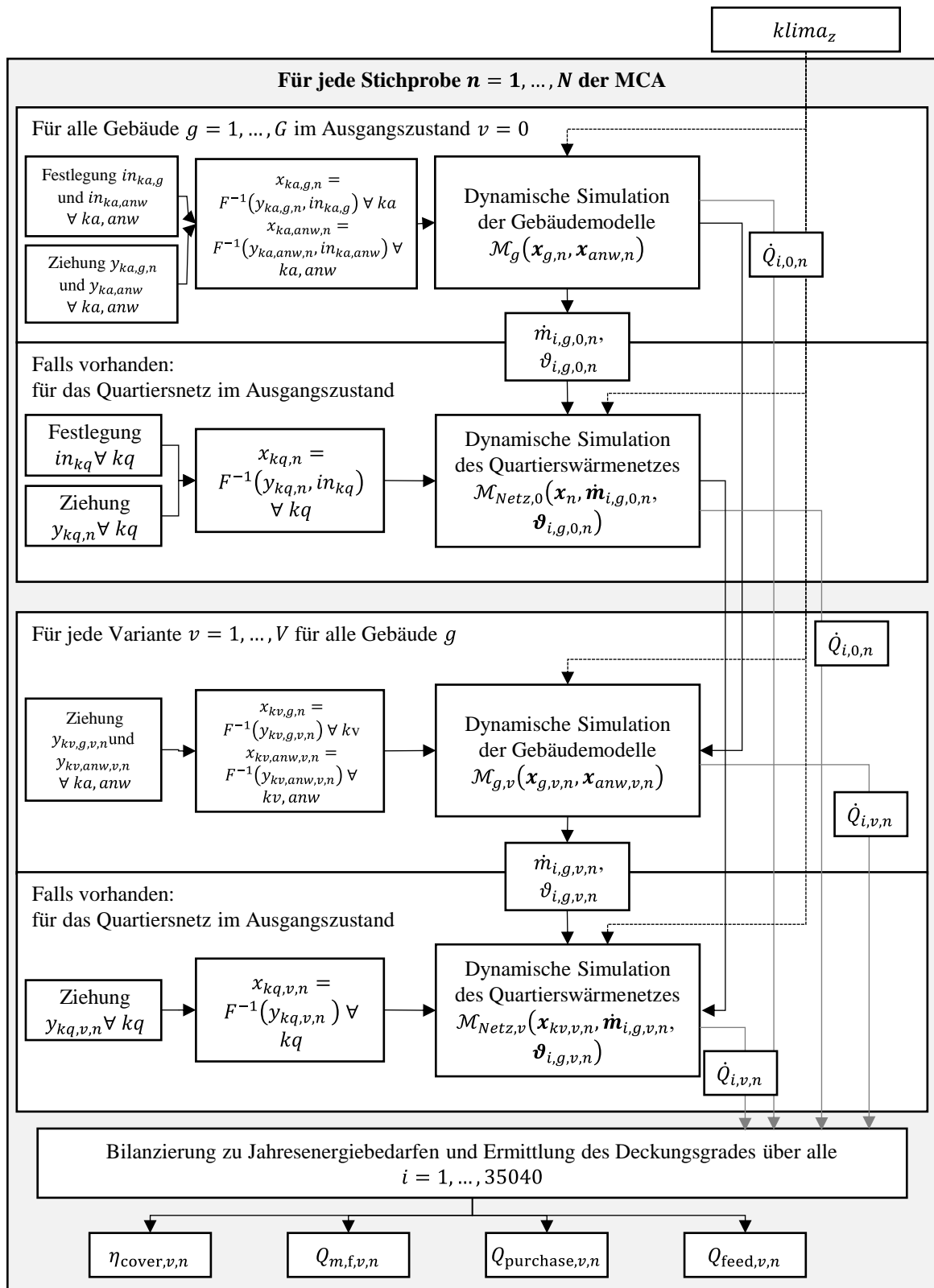


Abbildung 5-11: Zusammenfassende Darstellung des stochastischen Quartiersenergiebedarfsmodells

5.6 Festlegungen für die ökonomische und ökologische Bewertung

5.6.1 Anknüpfung an die Energiebedarfsmodellierung

Aus der Wahl der Bewertungsindikatoren in Kapitel 5.4 wurde deutlich, dass sowohl für die ökonomische als auch für die ökologische Bewertung eine Lebenszyklusbetrachtung vorzunehmen ist. Für die ökonomische Bewertung wird hierbei eine Lebenszykluskostenrechnung zur Ermittlung des Barwerts der Lebenszykluskosten durchgeführt. Die ökologische Bewertung erfolgt durch die Berechnung einer Sachbilanz für die Umweltwirkung Treibhauspotenzial. Beide Bewertungsmethoden bilden die Prozesse innerhalb der Systemgrenzen über alle Perioden t des Betrachtungszeitraums T ab. Eingangsparameter sind Mengen für die Dämmstoffe und Komponenten der Anlagentechnik, die sich über die Eingangsparameter der Energiebedarfsmodelle für die Varianten v für jede Stichprobe n definieren. Auch die Energiebedarfe, die als Grundlage für die Kosten und Umweltwirkungen der Nutzungsphase dienen, sind als Ergebnis der Simulationen verfügbar (siehe Kapitel 5.5.6). Darüber hinaus gilt es jedoch eine Reihe von weiteren Parametern für die beiden Berechnungsmethoden zu definieren. Manche dieser Parameter, wie Nutzungsdauern von Komponenten oder die Anschaffungskosten lassen sich analog zu den Parametern der Energiebedarfsmodelle über Zufallsvariablen mit stetigen Verteilungsfunktionen darstellen und können somit für jede Stichprobe im Rahmen der MCA berechnet werden. Dazu wird die MCA der Energiebedarfsmodelle um die in Kapitel 5.6.2 näher erläuterten Variablen ergänzt. Die Verwendung einer MCA für Lebenszyklusanalysen insbesondere mit der Verwendung von Sobol-Sequenzen für die Zufallszahlziehung wurde, wie in Kapitel 4.2 dargestellt, in der Literatur bereits als geeignet eingestuft [Groen et al. (2014); Burhenne (2013)]. Im Gegensatz zu den Variablen des Energiebedarfsmodells wird auf eine Definition von Informationsniveaus für die Zufallsvariablen der LCA und LCC verzichtet. Hierbei handelt es sich um meist extern beeinflusste Parameter, für die keine Informationsdefizite durch die Anwendenden, analog zu den Sanierungsparametern der Gebäudemodelle, verringert werden können.

Für die Abbildung der Szenariounsicherheiten, die sich durch die zukünftigen Veränderungen von externen Berechnungsparametern über den Lebenszyklus ergeben, eignet sich dieses Vorgehen jedoch nicht. Hierzu werden Z Szenarien gebildet, für die in der Anwendung die jeweiligen, im Folgenden vorgestellten, zeitlichen Verläufe der Parameter definiert werden müssen. Im Regelfall kann dies über die Definition von Stützstellen über den Betrachtungszeitraum erfolgen, zwischen denen linear interpoliert werden kann. Das entsprechende Vorgehen ist in Kapitel 5.6.3 dargestellt. Abbildung 5-12 zeigt die Anknüpfungspunkte zwischen der Energiebedarfsmodellierung und der LCA und LCC sowie die Einbettung in die Unsicherheitsberücksichtigung.

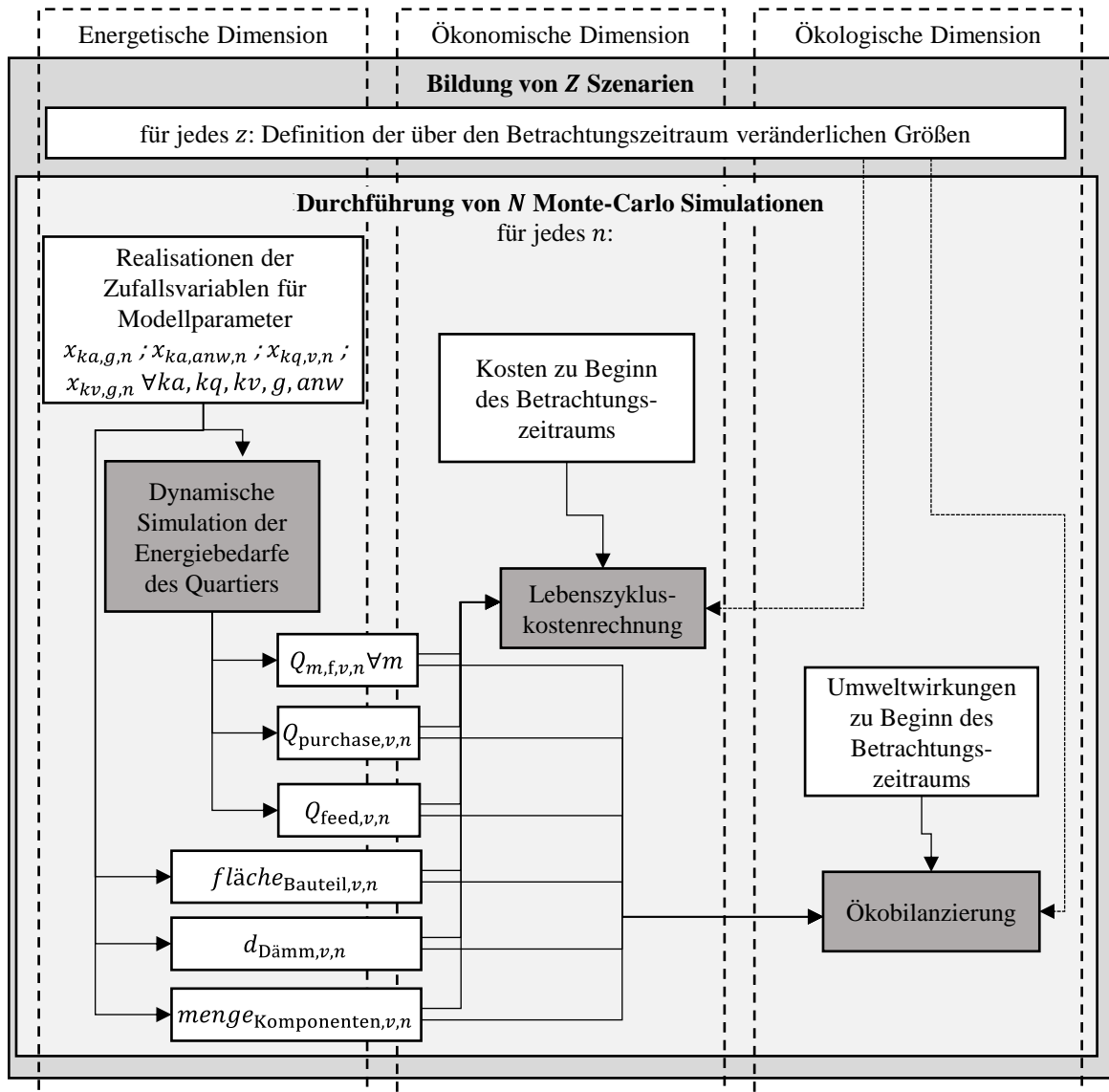


Abbildung 5-12: Anknüpfungspunkte zwischen der Energiebedarfsmodellierung, Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenrechnung

5.6.2 Festlegung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen für Parameter der ökologischen und ökonomischen Bewertung

5.6.2.1 Technische Lebensdauern

Ein entscheidender Parameter für die ökonomische und ökologische Bewertung sind die technischen Lebensdauern der betrachteten Komponenten. Diese determiniert die Austauschzyklen und damit die Häufigkeit, mit der Herstell- bzw. Anschaffungs- sowie Entsorgungs- oder Verwertungsprozesse anfallen. In Kapitel 4.2.1.2 wurde deutlich, dass die tatsächlichen Nutzungsdauern großen Schwankungen unterliegen. In der Literatur existieren bspw. von Goulouti et al. (2020) Ansätze zur Quantifizierung dieser Unsicherheiten durch die Abbildung mit Wahrscheinlichkeitsfunktionen. Zudem hat Ritter (2011) bereits ausführliche Untersuchungen zu Streuungen bezüglich der technischen Lebensdauern der Bauteile durchgeführt, bei denen er für die Abbildung der Einflüsse einzelner Faktoren Dreiecksverteilungen verwendet. Er gibt neben Mittelwerten auch Quantilwerte an, zwischen denen sich die Lebensdauern üblicherweise im Gebäudebestand bewegen.

Zur Abbildung der Unsicherheit der technischen Lebensdauer einer Komponente w wird daher im Rahmen dieser Arbeit als Zufallsvariable $X_{\text{TLD},w,v}$ definiert. Sofern für eine Komponente von Goulouti et al. (2021) eine Wahrscheinlichkeitsfunktion abgeleitet wurde, wird diese für diese Arbeit übernommen. Für die restlichen Komponenten werden die Nutzungsdauern aus der VDI 2067 als Mittelwerte verwendet und in Anlehnung an die anderen Verteilungsfunktionen ein Variationskoeffizient von 10 % definiert. Die Parameter der Wahrscheinlichkeitsfunktionen sind für alle definierten Zufallsvariablen in Tabelle A-24 im Anhang A zusammenfassend dargestellt.

Wichtig ist jedoch, dass beim Betrachtungsgegenstand des Quartiers die Komponenten oft mehrfach vorkommen. Da eine Betrachtung jeder einzelnen Komponente mit einem hohen Aufwand verbunden ist, wird im Rahmen dieser Arbeit eine technische Lebensdauer für die Gesamtheit gleicher Komponenten, bspw. aller gedämmten Dächer im Quartier, aus den Verteilungen abgeleitet. Unter der Annahme, dass die Lebensdauern der einzelnen Komponenten unabhängig voneinander sind, ergibt sich über das Gesetz der Fehlerfortpflanzung, dass die definierten Standardabweichungen für die Lebensdauern der Einzelkomponenten $\sigma_{\text{TLD,einzel},w}$ durch die Wurzel der Anzahl der Komponenten $anz_{\text{LCC},w,v}$ gemäß Gl. 5-15 zu teilen sind. Die Anzahl der Komponenten kann dabei zwischen den betrachteten Varianten variieren, sodass auch die technischen Lebensdauern der Komponenten für jede Variante v berechnet werden müssen.

$$\sigma_{\text{TLD,zusammen},w,v} = \frac{\sigma_{\text{TLD,einzel},w}}{\sqrt{anz_{\text{LCC},w,v}}} \quad \text{Gl. 5-15}$$

5.6.2.2 Anschaffungskosten

Vom Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKI) werden jährlich auf Basis von abgerechneten Projekten statistische Kostenkennwerte für verschiedene Bauelemente oder Positionen veröffentlicht. Die Angabe erfolgt dabei in Form von Mittelwerten sowie von/bis Angaben, die übliche Streubereiche angeben, sowie Min/Max Werten für Extrema. [BKI (2022a); BKI (2022b)]

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Ermittlung der Unsicherheiten der Anschaffungskosten auf Basis dieser Angaben eine Untersuchung der relativen Abweichungen der tabellierten Werte der für die energetischen Sanierungen relevanten Bauteile und Anlagenkomponenten durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Abweichungen über die betrachteten Komponenten der Wärmeversorgung ähnlich sind. Gleiches gilt für die betrachteten Wärmedämmstoffe. Als dritte Gruppe werden Fenster ausgemacht. Es werden daher drei trapezverteilte Modellvariablen für die Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Anschaffungskosten definiert, $X_{C,Invest,Anlage} \sim \mathcal{T}$ als relative Abweichung der Anschaffungskosten der Anlagentechnik, $X_{C,Invest,Dämm} \sim \mathcal{T}$ als relative Abweichung der Anschaffungskosten der Dämmstoffe und $X_{C,Invest,Fenster} \sim \mathcal{T}$ als relative Abweichung der Anschaffungskosten der Fenster.

Für Batteriespeicher sind keine Daten vom BKI verfügbar. Die Ableitung der Unsicherheiten in den Anschaffungskosten erfolgt daher auf Basis des Batteriespeicher-Marktberichts von C.A.R.M.E.N. (2023). Aus Kostenangaben des Marktberichts wird eine Kostenfunktion für die mittleren Anschaffungskosten je kWh Batteriekapazität gebildet (siehe Kapitel 6.3). Die Unsicherheiten werden nun analog als trapezverteilte Modellvariable $X_{C,Invest,Batterie} \sim \mathcal{T}$ abgebildet. Die mittlere Abweichung der Werte von dieser Kostenfunktion wird als Plateau und die Extremwerte als Grenzen der Trapezverteilung verwendet. Die Parameter aller Funktionen sowie deren Ermittlung sind in Tabelle A-25 in Anhang A dargestellt. Die Kosten bspw. der Batteriespeicher, ergeben sich nun in einer Stichprobe n gemäß Gl. 5-16.

$$C_{Invest,Batterie,n} = x_{C,Invest,Batterie,n} * C_{Invest,Mittel,Batterie} \quad \text{Gl. 5-16}$$

5.6.2.3 Betriebskosten

Die Höhe der Betriebskosten wird in der Regel als prozentualer Anteil der Anschaffungskosten angegeben. Die Angaben in der VDI 2067-1 oder in DGNB (2018) separieren einen Anteil für Instandsetzung und einen Anteil für Wartung und Inspektion. Diese können als Standardannahmen verwendet werden, jedoch sind sie als unsicher einzuschätzen. Die Berücksichtigung erfolgt im Rahmen der Arbeit analog zu den Anschaffungskosten im vorherigen Abschnitt über die Abbildung mit einer Zufallsvariable, die multiplikativ Abweichungen von den Standardannahmen abbildet.

Auf eine Aufteilung zwischen verschiedenen Komponenten wird jedoch aufgrund einer fehlenden Datenbasis verzichtet. Stattdessen wird die Variable global für alle Betriebskosten über eine normalverteilte Zufallsvariable $X_{C,Betrieb} \sim \mathcal{N}(1; 0,25)$ mit $\mu = 1$ und $\sigma = 0,25$. Die Wahl der Standardabweichung ist hier rein nach ingenieurtechnischem Verständnis gewählt, da keine Literaturangaben vorhanden sind.

5.6.2.4 Treibhausgasemissionen in der Herstellung

In Kapitel 4.2.2.2 wurde aufgezeigt, dass die Betrachtung der Umweltwirkungen von Prozessen insbesondere bei der Verwendung von generischen Datensätzen einer Reihe von Unsicherheiten unterliegt, die in der Literatur im Rahmen von Monte Carlo Analysen quantifiziert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher bei Verwendung der ÖKOBAUDAT-Datensätze zur Abbildung der Unsicherheiten die Modellvariable $X_{GWP} \sim \mathcal{T}$ als globaler Anpassungsfaktor definiert. In Ermangelung weiterer Kenntnisse wird eine Trapezverteilung für den Verteilungstyp angenommen mit den Datensatzwerten als Maximalwert, da diese in der Regel einen Sicherheitsaufschlag beinhalten und somit als oberer Grenzwert anzusehen sind. Die Berechnung der jeweiligen mengenspezifischen Treibhauspotenziale der einzelnen Prozesse $gwp_{j,n}$ erfolgt dann gemäß Gl. 5-17. Die Parameter der Wahrscheinlichkeitsfunktion sind in Tabelle A-25 in Anhang A dargestellt.

$$gwp_{j,n} = x_{GWP,n} * gwp_j \quad \text{Gl. 5-17}$$

5.6.3 Beschreibung von Parametern über Szenarien

5.6.3.1 Treibhausgasemissionen der Energieträger

Die Preise und Umweltwirkungen der zur Deckung der Energiebedarfe verwendeten Energieträger können über den Betrachtungszeitraum veränderlich sein. Insbesondere beim Energieträger Strom wird sich die Zusammensetzung im Laufe der nächsten Dekaden aufgrund der angestrebten Dekarbonisierung der Stromerzeugung grundlegend ändern. Dies bedingt, dass die mengen-spezifischen Treibhausgasemissionen des Stroms $gwp_{\text{Strom},z,t}$ über die Zeit abnehmen werden. Ob der vorgegebene Zielpfad dabei jedoch erreicht oder sogar nochmals angepasst wird, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht über Wahrscheinlichkeiten zu beschreiben. Daher wird die Entwicklung des Parameters $gwp_{\text{Strom},z,t}$ über Szenarien abgebildet.

Auch für die Energieträger Gas sowie Fernwärme können sich die mengen-spezifischen Treibhauspotenziale $gwp_{\text{Gas},z,t}$ sowie $gwp_{\text{FW},z,t}$ über den Betrachtungszeitraum verändern. Über eine Substitution des Erdgases durch grünen Wasserstoff oder Biogas ist es denkbar, dass das Gas, welches am Quartier ankommt, geringere mengen-spezifische Emissionen aufweisen wird. Gleichzeitig können durch eine vermehrte Verwendung von verflüssigtem Erdgas (LNG), wie es ab dem Jahr 2022 in Deutschland durch die Substitution von russischem Erdgas durch LNG aus den USA und Katar beobachtet werden konnte [Bundesnetzagentur (2023)], die spezifischen Emissionen jedoch zunächst aufgrund der steigenden Vorkettenemissionen steigen [Wachsmuth et al. (2019)]. Auch bei einer Fernwärmeversorgung ist davon auszugehen, dass die Erzeugung über den Betrachtungszeitraum weiter dekarbonisieren wird.

5.6.3.2 Kosten der Energieträger

Die Versorgungskosten, die sich aus den Energieträgerpreisen $cost_{m,z,t}$ gemäß Gl. 5-18 ergeben, verändern sich ebenso im Laufe des Betrachtungszeitraums. Durch die bereits dargelegten Änderungen in der Zusammensetzung des Stroms sind hier Veränderungen für $cost_{\text{Strom},z,t}$ zu erwarten. Für die fossilen Energieträger Gas oder Heizöl ist durch den steigenden CO₂-Emissionspreis (siehe Kapitel 2.1.1) sowie eine Verknappung des endlichen Angebots zudem von Preissteigerungen auszugehen, die das Maß der allgemeinen Inflationsrate überschreiten. Wenn überschüssiger, ins öffentliche Netz eingespeiste Strom direktvermarktet wird, so sind auch die daraus erzielbaren Erlöse $C_{\text{Erlös},t,v,z,n}$ abhängig von den Entwicklungen des allgemeinen Strompreises und sollten somit für verschiedene Szenarien in ihrer Entwicklung über den Betrachtungszeitraum definiert werden. Andernfalls ergeben sich Erlöse aus den dafür zu erhaltenden Einspeisevergütungen (siehe Kapitel 2.1.3), die jedoch über einen Zeitraum von 20 Jahren fixiert sind und somit nicht von Szenarien abhängig.

Das allgemeine Inflationsniveau wird gemäß den Vorgaben aus Kapitel 5.4.4 auf Null definiert. Die in $cost_{m,z,t}$ enthaltenen Entwicklungen müssen demnach reale Preissteigerungen oder -senkungen abbilden.

$$C_{\text{Versorg},t,v,z,n} = \sum_m Q_{m,f,v,n} * cost_{m,z,t} + Q_{\text{purchase},v,n} * cost_{\text{Strom},z,t} \quad \text{Gl. 5-18}$$

5.6.3.3 Ersatzkosten

Neben den Versorgungskosten können auch Ersatzkosten für verschiedene Komponenten losgelöst vom allgemeinen Preisniveau Kostenentwicklungen erfahren. Insbesondere bei neuen Technologiegütern fallen die Preise aufgrund von Skaleneffekten aus Größenzuwächsen, Lerneffekten sowie technischen Innovationen in der Produktion [Göllinger (2022)]. Am Beispiel der Photovoltaik-Module zeigt sich beispielsweise eine Verringerung des Preises um über 75% in den letzten 20 Jahren [Wirth (2023)]. Zukünftig kann dies bspw. für Batteriespeicher oder Wärmepumpen erwartet werden. Daher werden im Rahmen der Methodenentwicklung auch die Entwicklungen der Ersatzkosten $C_{\text{Ersatz},t,v,z}$ für die verschiedenen technischen Komponenten über Szenarien abgebildet.

5.6.3.4 Kalkulationszins

Eine Größe, die nicht über den Betrachtungszeitraum veränderlich aber im Rahmen der Arbeit trotzdem innerhalb der Szenarien definiert wird, ist der Kalkulationszins r_z . Da in der Lebenszykluskostenbetrachtung reale Preise angesetzt werden, spiegelt der Realzins r_z auch eine Inflationserwartung sowie eine Erwartung bezüglich der Entwicklung alternativer Investments wider. Diese Erwartungen können von den Anwendenden entweder konstant über alle Szenarien definiert oder zwischen den Szenarien variiert werden.

5.7 Softwareseitige Umsetzung der Bewertungsmethodik

Zur softwareseitigen Umsetzung der Bewertungsmethodik muss zunächst ein Konzept des Arbeitsflusses erarbeitet werden sowie eine Mehrzahl an Programmschnittstellen programmiert werden. Die Routinen zur Durchführung der Monte-Carlo Analyse zur Bestimmung der Energiebedarfe der Quartiere sind in der Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA) in „Microsoft Excel 2021“ implementiert worden. Dies beinhaltet die Erzeugung von Skriptcode für die Simulationsmodellerstellung mit der Variation der Parameter in Abhängigkeit der Zufallszahlen der MCA sowie den automatisierten Aufruf des Simulationsprogramms in parallelen Instanzen und die Ergebnisverarbeitung. Die Automatisierung des Modellerstellungs- und Simulationsprozesses stellt eine wesentliche Neuerung dar, da vergleichbare Softwareschnittstellen für „IDA ICE“ nicht verfügbar

waren. Die Automatisierungsroutinen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „E⁴Q“ vom Autor dieser Arbeit entwickelt und werden im Rahmen des Projektendberichts für die dort verwendeten deterministischen Typmodelle detailliert vorgestellt [Koert (2023)].

Die Ziehung der Zufallszahlen wird vorgelagert in „RStudio“ (siehe Kapitel 5.5.5) vorgenommen. Die Simulation der Energiebedarfe wird in „IDA ICE Version 4.8 SP2“ durchgeführt (siehe Kapitel 5.5.1). Der Skriptcode zur Modellerzeugung und Simulationsdurchführung, welcher mit VBA in „Microsoft Excel“ erzeugt wird, ist in der „IDA ICE“ eigenen, an Common Lisp angelehnten Programmiersprache geschrieben. Nähere Erläuterungen zur Funktionsweise des Skriptings in „IDA ICE“ sowie zur Syntax der Skriptsprache können EQUA (2015) entnommen werden. Für die Simulation der Wärmenetze von vernetzten Quartieren wird ein zweistufiges Verfahren gewählt, welches sich an der Vorgehensweise von Weißmann (2017) orientiert (siehe Kapitel 5.5.1). Hierfür werden zunächst die Gebäude mit Wärmeübergabestationen als Wärmeerzeuger simuliert. Die Netzanbindungen der Masseströme und Temperaturniveaus in den Wärmeübergabestationen werden in einem zweiten Schritt als Eingangsdatensätze für die Simulation des Wärmenetz, bestehend aus den Leitungstrassen und der Wärmeerzeugungszentrale, verwendet.

Die Ergebnisse der Simulationen liegen in Form von Leerzeichen-getrennten Textdateien (Dateiendung .prn) mit den Leistungen der verschiedenen Wärmeerzeuger in 15-minütiger Auflösung vor. Die Zeitschrittweite der Berechnung wird zwar dynamisch vom Lösungsalgorithmus selbst festgelegt [Hindmarsh et al. (2005)]. Durch eine einheitliche Festlegung der Ergebnisausgabe in 15-Minuten Intervallen, die interpolierte Werte der Berechnungsschritte enthalten, wird jedoch eine Vereinfachung der weiteren Handhabbarkeit insbesondere für die Bilanzbildung erreicht. Zudem wird dem Solver eine maximale Schrittweite von 15 Minuten vorgegeben, um für jedes Intervall eine ausreichende Genauigkeit der Interpolationen sicherstellen zu können.

Die Ergebnisdateien werden anschließend wieder in einer mit VBA erweiterten „Microsoft Excel“-Arbeitsmappe im Rahmen der MCA zu Jahresbedarfen auf Quartiersebene bilanziert. Die ökonomische und ökologische Bewertung unter Berücksichtigung der Szenarien erfolgt schließlich inklusive der Ergebnisdarstellung in einer dritten mit VBA erweiterten „Microsoft Excel“-Arbeitsmappe. Abbildung 5-13 zeigt schematisch die entwickelte softwareseitige Umsetzung der Bewertungsmethodik.

5 Bewertung von Sanierungskonzepten von Wohnquartieren unter Unsicherheit

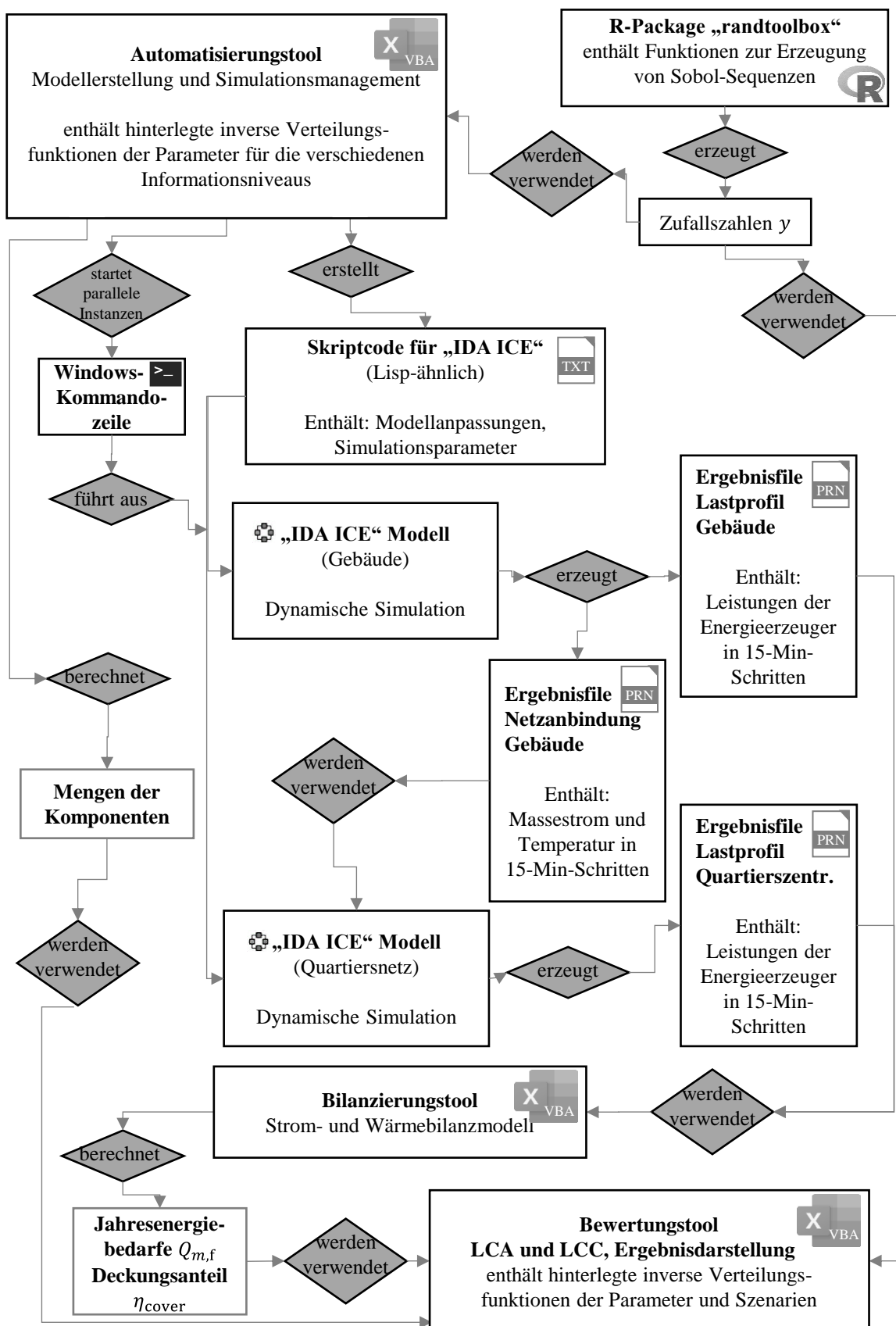


Abbildung 5-13: Schematische Darstellung der softwareseitigen Umsetzung der Bewertungsmethodik

6 BEISPIELHAFTE ANWENDUNG DER ENTWICKELTEN METHODIK

6.1 Auswahl des Untersuchungsgegenstands

Die Bewertung von Quartierssanierungskonzepten unter Unsicherheit mittels der im vergangenen Kapitel entwickelten Methodik soll im Folgenden an einem Quartier beispielhaft durchgeführt werden. Ziel ist es, die Anwendbarkeit der Methodik zu demonstrieren und deren Robustheit in Bezug auf Änderungen in den Berechnungsprämissen zu verdeutlichen. Zudem sollen Aussagen zur Vorteilhaftigkeit verschiedener Sanierungskonzepte für den festgelegten Anwendungsfall getroffen werden.

Für die Wahl des Betrachtungsgegenstandes wird auf die im Rahmen des Forschungsprojekts „E⁴Q“ definierten Typquartiere zurückgegriffen, die typische Bebauungssituationen im Bestand abbilden [Müller/Koert (2022)]. Es wird ein Quartier bestehend aus zehn freistehenden Einfamilienhäusern gewählt. Hierbei handelt es sich um ein Quartier in einer kleinen Ausdehnung, das insbesondere für die Anschaulichkeit der Ergebnisse gewählt wird. Wie in Kapitel 2.2 erläutert, ist die Methodik jedoch auch unabhängig von der Quartiersgröße anwendbar.

Für den Anwendungsfall sind neben dem Ausgangszustand die verschiedenen Sanierungsvarianten zu definieren. Im Ausgangszustand werden zudem verschiedene Informationsniveaus untersucht. Zur Vereinfachung und besseren Vergleichbarkeit wird die Annahme getroffen, dass sich die Basiswerte der Parameter der Gebäudemodelle, die als Mittelwerte für die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zufallsvariablen gewählt werden, für die verschiedenen Informationsniveaus nicht unterscheiden. Dies bedeutet, dass bspw. die gemessenen Werte der Geometrieparameter ($in_{ka,g} = 2$) mit den Geometrieparametern der Typgebäude, die für $in_{ka,g} = 4$ verwendet werden (siehe Kapitel 5.5.3.2), übereinstimmen. Die verwendeten Gebäudemodelle für die Simulation der Energiebedarfe sind in Anhang B dargestellt.

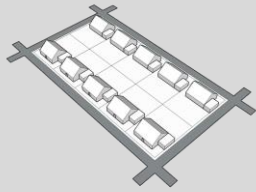
Lediglich für die Parameter der energetischen Qualität der Gebäudehülle kommt es zwischen den Informationsniveaus zu größeren Abweichungen. Für die Gebäudehülle werden für $in_{ka,g} = 4$ gemäß den Ausführungen in Kapitel 5.5.3.3 Bauteilaufbauten gewählt, die dem mittleren Gebäudebestand entsprechen. Für die anderen Informationsniveaus werden die Bauteilaufbauten entsprechend einer für das Baujahr üblichen Qualität modelliert.

Für das Nutzerverhalten werden Standardwerte festgelegt. Als Versorgungskonzept wird eine Einzelgebäudeversorgung mit Niedertemperatur-Gasheizkesseln für die Wärme- und zentrale Trinkwarmwassererzeugung festgelegt. Tabelle 6-1 beinhaltet eine

6 Beispielhafte Anwendung der entwickelten Methodik

Zusammenstellung der Ausgangswerte für die verschiedenen Informationsniveaus der Einfamilienhäuser.

Tabelle 6-1: Deterministische Werte der Modellparameter des Untersuchungsgegenstands im Ausgangszustand

Merkmale der Quartiere im Ausgangszustand $v = 0$	Einfamilienhäuser	
		
	$in_{ka,g}/in_{ka,anw} = 1;2;3$	$in_{ka,g}/in_{ka,anw} = 4$
<u>Geometrieparameter</u>		
Wohneinheiten	10	
Beheizte Fläche	1.800 m ²	
Anzahl Geschosse	2	
Geschosshöhe	2,75 m	
Grundausrichtung der Dachfirste	Ost-West	Unbekannt
Standort	Potsdam	
<u>Parameter der Gebäudehülle</u>		
Baualter	1975	Unbekannt
U-Wert Dach	0,51 W/m ² K	0,56 W/m ² K
U-Wert oberste Geschossdecke	1,10 W/m ² K	0,44 W/m ² K
U-Wert Außenwand	0,78 W/m ² K	1,17 W/m ² K
U-Wert Fenster	2,80 W/m ² K	2,11 W/m ² K
U-Wert unterer Gebäudeabschluss	0,85 W/m ² K	0,85 W/m ² K
Wärmebrückenzuschlag	0,10 W/m ² K	0,10 W/m ² K
Infiltrationsluftwechsel	0,26 h ⁻¹	0,25 h ⁻¹
<u>Parameter des Nutzerverhaltens</u>		
Solltemperaturen	21 °C mit 2 K Nachtabsenkung von 23:30 – 07:30 Uhr	
Nutzungsbedingter Luftwechsel	0,15 h ⁻¹	
Interne Wärmegewinne	3 W/m ²	
Trinkwarmwasserbedarf	19 kWh/m ² a	
<u>Parameter der Anlagentechnik</u>		
Wirkungsgrad des Heizkessels	0,90	
Wirkungsgrad der Pumpen	0,70	
Verteilverluste	15 %	

Die Wahl des Quartiers für die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit erfolgt aufgrund der im Folgenden kurz skizzierten Überlegungen. Insbesondere bei Einfamilienhäusern sind die Sanierungsraten im Bestand gering (siehe Kapitel 2.3), sodass hier eine Entscheidungsunterstützung durch die Bewertungsmethodik hilfreich erscheint. Zudem kann dieses Quartier für einen anschaulichen Vergleich zur Bewertung eines Einzelgebäudes verwendet werden. Für Einfamilienhäuser, die sich in der Regel im selbstgenutzten Privateigentum befinden, finden die Sanierungsentscheidungen im überwiegenden Fall auf Ebene der Einzelgebäude statt. Gerade hier ist daher ein Vergleich mit dem Quartiersansatz interessant.

Für das Quartier werden insgesamt vier Sanierungsvarianten untersucht. Zunächst wird eine Mindestsanierung als Variante $v = 1$ definiert. Diese beinhaltet den Ersatz des Heizkessels durch einen Gas-Brennwertkessel sowie eine moderate Dämmung der Gebäudehülle und einen Austausch der Fenster. Die angestrebten energetischen Niveaus der Bauteile orientieren sich an den in Kapitel 2.1.2 vorgestellten gesetzlichen Mindestvorgaben. Als Dämmmaterial wird Expandiertes Polystyrol (EPS) angenommen. Diese Sanierungsvariante stellt zudem die Fortschreibung des Ausgangszustandes in der Basisvariante $v = 0$ dar, sofern die Komponenten des Ausgangszustandes das Ende ihrer technischen Lebensdauern erreicht haben und getauscht werden müssen (siehe Kapitel 5.2).

Als weitere Sanierungsvarianten wird eine Umstellung der Wärmeversorgung auf den Energieträger Strom durch Luft-Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit einer ambitionierteren Gebäudedämmung untersucht. Für die Hälfte der Einfamilienhäuser wird hierbei zusätzlich eine Photovoltaikanlage von jeweils 40 m² geplant ($v = 2$). Alternativ werden zusätzliche Batteriespeicher mit einer Nennkapazität von 10 kWh für die mit einer Photovoltaikanlage ausgestatteten Gebäude geplant ($v = 3$), um die Eigennutzungsgrade des Solarstroms zu erhöhen.

Um Synergieeffekte im Quartier zu untersuchen, wird als vierte Variante ($v = 4$) ein Quartiersbatteriespeicher als Alternative zu den Gebäudespeichern ausgewählt. Zu diesem Zweck wird ein Quartiersstromnetz verwendet, um die Stromerzeugung aus Photovoltaik gemeinschaftlich zu nutzen. Die definierten Sanierungsvarianten sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst.

6 Beispielhafte Anwendung der entwickelten Methodik

Tabelle 6-2: Definierte Sanierungsvarianten für das Quartier der Einfamilienhäuser

Einfamilienhäuser						
Sanierungsvariante	Dämmstärken EPS			U-Wert Fenster	Energieversorgungskonzept	
	Dach	Decke OG	AW		Wärme	Strom
Variante 1 ($v = 1$)	17 cm	14 cm	14 cm	1,3 W/m ² K	Einzelgebäudeversorgung mit Gas-Brennwertkessel	-
Variante 2 ($v = 2$)	20 cm	14 cm	16 cm	1,0 W/m ² K	Einzelgebäudeversorgung mit L/W-Wärmepumpen	50 % der Gebäude mit je 40 m ² PV-Fläche
Variante 3 ($v = 3$)						50 % der Gebäude mit je 40 m ² PV-Fläche + 10 kWh Batteriespeicher
Variante 4 ($v = 4$)						50 % der Gebäude mit je 40 m ² PV-Fläche + Quartiersstromnetz mit 75 kWh Batteriespeicher

Bezüglich der ökonomischen Bewertung für das ausgewählte Typquartier sollen an dieser Stelle noch zwei Anmerkungen gemacht werden. Bei dem Quartier ist von einer heterogenen Eigentümerstruktur auszugehen. Die ökonomische Bewertung für das Quartier als Ganzes reicht daher nicht aus, um die wirtschaftliche Komponente der Sanierungsentscheidung für die einzelnen Eigentümer adäquat abzubilden. Der Fokus bei der beispielhaften Anwendung im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch darauf liegen, nicht eine strikt betriebswirtschaftliche Sicht, sondern vielmehr eine gesamtwirtschaftliche Perspektive der Wirtschaftlichkeit einzunehmen. Zu diesem Zwecke werden auch mögliche Förderungen für die Investitionskosten der Sanierungsmaßnahmen im Zuge dieses Anwendungsfalls in der ökonomischen Bewertung nicht berücksichtigt.

Sollte eine Bewertung auf Quartiersebene eine Vorteilhaftigkeit in der ökonomischen Bewertung unter gesamtwirtschaftlichem Fokus im Vergleich zu anderen Varianten zeigen, so kann dies als Anreiz für die Schaffung geeigneter Geschäftsmodelle gesehen werden, welche die ökonomische Vorteilhaftigkeit für alle Beteiligten herstellen. Hierbei sind allerdings die anfallenden Transaktionskosten zu berücksichtigen.

6.2 Definition der betrachteten Szenarien

In Kapitel 5.6.3 wurden die ökonomischen und ökologischen Parameter vorgestellt, deren Unsicherheit im Rahmen der Methodik über eine Szenarienbetrachtung abgebildet wird. Hierbei handelt es sich um die Entwicklung der Preise und Emissionsfaktoren der Energieträger über den Betrachtungszeitraum sowie die Preisentwicklungen der Anlagentechnik und die Erwartungen bezüglich der Inflation und alternativer Renditen über den Kalkulationszins. Zudem ist die Entscheidung, ob eine Klimaveränderung über den Betrachtungszeitraum berücksichtigt wird, für die Szenarien zu treffen (siehe Kapitel 5.5.3.8).

Für den hier verwendeten Anwendungsfall werden die in Tabelle 6-3 dargestellten Szenarien betrachtet. Das erste Szenario ($z = 1$) stellt dabei eine konstante Fortschreibung der am Beginn der Betrachtung herrschenden Randbedingungen über den gesamten Betrachtungszeitraums dar. Dieses ist als sehr unwahrscheinlich anzusehen, kann jedoch als Vergleich für die Auswirkungen der Änderungen in den anderen Szenarien herangezogen werden. Zudem findet diese Art der Fortschreibung in deterministischen Bewertungsansätzen häufig noch Anwendung.

Tabelle 6-3: Definierte Szenarien für den Anwendungsfall

Modellvariablen	Szenario 1 ($z = 1$)	Szenario 2 ($z = 2$)	Szenario 3 ($z = 3$)	Szenario 4 ($z = 4$)	Szenario 5 ($z = 5$)
$gwp_{Gas,z,t}$	konst.	konst.	↓ H ₂ Substitution ab 2030	konst.	konst
$gwp_{Strom,z,t}$	konst.	↓ linear bis 2045	↓ linear bis 2045	↓ linear bis 2045	↓ linear bis 2045
$cost_{Gas,z,t}$	konst.	↑ +2 % p.a.	↑ +5 % p.a.	↑ +2 % p.a.	↑ +2 % p.a.
$cost_{Strom,z,t}$	konst.	leicht fallend	leicht fallend	leicht fallend	leicht fallend
$C_{Ersatz,WP,z,t}$	0 % p.a.	↓ -2 % p.a.	↓ -2 % p.a.	↓ -2 % p.a.	↓ -2 % p.a.
$C_{Ersatz,Batterie,z,t}$	0 % p.a.	↓ -2 % p.a.	↓ -2 % p.a.	↓ -2 % p.a.	↓ -2 % p.a.
$C_{Ersatz,Gaskessel,z,t}$	0 % p.a.	0 % p.a.	↑ +2 % p.a.	0 % p.a.	0 % p.a.
r_z	3 %	3%	3%	6 %	3%
$klima_z$	0	0	0	0	1

Die spezifischen Emissionsfaktoren der Energieträger werden aus Publikationen des Umweltbundesamts verwendet. Als spezifischer Emissionsfaktor des deutschen Strommix wird der aktuellste vom Umweltbundesamt veröffentlichte Wert von $gwp_{Strom,1,t} = 485$ Gramm CO_{2,äq}/kWh angesetzt [Icha/Lauf (2022)]. Für Erdgas werden entsprechend $gwp_{Gas,1,t} = 200$ Gramm CO_{2,äq}/kWh verwendet [Jührich (2022)].

Die aktuellen Preise für Strom und Erdgas werden aus den Analysen des BDEW (2023a) und BDEW (2023b) zum Preisniveau des 1. Quartals 2023 verwendet. Diese liegen bei $cost_{\text{Strom},1,t} = 46,9$ ct/kWh für Strom und $cost_{\text{Gas},1,t} = 16,1$ ct/kWh für Gas. Der Kalkulationszins r_1 wird in Analogie zu anderen Bewertungssystemen auf einen für Wohngebäude üblichen Wert von 3 % festgesetzt [bspw. DGNB (2018)]. Die Klimaveränderung über den Betrachtungszeitraum wird nicht berücksichtigt ($klima_1 = 0$).

Im zweiten Szenario $z = 2$ werden für die Entwicklungen über den Betrachtungszeitraum Annahmen gewählt, die im Hinblick auf die in Kapitel 2.1.1 dargestellten, politischen Zielsetzungen als wahrscheinlicher als die Annahmen für $z = 1$ eingestuft werden können. Für die Entwicklung der Ersatzkosten wird für die Technologien Wärmepumpe und Batteriespeicher eine jährliche Kostendegression von 2 % angenommen. Sowohl die Wärmepumpen als auch die Batteriespeicher erfahren in den letzten Jahren einen Markthochlauf mit einer deutlichen Steigerung der Absatzzahlen [BWP (2023); BSW (2023)]. Durch die damit verbundenen Skaleneffekte ist von einer Abnahme der realen Preise für diese Produkte auszugehen.

Für den Strom- sowie für den Gaspreis ist zu erwarten, dass das zu Beginn 2023 herrschende hohe Preisniveau langfristig wieder sinken wird. Das derzeitige Niveau ist insbesondere auf den Angebotsschock durch die Abkehr von russischen Gasimporten als Reaktion auf den von Russland initiierten Krieg in der Ukraine zurückzuführen [vbw/Prognos (2022)]. Für die langfristige Entwicklung des Strompreises haben eine Vielzahl an Studien Prognosen erstellt. Im Rahmen der Arbeit wird die langfristige Preisentwicklung anhand einer der aktuellsten Studien im Auftrag des BEE (2021) abgebildet. Hierbei wird ein leichter realer Rückgang des Strompreises $cost_{\text{Strom},2,t}$ angesetzt.

Für den Gaspreis ist kein Rückgang auf das Preisniveau von vor 2021 zu erwarten, da die nun preisbildenden Flüssiggas-Lieferungen höhere Beschaffungskosten bedingen [vbw/Prognos (2022)]. Zudem ist mit einer Preissteigerung durch den in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Emissionshandel zu rechnen. Für das Szenario wird daher eine jährliche reale Steigerung des Gaspreises $cost_{\text{Gas},2,t}$ von 2 % angesetzt. In Tabelle 6-4 sind die für $z = 2$ angesetzten Stützstellen des Strom- und Gaspreises dargestellt, zwischen denen linear interpoliert wird.

Zudem sind die für $z = 2$ angenommenen Entwicklungen der spezifischen Treibhausgasemissionen der Energieträger in Tabelle 6-4 angegeben. Während für Gas ein konstanter Ansatz über den Betrachtungszeitraum gewählt wird, wird für die Emissionen des Strombezugs eine deutliche Reduktion gemäß den politischen Zielsetzungen angenommen.

Tabelle 6-4: Entwicklung der spezifischen Treibhausgasemissionen und Kosten der Energieträger Gas und Strom über den Betrachtungszeitraum im Szenario $z = 2$

Entwicklung der Energieträger für $z = 2$		Stützstellen des Betrachtungszeitraums							
		2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
$gwp_{Strom,2,t}$	in g CO _{2,äq} /kWh	485	400	300	200	100	50	20	20
$gwp_{Gas,2,t}$		200	200	200	200	200	200	200	200
$cost_{Gas,2,t}$	in ct/kWh	16,1	7,1	7,8	8,6	9,4	10,4	11,4	12,5
$cost_{Strom,2,t}$		46,9	32,2	31,2	28,2	31,3	30,1	29,5	29,5

Für das Szenario $z = 3$ wird eine Dekarbonisierung der Gasversorgung über eine Variation der spezifischen Treibhausgasemissionen $gwp_{Gas,3,t}$ über den Betrachtungszeitraum abgebildet. Dies erfolgt durch die sukzessive Substitution durch sogenannten „grünen“ Wasserstoff, der per Elektrolyse unter Verwendung von erneuerbaren Energien erzeugt wird. Die Beimischung des Wasserstoffs wird jedoch erst ab 2030 angesetzt, um die Investitions- und Adaptionszeiten zu berücksichtigen. Vorher wird der derzeit beobachtbaren Erhöhung der spezifischen Emissionen aufgrund der Substitution von russischem Erdgas durch Flüssiggas (siehe Kapitel 5.6.3.1) durch einen Anstieg bis 2025 Rechnung getragen.

Da hier in der Beschaffung mit deutlich steigenden Kosten im Vergleich zu konventionellem Erdgas zu rechnen ist [Schmitt (2022)], wird die jährliche reale Preissteigerung von $cost_{Gas,3,t}$ auf 5 % erhöht. Die für das Szenario angesetzten Entwicklungen beim Energieträger Gas sind in Tabelle 6-5 dargestellt. Alle anderen Variablen bleiben im Vergleich zu $z = 2$ unverändert.

Tabelle 6-5: Entwicklung der spezifischen Treibhausgasemissionen und Kosten der Energieträger Gas und Strom über den Betrachtungszeitraum im Szenario $z = 3$

Entwicklung der Energieträger für $z = 3$		Stützstellen des Betrachtungszeitraums							
		2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
$gwp_{Strom,3,t}$	in g CO _{2,äq} /kWh	485	400	300	200	100	50	20	20
$gwp_{Gas,3,t}$		200	240	200	180	150	50	20	20
$cost_{Gas,3,t}$	in ct/kWh	16,1	7,1	8,9	9,7	10,7	11,8	13,0	14,3
$cost_{Strom,3,t}$		46,9	32,2	31,2	28,2	31,3	30,1	29,5	29,5

Als viertes Szenario ($z = 4$) wird der Kalkulationszins r_4 auf 6 % erhöht, während alle anderen Variablen im Vergleich zu $z = 2$ unverändert bleiben. Dieser hohe Kalkulationszins stellt eine starke Erhöhung der erwarteten Vergleichsrendite dar (siehe Kapitel 4.2.3). Das Szenario wird in die Betrachtung einbezogen, um die Auswirkungen der Zinsänderung auf die Bewertungsergebnisse untersuchen zu können.

Als letztes Szenario wird für $z = 5$ die Klimaveränderung innerhalb des Betrachtungszeitraums durch die Verwendung des TRJ2045 (siehe Kapitel 5.5.3.8) für die Energiebedarfsmodellierung ($klima_5 = 1$) berücksichtigt. Die anderen Variablen bleiben in Vergleich zu $z = 2$ unverändert. Hiermit kann die Auswirkung der zu erwartenden Klimaveränderung auf die Bewertungsergebnisse verdeutlicht werden.

Als Betrachtungszeitraum werden für alle Szenarien 30 Jahre festgelegt. Dies deckt den Zeitraum bis zur, durch die politischen Vorgaben gesetzten, Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestands sowie Energiesystems ab. Damit wird deutlich, dass aufgrund der Nutzungszyklen eine zum jetzigen Zeitpunkt anstehende Sanierungsentscheidung bereits den angestrebten Zielzustand 2045 zur Folge hat.

6.3 Festlegung der ökologischen und ökonomischen Datenbasis

Neben den definierten Ausgangszuständen, Sanierungsvarianten und Szenarien ist zudem eine Auswahl über die zu verwendende Datenbasis der Anschaffungskosten und der Umweltwirkungen zu treffen. Die in der Methodik eingeführten Zufallsvariablen für die Berücksichtigung der Unsicherheiten sind sowohl bei den Anschaffungskosten als auch beim Treibhauspotenzial über eine prozentuale Abweichung von einem festzulegenden Ausgangswert definiert.

Für die Prozessemissionen der Herstellung und der Entsorgung wird die ÖKOBAUDAT-Datenbank 2021-II verwendet. Wie in Kapitel 4.2.2.1 erläutert, stellt diese in Deutschland einen Standard in der Verwendung für gebäudebezogene Ökobilanzen dar. Die Datenbank umfasst generische Datensätze für einen Großteil der relevanten Bauteile und Anlagenkomponenten, für die durch die Erstellungskriterien eine einheitliche Datenqualität sichergestellt werden kann. Die verwendeten Datensätze sind in Tabelle C-1 in Anhang C dargestellt. Für die Fenster und für die Wärmenetztrassen sind keine direkt verfügbaren Datensätze vorhanden. Diese werden daher aus den Mengen der einzelnen Komponenten zusammengesetzt. Die Berechnung kann ebenfalls in Tabelle C-1 nachvollzogen werden.

Für die Anschaffungskosten der Dämmmaßnahmen werden die Kostenfunktionen von Koch et al. (2021) verwendet. Diese stellen eine Aktualisierung der ursprünglich zwischen 2012 und 2015 erhobenen Kosten abgerechneter Modernisierungsvorhaben eines großen Wohngebäudebestands dar. Die Kosten der Dämmmaßnahmen werden dabei für verschiedene Bauteile in Abhängigkeit der Dämmstoffdicken auf Vollkostenbasis ermittelt.

Für die Anlagentechnik werden aus den Angaben des BKI (2022a) und BKI (2022b), die auch für die Ermittlung der Unsicherheitsspannen verwendet werden, Kostenfunktionen abgeleitet. Eine Zusammenstellung aller für die Anwendungsbeispiele verwendeten Kostenfunktionen der Anschaffungskosten können Tabelle C-2 und Tabelle C-3 in Anhang C entnommen werden.

Für die Batteriespeicher sind in den genannten Quellen nicht ausreichend Daten für die Ableitung von Funktionen verfügbar. Für diese werden daher die Daten aus dem Marktbericht des Centralen Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerks (C.A.R.M.E.N. e.V.) ausgewertet [C.A.R.M.E.N. (2023)]. Es liegen 132 Datensätze vor, aus denen ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Nutzkapazität und den Anschaffungskosten über eine Regression hergestellt wird. Dabei werden die Batteriespeicher aufgrund der Charakteristik der Kostendaten in zwei Größenklassen (≤ 50 kWh und > 50 kWh) eingeteilt, für die jeweils eine lineare Kostenfunktion ermittelt wird. Die Datenpunkte zur Erstellung der Kostenfunktion sind in Abbildung C-1 in Anhang C dargestellt.

Die Nutzungskosten werden als prozentualer Anteil der Anschaffungskosten definiert. In der Regel werden der Anteil für Instandsetzung und der Anteil für Wartung und Inspektion getrennt voneinander ausgewiesen. Für die Anlagentechnik werden die in der VDI 2067 Beiblatt 1 angegebenen Ansätze verwendet. Für die Bauteile werden die in der ökonomische Bewertung des DGNB Systems [DGNB (2018)] verwendeten Ansätze übernommen. Die für die Anwendung verwendeten Ausgangswerte der Nutzungskosten sind in Tabelle C-3 in Anhang C dargestellt.

6.4 Anwendungsfall Einfamilienhäuser

6.4.1 Sensitivitätsanalyse der Energiebedarfsmodellierung eines Einzelgebäudes

6.4.1.1 Ausgangszustand des Gebäudes

Vor der eigentlichen Bewertung wird im Rahmen dieser Arbeit eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese kann verwendet werden, um den Einfluss von Änderungen einzelner Modellvariablen auf die Berechnungsergebnisse zu quantifizieren und damit die Parameter zu identifizieren, welche die größten Streuungen der mit den Modellen ermittelten Energiebedarfe sowie Bewertungsindikatoren bedingen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse lassen sich zudem zur Plausibilisierung der Energiebedarfsmodellierung verwenden.

In Kapitel 5.5.3 wurden die Verteilungsfunktionen für die Zufallsvariablen, welche die Modellparameter abbilden, für die verschiedenen Informationsniveaus definiert. Aus dem in Kapitel 6.1 gewählten Ausgangszustand ergeben sich die Mittelwerte der Funktionen. Für das EFH mit einem Haushalt erfolgt die Modellierung über 17 Zufallsvariablen für das Gebäude und die Anlagentechnik sowie 9 Variablen für die Abbildung des Nutzerverhaltens des Haushaltes. Insgesamt ergeben sich somit $K_{A,1} = 26$ Modellvariablen für die Beschreibung des Ausgangszustands, die in Tabelle 6-6 zusammengefasst sind. Die sich für den spezifischen Anwendungsfall ergebenden Funktionsparameter für die vier möglichen Informationsniveaus der Zufallsvariablen sind zur Nachvollziehbarkeit in

6 Beispielhafte Anwendung der entwickelten Methodik

Anhang B in Tabelle B-2 und Tabelle B-3 dargestellt. Da hier nur ein Gebäude mit einem Haushalt betrachtet wird, wird zur Übersichtlichkeit im Folgenden auf die Indizes $g = 1$ und $anw = 1$ für die Zufallsvariablen verzichtet.

Für die Sensitivitätsanalyse werden die Parameter einzeln variiert, um die Auswirkungen auf die Energiebedarfe des Gebäudes zu ermitteln. Dazu werden nicht direkt die Werte $x_{ka,n}$ der die Parameter beschreibenden Variablen X_{ka} variiert. Stattdessen erfolgt die Variation über die Realisierungen $y_{ka,n}$ der gleichverteilten Zufallsvariablen Y_{ka} , welche für die Zufallszahlgenerierung der Monte-Carlo Simulation verwendet werden. Die resultierenden Realisierungen von X_{ka} ergeben sich dann über die Nutzung der inversen Verteilungsfunktionen (siehe Gl. 3-17 in Kapitel 3.2.2). Dieses Vorgehen wird aufgrund der vereinfachten Handhabung im Rahmen der verwendeten softwareseitigen Implementierung (siehe Kapitel 5.7) gewählt.

Tabelle 6-6: Zufallsvariablen für das Energiebedarfsmodell des Einfamilienhauses im Ausgangszustand

Variable	Beschreibung	Variable	Beschreibung
Geometrie		Gebäudehülle	
X_{gfl}	Grundfläche	X_{Uda}	U-Wert Dach
X_{lbv}	Verhältnis Länge zu Breite	X_{Uaw}	U-Wert Außenwand
X_{gh}	Geschosshöhe	X_{Ufe}	U-Wert Fenster
X_{neig}	Dachneigung	X_{Uog}	U-Wert oberste Geschossdecke
X_{fea}	Fensteranteil	X_{Ukd}	U-Wert Bodenplatte
X_{aus}	Ausrichtung	X_{Uwb}	Wärmebrückenzuschlag
		X_{Inf}	Infiltrationsluftwechsel
Nutzung		Anlagentechnik; $v = 0$	
X_{tSet}	Soll-Raumtemperatur	$X_{ke,0}$	Wirkungsgrad Heizkessel
X_{tSenk}	Nachtabenkung der Solltemperatur	$X_{pump,0}$	Wirkungsgrad Pumpen
X_{hSenk}	Ende der Nachtabenkung	$X_{vol,0}$	Volumen Speicher
X_{dSenk}	Dauer Nachtabenkung	$X_{verlust,0}$	Anteil Verteilverluste
X_{ach}	Nutzungsbedingter Luftwechsel		
X_{int}	Interne Wärmegewinne		
X_{tww}	Trinkwarmwasserbedarf		
X_{pwr}	Strombedarf		
X_{profil}	Stromprofil		

Die Grundkonfiguration wird über $y_{ka} = 0,5$ für alle ka definiert. Das Informationsniveau in_{ka} wird für alle Parameter konstant gehalten. Die untersuchten Variationsschritte für $y_{ka,n}$ sind in Tabelle 6-7 dargestellt. Diese sind so gewählt, dass sie bei einer Normalverteilung einer Variation von $x_{ka,n}$ von $0,5\sigma$; 1σ und 2σ entsprechen. Die Wahl der Abweichungen in beide Richtungen mit mehreren Schrittweiten erfolgt, um auch Aussagen über die Linearität der Sensitivität treffen zu können. Dieses Vorgehen folgt den Empfehlungen von Macdonald/Strachan (2001). Neben der Grundkonfiguration ergeben sich somit für jedes Informationsniveau sechs Modelle je variiertem Parameter. Für die Nutzerparameter ist $in_{ka} = 1$ nicht definiert. In der Gesamtheit werden 99 Modellvariationen für den Ausgangszustand simuliert.

Tabelle 6-7: Gewählte Variationsschritte für die Sensitivitätsanalyse

n	1	2	3	4	5	6
$y_{ka,n}$	0,0228	0,1587	0,4013	0,5987	0,8413	0,9772
$x_{ka,n}$ wenn $X_{ka} \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$	$\mu - 2\sigma$	$\mu - 1\sigma$	$\mu - 0,5\sigma$	$\mu + 0,5\sigma$	$\mu + 1\sigma$	$\mu + 2\sigma$

Durch die Analyse zeigt sich, dass von den 26 Modellvariablen die Änderung des U-Werts der Außenwände $X_{U_{aw}}$ die größten Auswirkungen auf den Energiebedarf des Gebäudes $Q_{f,Geb}$ hat. In Abbildung 6-1 ist auf der linken Seite die relative Abweichung des U-Werts der Außenwände im Vergleich zur Grundkonfiguration für die gewählten Variationsschritte in den vier Informationsniveaus in Relation zu der sich aus der Variation ergebenden relativen Abweichung des Endenergiebedarfs des EFHs aufgetragen. Insbesondere für das mit Quadraten dargestellte Informationsniveau $in_{U_{aw}} = 4$ zeigt sich eine deutliche Steigerung der resultierenden Abweichungen im Endenergiebedarf. Dies lässt sich durch die hohe Streubreite des U-Werts ($CoV = 0,5$) sowie einen starken Einfluss des Transmissionswärmeverlusts über die größte Bauteilfläche im Gebäude erklären.

Auf der rechten Seite der Abbildung 6-1 ist im Vergleich die resultierende relative Abweichung des Endenergiebedarfs aufgetragen, die sich durch die Variation der Verteilungsverluste $X_{verlust}$ ergibt. Es wird deutlich, dass für die maximal betrachtete Variation in $in_{verlust} = 4$ nur die Hälfte der für den U-Wert der Außenwand beobachteten Abweichung im Endenergiebedarf erreicht wird, auch wenn die Variation des Variablenwerts $X_{U_{aw}}$ etwa 100 % beträgt.

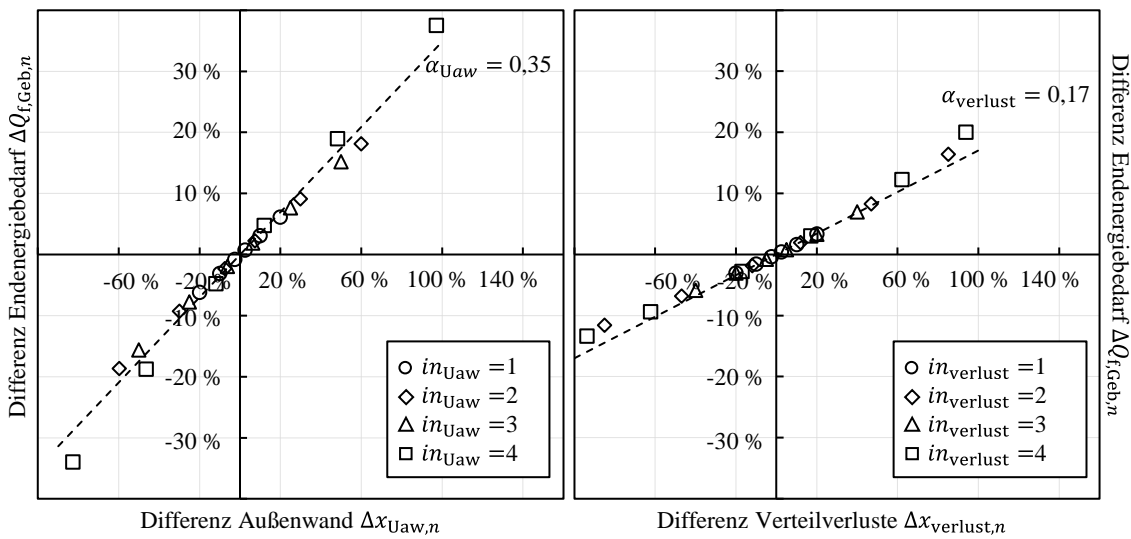


Abbildung 6-1: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den U-Wert der Außenwände X_{Uaw} und die Verteilverluste $X_{verlust}$

Verdeutlicht werden kann dies über die Approximation eines Sensitivitätskoeffizienten α_{ka} über die Steigung einer den Nullpunkt schneidenden Geraden, die durch eine lineare Regression über die Variationspunkte ermittelt wird. Der approximierte Sensitivitätskoeffizient des U-Werts der Außenwand α_{Uaw} beträgt mit 0,35 etwa das Doppelte des Koeffizienten der Verteilverluste $\alpha_{verlust} = 0,17$. Der Koeffizient sollte aufgrund der Verwendung der Informationsniveaus jedoch nicht als alleinige Kennzahl für die Sensitivität der Modellvariablen überinterpretiert werden.

Zum einen lässt sich für die Verteilverluste erkennen, dass sich für $in_{verlust} = 3$ (dargestellt mit Rauten in der Abbildung) annähernd die gleichen maximalen Abweichungen wie für $in_{verlust} = 4$ ergeben. Beim U-Wert der Außenwände wird durch die Verbesserung des Informationsstands eine deutlich größere Reduktion der Streubreiten erreicht.

Zum anderen hat nicht nur der Sensitivitätskoeffizient, approximiert durch die Steigung der Geraden, Relevanz für die durch eine Eingangsvariable induzierten Ergebnisvariationen. Maßgeblich sind auch die angesetzten Streubreiten der Variablenwerte. Verdeutlicht wird dies durch die Betrachtung zweier weiterer Variablen. In Abbildung 6-2 sind links die Ergebnisse für die Sensitivität der Geschosshöhe X_{gh} und rechts für den nutzungsbedingten Luftwechsel X_{ach} dargestellt. Obwohl der approximierte Sensitivitätskoeffizient der Geschosshöhe mit $\alpha_{gh} = 0,68$ deutlich größer als der Koeffizient des nutzungsbedingten Luftwechsels $\alpha_{ach} = 0,09$ ist, werden durch die Luftwechselvariation höhere Abweichungen im Endenergiebedarf induziert. Dies ist insbesondere durch die deutlich höhere Streubreite von X_{ach} über alle Informationsniveaus zu erklären. Die Geschosshöhe streut nur für $in_{gh} = 4$ in einem Maße, dass der Energiebedarf relevant beeinflusst wird.

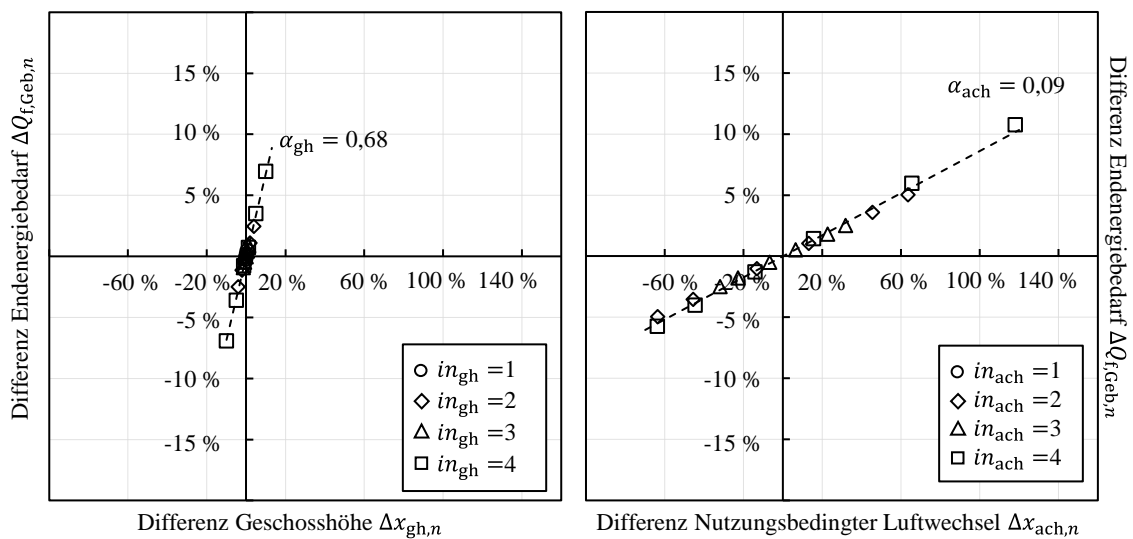


Abbildung 6-2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Geschosshöhe X_{gh} und den nutzungsbedingten Luftwechsel X_{ach}

Die Ergebnisse aller 26 Modellvariablen sind zur Übersichtlichkeit in Anhang D dargestellt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen hat von den Geometrieparametern die Streuung der Grundfläche einen großen Einfluss auf den Energiebedarf. Die Streuungen der Dachneigung, des Breite-zu-Länge Verhältnis des Grundrisses, des Fensteranteils und der Orientierung haben hingegen nur einen sehr geringen Einfluss auf den Energiebedarf. Bei den Parametern der Anlagentechnik ist der Einfluss der Verteilverluste am größten. Der Einfluss des Wirkungsgrads des Heizungskessels ist über alle vier Informationsniveaus sichtbar. Der Einfluss der Streuung des Pumpenwirkungsgrads sowie des Warmwasserspeichervolumens ist vernachlässigbar.

Auch der Einfluss der Streuung in den U-Werten der Bodenplatte sowie der obersten Geschossdecke ist vernachlässigbar. Bei den Nutzerparametern haben die Streuungen des Beginns sowie der Dauer der Nachtabsenkung nur einen sehr geringen Einfluss auf den Endenergiebedarf. Diese Ergebnisse können genutzt werden, um bei einer Begehung zur Datenaufnahme vor Durchführung der Bewertung die Auswahl der aufzunehmenden Daten einzuschränken.

6.4.1.2 Sanierungsvarianten des Gebäudes

Für die Sanierungsvarianten findet gemäß den Ausführungen in Kapitel 5.5.2 keine Festlegung verschiedener Informationsniveaus für die Sanierungsparameter kv statt. Für das Einfamilienhaus ergeben sich gemäß den Vorgaben der Methodik aus Kapitel 5.5.3 für die Sanierungsvariante $v = 1$ $K_{v1} = 15$ Zufallsvariablen zur Abbildung der unsicheren Modellparameter. Die Sanierungsvarianten $v = 2$ bis $v = 4$ beinhalten alle die Umstellung der Wärmeversorgung auf eine Wärmepumpe unter zusätzlicher Nutzung von PV-Anlagen

6 Beispielhafte Anwendung der entwickelten Methodik

auf der Hälfte der Gebäude im Quartier. Für die Gebäude ohne PV-Anlage ergeben sich ebenfalls $K_{V2} = 15$ Zufallsvariablen, bei Integration der PV-Anlage bzw. des Speichers erhöht sich die Zahl auf 17 bzw. 18 Zufallsvariablen. In Tabelle 6-8 sind die Zufallsvariablen für die Sanierungsvarianten im Anwendungsfall zusammengefasst.

Tabelle 6-8: Zufallsvariablen für die Anpassung des Energiebedarfsmodell des Einfamilienhauses in den Sanierungsvarianten

Zufallsvariablen	$v = 1$	$v = 2$	$v = 3$	$v = 4$
Gebäudehülle				
Dicke der aufgetragenen Dachdämmung	$X_{dda,1}$	$X_{dda,2} = X_{dda,3} = X_{dda,4}$		
Dicke der aufgetragenen Außenwanddämmung	$X_{daw,1}$	$X_{daw,2} = X_{daw,3} = X_{daw,4}$		
Dicke der aufgetragenen Dämmung der obersten Geschossdecke	$X_{dog,1}$	$X_{dog,2} = X_{dog,3} = X_{dog,4}$		
Wärmeleitfähigkeit der aufgetragenen Dachdämmung	$X_{lda,1} = X_{lda,2} = X_{lda,3} = X_{lda,4}$			
Wärmeleitfähigkeit der aufgetragenen Außenwanddämmung	$X_{law,1} = X_{law,2} = X_{law,3} = X_{law,4}$			
Wärmeleitfähigkeit der aufgetragenen Dämmung der obersten Geschossdecke	$X_{log,1} = X_{log,2} = X_{log,3} = X_{log,4}$			
U-Wert der erneuerten Fenster	$X_{Ufe,1}$	$X_{Ufe,2} = X_{Ufe,3} = X_{Ufe,4}$		
Wärmebrückenzuschlag nach Sanierung	$X_{Uwb,1}$	$X_{Uwb,2} = X_{Uwb,3} = X_{Uwb,4}$		
Infiltrationsluftwechsel nach Sanierung	$X_{inf,1}$	$X_{inf,2} = X_{inf,3} = X_{inf,4}$		
Anlagentechnik				
Kesselwirkungsgrad	$X_{ke,1}$			
COP der Wärmepumpe		$X_{wp,2} = X_{wp,3} = X_{wp,4}$		
Pumpenwirkungsgrad	$X_{pump,1} = X_{pump,2} = X_{pump,3} = X_{pump,4}$			
Volumen Wärmespeicher	$X_{vol,1}$	$X_{vol,2} = X_{vol,3} = X_{vol,4}$		
Anteil Leitungsverluste	$X_{verlust,1} = X_{verlust,2} = X_{verlust,3} = X_{verlust,4}$			
Fläche der PV-Module		$X_{solarA,2} = X_{solarA,3} = X_{solarA,4}$		
Wirkungsgrad der PV-Module		$X_{solarWk,2} = X_{solarWk,3} = X_{solarWk,4}$		
Kapazität Batteriespeicher			$X_{batt,3}$	$X_{batt,4}$
Nutzung				
Soll-Raumtemperaturerhöhung nach Sanierung	$X_{tZus,1} = X_{tZus,2} = X_{tZus,3} = X_{tZus,4}$			
Nutzungsbedingter Zusatz-Luftwechsel nach Sanierung	$X_{achZus,1} = X_{achZus,2} = X_{achZus,3} = X_{achZus,4}$			

Für alle Sanierungsvariablen zeigt sich ein deutlich geringerer Einfluss auf den Endenergiebedarf des Gebäudes als für die Variablen im Ausgangszustand. Dies ist maßgeblich in der Definition des höchsten Informationsniveaus für die Sanierungsmaßnahmen begründet. Spezifikationsunsicherheiten, die sich aus noch unbekanntem Parametern bspw. der zu wählenden Dämmstoffdicken oder Anlagenkomponenten ergeben, werden in der Methodik nicht dargestellt.

Um die Unterschiede bei den Ergebnissen zwischen den Sanierungsvarianten zu verdeutlichen, sind in Abbildung 6-3 die Sensitivitäten für die Modellvariablen zur Abbildung der Änderung des Infiltrationsluftwechsels nach der Sanierung $X_{\text{inf},v}$ (oben) sowie der Anpassung der Solltemperaturen $X_{\text{tZus},v}$ (unten) für die Variante $v = 1$ (links) $v = 2$ (rechts) dargestellt.

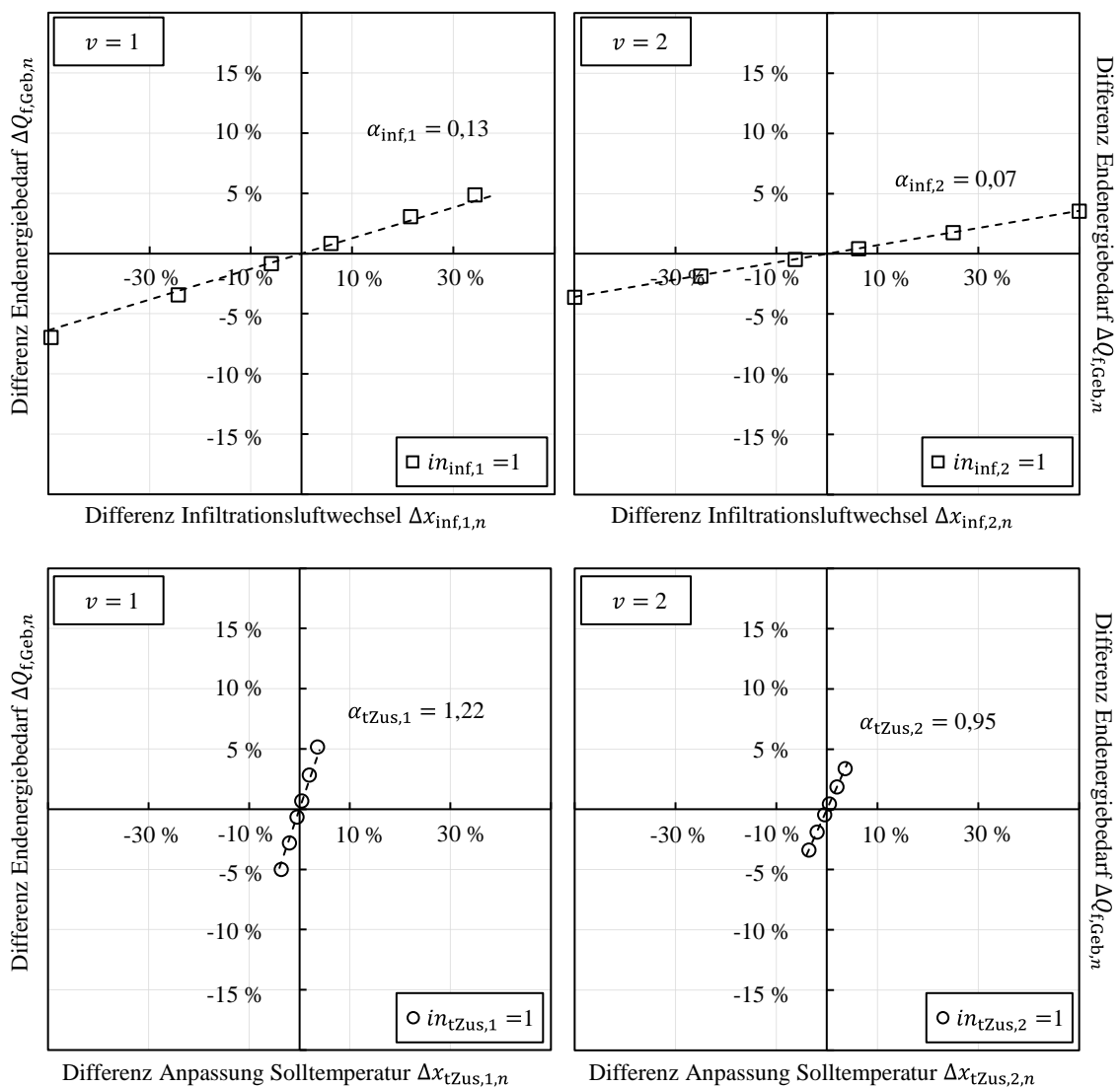


Abbildung 6-3: Sensitivitätsergebnisse für den Infiltrationsluftwechsel nach der Sanierung $X_{\text{inf},v}$ (oben) sowie die Anpassung der Solltemperatur $X_{\text{tZus},v}$ (unten) in der Sanierungsvariante $v = 1$ (links) und $v = 2$ (rechts)

Es zeigt sich, dass mit der Erhöhung der Dämmstärken in Variante $v = 2$ der Einfluss der Variablen auf den Endenergiebedarf sinkt. Dies lässt sich darüber erklären, dass beide Variablen Parameter beschreiben, welche einen Einfluss auf den Heizenergiebedarf haben, der bei dem höheren Dämmniveau nur noch einen geringeren Anteil am Gesamtenergiebedarf des Gebäudes ausmacht, da der Haushaltsstrombedarf auch nach der Sanierung als konstant angesetzt wird. Die Ergebnisse für alle weiteren Zufallsvariablen für die Sanierungszustände sind in Anhang D dargestellt.

6.4.2 Stochastische Energiebedarfsmodellierung eines Einzelgebäude

An die Sensitivitätsanalyse anschließend wird die stochastische Energiebedarfsmodellierung für die Einfamilienhäuser im Rahmen der für die Methodik definierten Monte-Carlo Analyse durchgeführt. Auch hierbei wird zur Übersichtlichkeit auf die Verwendung der Indizes g und anw verzichtet. Für den Informationsstand aller Modellparameter ka im Ausgangszustand $v = 0$ wird zunächst das Informationsniveau $in_{ka} = 4$ gewählt. Der Stichprobenumfang beträgt gemäß der Festlegung in Kapitel 5.5.5 $N = 128$. Für das Szenario $z = 5$ wurde eine Berücksichtigung der Klimaveränderung definiert, weshalb beide Klimazustände ($klima_z = 0$ und $klima_z = 1$) simuliert werden. Die Sanierungsvarianten $v = 2$ bis $v = 4$, welche die Wärmeversorgung über eine Wärmepumpe modellieren, unterscheiden sich auf Gebäudeebene lediglich durch die PV-Module sowie die Batteriespeicher. Für die Untersuchung werden daher ein Gebäudemodell ohne PV-Modul, ein Modell mit PV, und ein Modell mit PV und Batteriespeicher erstellt.

In Abbildung 6-4 sind die Ergebnisse der auf die mittlere beheizte Fläche des Typgebäudes bezogenen Jahresendenergiebedarfe $Q_{A,f,Geb,v}$ der 128 Stichproben in Form von Boxplots für den Ausgangszustand und die Sanierungsvarianten in den beiden Klimazuständen dargestellt. Insbesondere für den Ausgangszustand ist eine sehr große Streubreite der Ergebnisse zu erkennen. Die empirische Standardabweichung beträgt hier $63 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bei einem Stichprobenmittel von $238 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

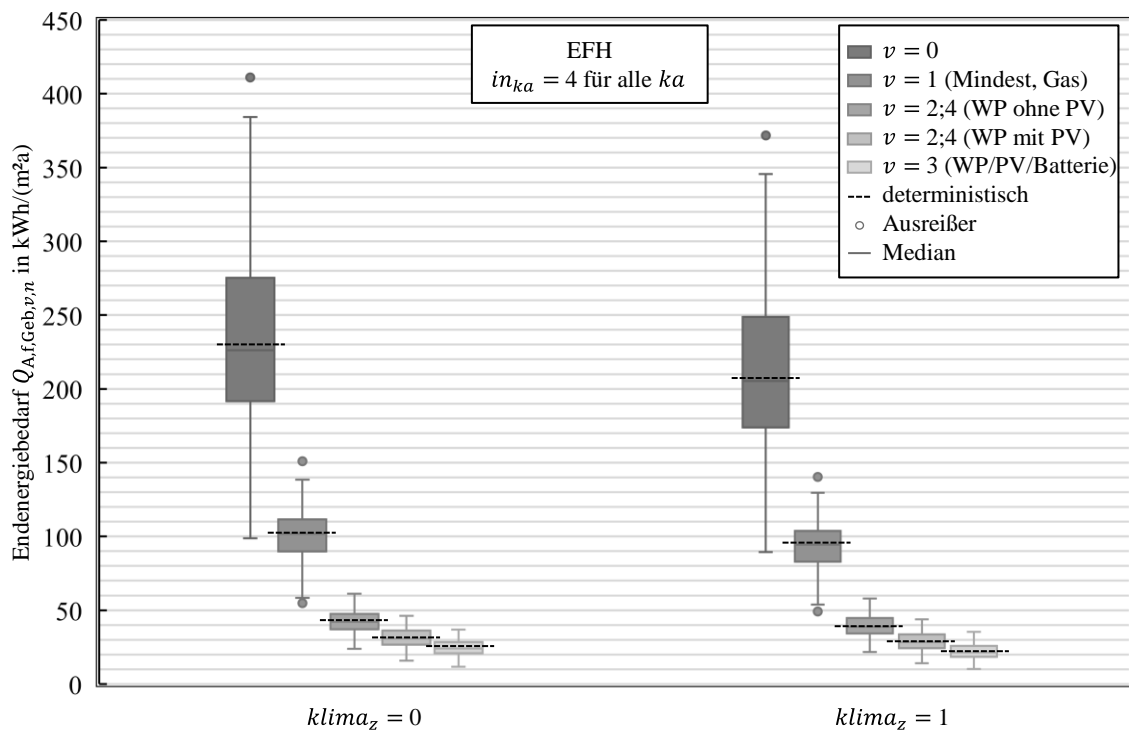


Abbildung 6-4: Ergebnisse der MCA für die Endenergiebedarfe eines Einzelgebäudes in den verschiedenen Varianten ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des zukünftigen Klimas

Für die Sanierungsvarianten ist der Endenergiebedarf erwartungsgemäß deutlich niedriger. Zudem sind die absoluten Streubreiten geringer. Bei der Mindestsanierungsvariante $v = 1$ sinkt auch die relative Streuung, die über die empirischen Variationskoeffizienten beschrieben werden kann ($c_v(Q_{A,f,Geb,1}) = 0,18$ im Vergleich zum Ausgangszustand $c_v(Q_{A,f,Geb,0}) = 0,27$). Dies lässt sich gut am Beispiel des U-Werts der Außenwand nachvollziehen. In der Sanierungsvariante $v = 1$ werden 14 cm Dämmung aufgebracht. Während der U-Wert im Ausgangszustand im Stichprobenmittel bei $1,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei einer empirischen Standardabweichung von $0,53 \text{ W/m}^2\text{K}$ liegt, sinkt dieser auf $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ mit einer empirischen Standardabweichung von $0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Streuungen des Transmissionswärmeverlusts durch die Außenwände und damit einhergehend des Energiebedarfs reduzieren sich hierdurch maßgeblich.

Für die Sanierungsvariante mit der Wärmepumpe zeigen sich absolut die kleinsten Streubreiten des Endenergiebedarfs, da dieser durch die nochmals erhöhten Dämmstärken sowie die Effizienz der Wärmepumpe im Stichprobenmittel deutlich geringer als in der Variante der Mindestsanierung $v = 1$ ist. Der empirische Variationskoeffizient bleibt jedoch im Vergleich zu $v = 1$ annähernd konstant, und steigt sogar, sofern die PV-Anlage und der Batteriespeicher mitberücksichtigt werden. Gerade die im Informationsniveau $in_{ka} = 4$ großen Streuungen für die Gebäudeausrichtung und Dachneigung bedingen hier Streuungen in der Stromerzeugung aus PV, wie bei der Betrachtung der verschiedenen

Informationsniveaus im Ausgangszustand im weiteren Verlauf dieser Arbeit deutlich wird. Der Variationskoeffizient der PV-Stromerzeugung liegt bei $c_v(Q_{PV,prod,Geb,3}) = 0,06$.

Als Darstellung einer deterministischen Berechnung ist in Abbildung 6-4 auch der Endenergiebedarf der Varianten für die mittlere Parameterkombination, die sich aus $y_{ka} = y_{kv} = 0,5$ für alle ka und kv ergibt, eingezeichnet. Es wird deutlich, dass diese annähernd dem Median der jeweiligen Stichproben entspricht. Durch die Nutzung der Sobol-Sequenz zur Zufallszahlgenerierung ist dies erwartbar. Im Folgenden kann der Median daher auch als Anhaltswert für das Ergebnis einer deterministischen Betrachtung herangezogen werden.

Wird die Klimaveränderung, in Abbildung 6-4 rechts dargestellt, betrachtet, so zeigt sich, dass aufgrund der steigenden Temperaturen die Wärmebedarfe und damit einhergehend auch die Gesamtenergiebedarfe der Gebäude in allen Varianten leicht sinken. Im Ausgangszustand ist dieser Einfluss mit einer prozentualen Senkung des Stichprobenmittels $\bar{x}(Q_{A,f,Geb,0}, klima_z = 1)$ um 10 % am höchsten, während die Senkung im Stichprobenmittel durch den veränderten Klimadatensatz bei der Sanierungsvariante mit Wärmepumpe und PV-Anlage nur 8 % beträgt. Dies ist aufgrund des geringeren Einflusses des Heizwärmebedarfs im Vergleich zum klimaunabhängigen Anwendungsstrom- und Trinkwarmwasserbedarf bei dem hochgedämmten Gebäude erwartbar.

In einem nächsten Schritt wird die Auswirkung einer Veränderung des Informationsniveaus des Ausgangszustand untersucht. Werden bspw. durch eine Vor-Ort Begehung im Zuge einer Energieberatung Informationen über den Ausgangszustand gesammelt, so können die erhobenen Daten verwendet werden, um die Informationsniveaus zu erhöhen und damit die Streubreiten der Eingangsparameter zu verkleinern. Für eine zweite Untersuchung wird daher das Informationsniveau zu $in_{ka} = 2$ für alle Parameter erhöht. Wie in Kapitel 6.1 erläutert, werden die Vor-Ort erfassten Mittelwerte hier möglichst als den für $in_{ka} = 4$ verwendeten Werten entsprechend angenommen.

In Abbildung 6-5 sind die Endenergiebedarfe für die verschiedenen Varianten, die sich aus der detaillierteren Information über den Ausgangszustand bei der MCA ergeben, den vorherigen Ergebnissen gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass das verbesserte Informationsniveau zu einer starken Verringerung der Streuungen des Energiebedarfs im Ausgangszustand führt ($c_v(Q_{A,f,Geb,0}, in_{ka} = 4) = 0,27$ zu $c_v(Q_{A,f,Geb,0}, in_{ka} = 2) = 0,12$). Zudem sinkt das Stichprobenmittel des Endenergiebedarfs im Ausgangszustand deutlich von $\bar{x}(Q_{A,f,Geb,0}, in_{ka} = 4) = 238 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ auf $\bar{x}(Q_{A,f,Geb,0}, in_{ka} = 2) = 197 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Dies ist insbesondere auf die Variablen der Gebäudehülle zurückzuführen. Für das Informationsniveau $in_{ka} = 4$ werden die Angaben für den mittleren Gebäudebestand verwendet. Diese ergeben eine schlechtere Qualität der Gebäudehülle, als für das Baujahr 1980 angenommen (siehe Tabelle 6-1).

Auch für die Sanierungsvarianten führt die geringere Streuung im Ausgangszustand zu verminderten empirischen Standardabweichungen. Die Abweichungen in den Mittelwerten sind jedoch analog zu den bisherigen Beobachtungen geringer, da der Heizwärmebedarf nur einen geringeren Anteil am Endenergiebedarf ausmacht.

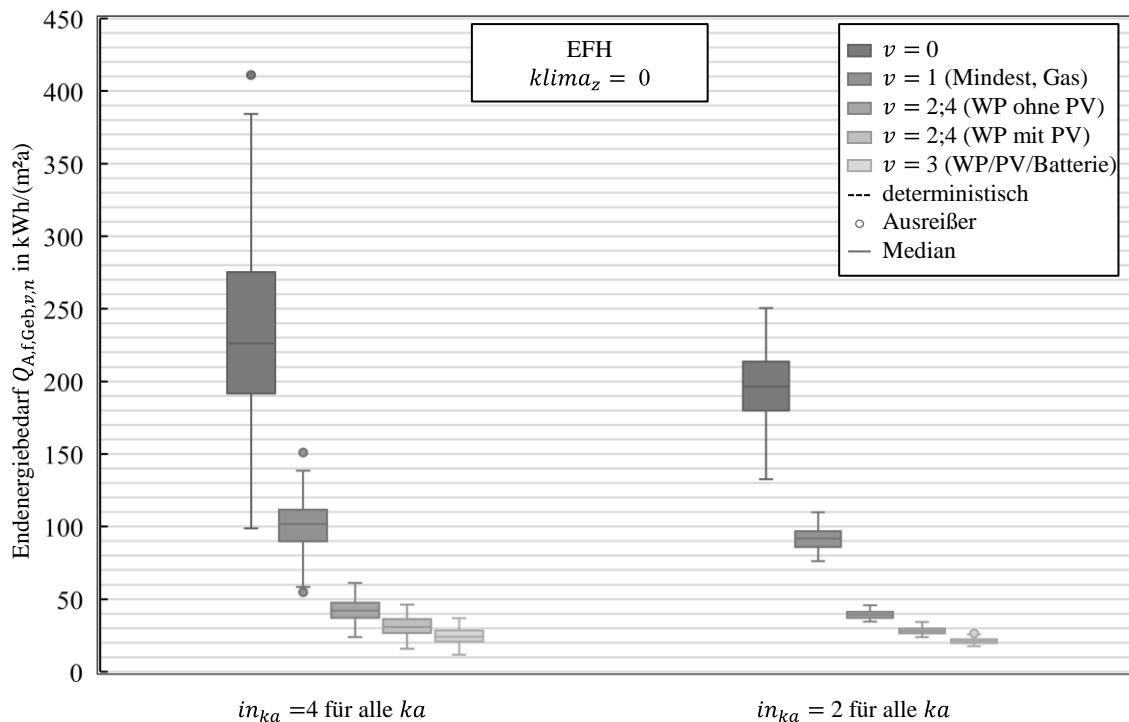


Abbildung 6-5: Ergebnisse der MCA für die Endenergiebedarfe der Varianten eines Einzelgebäudes für verschiedene Informationsniveaus der Modellparameter im Ausgangszustand

6.4.3 Stochastische Energiebedarfsmodellierung des Quartiers

Aufbauend auf den Erkenntnissen am Einzelgebäude wird der Endenergiebedarf des Quartiers aus zehn Einfamilienhäusern in seiner Gesamtheit modelliert. Die Einzelgebäude sind im Ausgangszustand alle mit demselben Parametersatz modelliert. Eine separate Simulation der Gebäude muss daher nicht vorgenommen werden. Stattdessen werden die zehn Gebäude jeweils zufällig aus den Einzelstichproben für alle $N = 128$ kombiniert. Die Zufallsziehung wird ebenfalls über eine Sobol-Sequenz, welche die Reihenfolge der Kombinationen bestimmt, ermittelt. Auch für den Quartiersenergiebedarf ergeben sich somit durch die MCA $N = 128$ Stichprobenergebnisse.

In der folgenden Abbildung 6-6 sind der Endenergiebedarf des Gebäudes in der Einzelbetrachtung und des Quartiers in seiner Gesamtheit von zehn Gebäuden gegenübergestellt für $in_{ka} = 4$ für alle Parameter und $klima_z = 0$. Es wird deutlich, dass die Streubreiten bei der Quartiersbetrachtung deutlich abnehmen, da sich die als unkorreliert angenommenen Zufallsvariablen auf der höheren räumlichen Ebene gemäß der Fehlerfortpflanzung ausgleichen. Der empirische Variationskoeffizient des Energiebedarfs sinkt bei

der Quartiersbetrachtung für den Ausgangszustand von $c_v(Q_{A,f,Geb,0}) = 0,27$ auf $c_v(Q_{A,f,Q,0}) = 0,08$ und damit in der erwartbaren Größenordnung der Wurzel der Gebäudeanzahl. Die Stichprobenmittel bleiben für die Quartiersbetrachtung im Vergleich zum Einzelgebäude annähernd konstant.

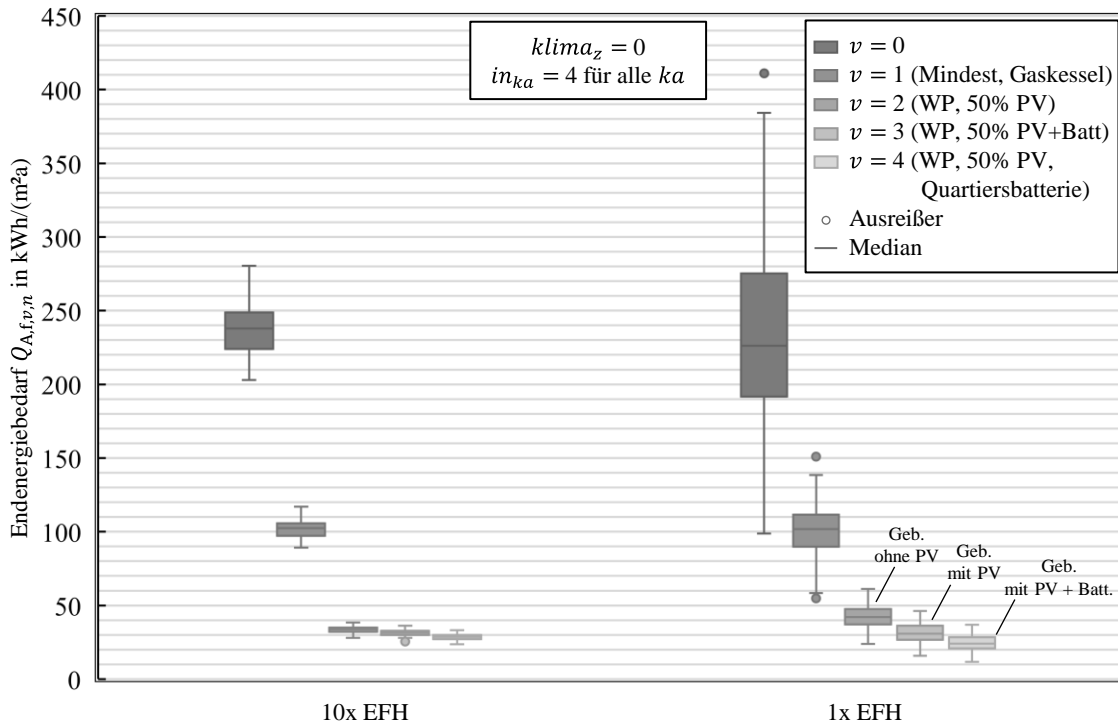


Abbildung 6-6: Vergleich der im Zuge der MCA ermittelten Endenergiebedarfe des Quartiers und eines Einzelgebäudes in den verschiedenen Varianten

Für das Quartier werden analog zum Vorgehen beim Einzelgebäude sowohl die Auswirkungen der Klimaveränderung (siehe Abbildung 6-7) als auch eines gesteigerten Informationsniveaus des Ausgangszustands (siehe Abbildung 6-8) auf den flächenbezogenen Endenergiebedarf des Quartiers dargestellt. Dabei werden die bereits auf Ebene der Einzelgebäude erzielten Erkenntnisse einer Verringerung des Energiebedarfs unter Berücksichtigung der Klimaveränderung sowie einer Verringerung der Streubreiten durch die Erhöhung des Informationsniveaus im Ausgangszustand auch für die Quartiersbetrachtung bestätigt.

Den Energiebedarf betreffend zeigt sich, dass sich der Endenergiebedarf des Quartiers durch die Umstellung der Wärmeversorgung auf Wärmepumpen in der Kombination mit einer PV-Anlage deutlich senken lässt. Für Aussagen über eine Vorteilhaftigkeit der Sanierungsvarianten ist jedoch zusätzlich die ökonomische und ökologische Bewertung vorzunehmen. Hierbei wird auch der erneuerbare Deckungsgrad, der sich bereits aus dem Energiebedarfsmodell ergibt, betrachtet.

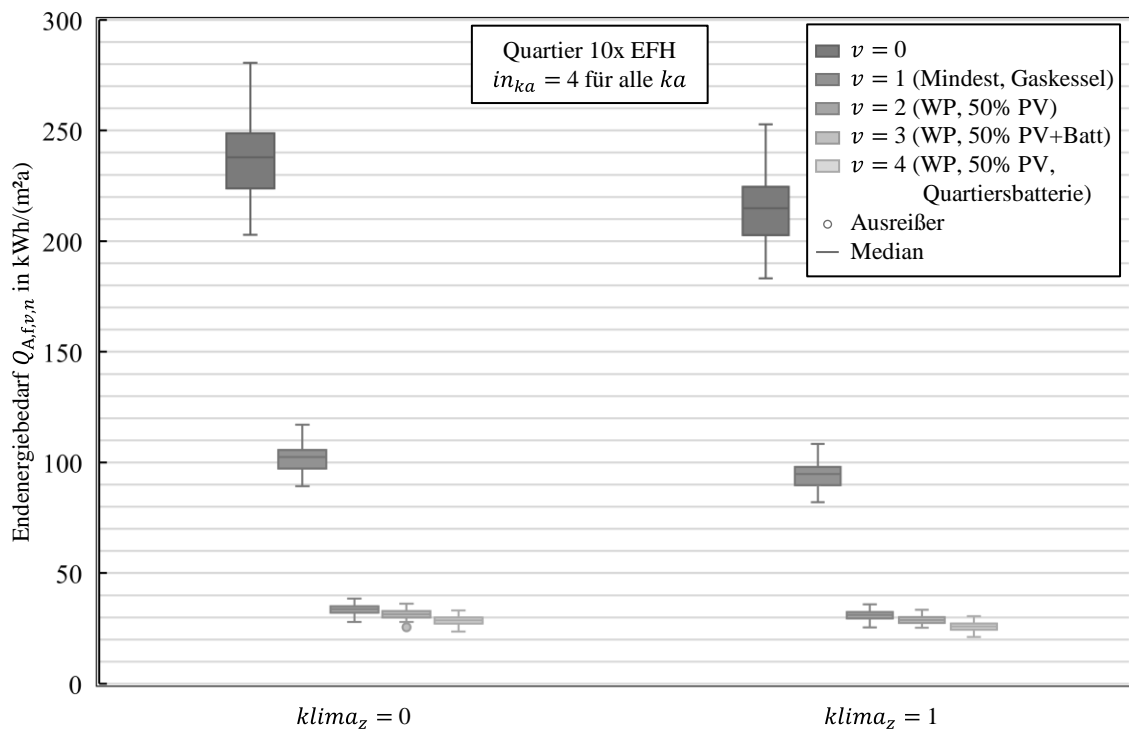


Abbildung 6-7: Vergleich der im Zuge der MCA ermittelten Endenergiebedarfe des Quartiers in den verschiedenen Varianten ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des zukünftigen Klimas

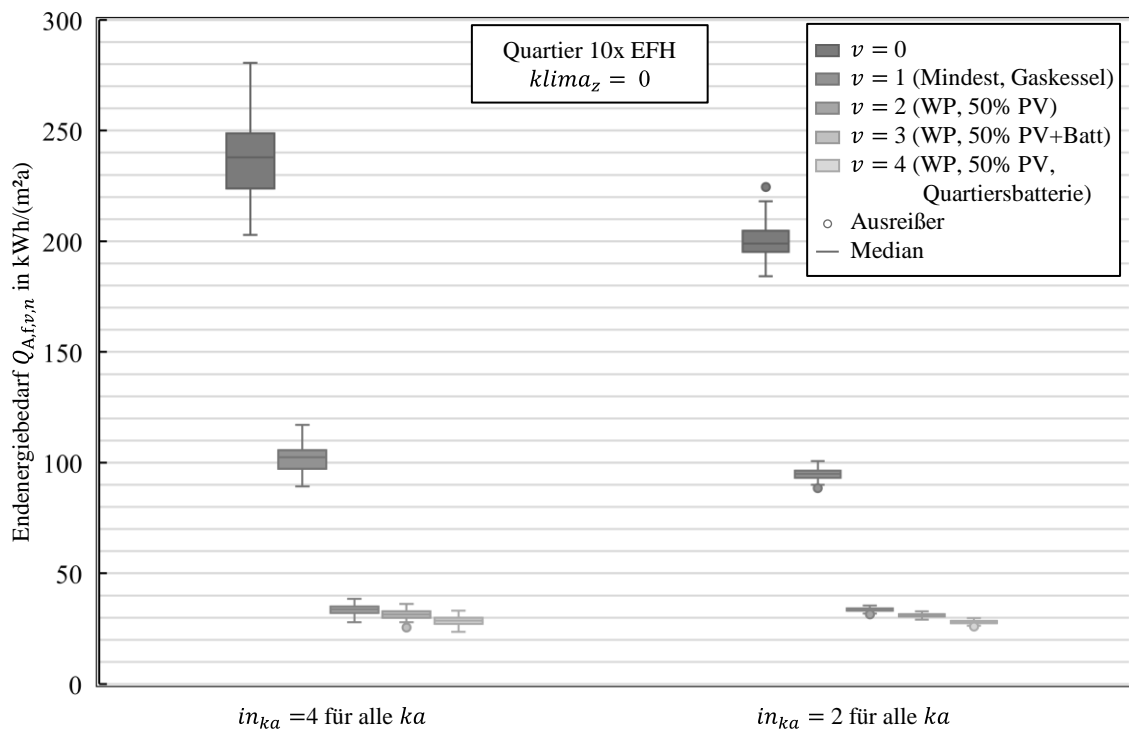


Abbildung 6-8: Ergebnisse der MCA für die Endenergiebedarfe der Varianten des Quartiers für verschiedene Informationsniveaus der Modellparameter im Ausgangszustand

6.4.4 Stochastische Bewertung der Sanierungsvarianten für das Quartier

6.4.4.1 Hinführung

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die stochastische Energiebedarfsmodellierung des Quartiers durchgeführt und die Ergebnisse auf ihre Plausibilität hin überprüft wurden, sollen in einem nächsten Schritt die Ergebnisse der Bewertungsmethodik für diesen Anwendungsfall analysiert werden. Hierfür werden die in Kapitel 5.4 definierten Kernindikatoren Treibhauspotenzial ($GWP_{v,z,n}$), erneuerbarer Deckungsgrad ($\eta_{cover,v,z,n}$) und der Barwert der Lebenszykluskosten ($C_{BW,v,z,n}$) berechnet. Die Bewertung ist für jedes der fünf in Kapitel 6.2 definierten Szenarien für jede Stichprobe n der MCA durchzuführen. Die stochastischen Endenergiebedarfe als Grundlage der Lebenszyklusbetrachtung ändern sich zwischen den Szenarien nur bei einer Änderung der Klimarandbedingungen $klima_z$. Im vorliegenden Anwendungsfall wird das zukünftige Klima nur für $z = 5$ berücksichtigt ($klima_5 = 1$). Für die Szenarien $z = 1$ bis 4 sind die zugrundeliegenden Energiebedarfsmodelle in der MCA demnach identisch.

Im Rahmen der Lebenszyklusbetrachtung werden die in Kapitel 5.6.2 definierten Zufallsvariablen zur Abbildung der Streuungen für die technischen Lebensdauern $TLD_{w,v}$ der Bauteile und Komponenten, der Anschaffungs- und Nutzungskosten sowie zur Abbildung der Streuung für die spezifischen Treibhauspotenziale der Prozesse verwendet. Für das Treibhauspotenzial ist dies die Variable X_{GWP} , für die Betriebskosten die Variable $X_{C,Betrieb}$ und für die Anschaffungskosten $X_{C,Invest,Dämm}$, $X_{C,Invest,Anlage}$, $X_{C,Invest,Fenster}$ und $X_{C,Invest,Batterie}$. Diese sind jeweils als Faktor definiert, der zur Multiplikation mit den mittleren Werten der Kosten- und Treibhauspotenzialansätzen verwendet wird.

Für die Streuungen der technischen Lebensdauern einer Komponente w in der Variante v , $TLD_{w,v}$, ist zudem die Anzahl der Komponenten im Quartier $anz_{LCC,w,v}$ für die angesetzten Standardabweichungen der Zufallsvariablen relevant (siehe 5.6.2.1). Für die Bauteile entspricht dies jeweils der Gebäudeanzahl und ist über die Varianten konstant. Durch die jeweils modellierte Einzelgebäudeversorgung im Quartier entspricht auch die Anzahl der Wärmeerzeuger den zehn Gebäuden. In den Varianten $v = 2$ bis 4 sind zudem fünf PV-Anlagen vorhanden. Für $v = 3$ sind zudem fünf Batteriespeicher angenommen, für $v = 4$ nur ein Quartiersbatteriespeicher. Die Variablen und angesetzten Anzahlen sind in Tabelle 6-9 zusammengefasst.

Tabelle 6-9: Zufallsvariablen für die technischen Lebensdauern in der Lebenszyklusbetrachtung

Komponente	Zufallsvariable	Anzahl in Variante				
		$v = 0$	$v = 1$	$v = 2$	$v = 3$	$v = 4$
Dämmung Außenwände	$X_{TLD,AW,v}$	10				
Dämmung sonstige Bauteile	$X_{TLD,Insu,v}$	10				
Fenster	$X_{TLD,Fenster,v}$	10				
Heizkessel (Gas)	$X_{TLD,Kessel,v}$	10			-	
Wärmepumpe	$X_{TLD,WP,v}$	-			10	
PV-Anlage	$X_{TLD,PV,v}$	-			5	
Batteriespeicher	$X_{TLD,Batterie,v}$	-	-	-	5	1
Trinkwarmwasserspeicher	$X_{TLD,Speicher,v}$	10				

6.4.4.2 Treibhauspotenzial

Für den Ausgangszustand mit dem Informationsniveau $in_{ka} = 4$ für alle 26 Modellparameter (siehe Kapitel 6.4.1.1) sind in Abbildung 6-9 das auf die beheizte Fläche A_{Beh} und ein Jahr des Betrachtungszeitraums T bezogene Treibhauspotenzial der Basisvariante und der Sanierungsvarianten des Quartiers für die fünf betrachteten Szenarien dargestellt. Es wird deutlich, dass die Basisvariante die größten Streuungen und gleichzeitig über alle Szenarien hinweg ein größeres Treibhauspotential als die Sanierungsvarianten aufweist. Für die Basisvariante ist hierbei wie in Kapitel 5.2 beschrieben eine Sanierung auf das (ordnungsrechtlich geforderte) Mindestniveau modelliert, sofern die Bauteile das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben.

Dies bedeutet, dass selbst in den ungünstigsten der angenommenen Fälle die Durchführung einer der Sanierungsvarianten zum Beginn des Betrachtungszeitraums zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Basisvariante führt. Zudem sind die Varianten mit der Versorgung über Wärmepumpen und PV-Anlagen ($v = 2$ und $v = 4$) in allen Szenarien in ökologischer Hinsicht der Mindestsanierung $v = 1$ überlegen. Für die Szenarien $z = 2, 4$ und 5 ist dies durch die angesetzte Dekarbonisierung des über das öffentliche Netz bezogenen Stroms plausibel. Für die Szenarien $z = 1$ und $z = 3$ ist die ökologische Vorteilhaftigkeit gleichsam bemerkenswert und wird daher nachfolgend eingehender diskutiert.

Im Szenario $z = 1$ wird keine Dekarbonisierung im Energieträgerbezug angesetzt. Die Vorteilhaftigkeit ergibt sich hierbei über die reine Effizienzsteigerung und Energieeinsparung durch die Wärmepumpen sowie die verstärkte Wärmedämmung über den Betrachtungszeitraum. Auch wenn für die Versorgung mit Erdgas eine Substitution durch grünen Wasserstoff im Szenario $z = 3$ angenommen wird, so stellt sich im Vergleich zu der bereits gesetzlich verankerten und geplanten Dekarbonisierung des Strombezugs keine

ökologische Vorteilhaftigkeit der Variante $v = 1$ im Vergleich zu den Varianten mit Wärmepumpen ($v = 2$ bis 4) ein. Nur wenn das Bewertungsergebnis der Mindestsanierung mit Gaskessel ($v = 1$) im „Best-Case“ Szenario $z = 3$ mit dem „Worst-Case“ Szenario $z = 1$ für die Wärmepumpen verglichen wird, weißt die Mindestsanierung ein geringeres Treibhauspotenzial als die anderen Sanierungsvarianten auf.

Vergleicht man die Ergebnisse der Varianten $v = 2$ bis 4 miteinander, so lässt sich erkennen, dass es durch die Batteriespeicher in den Einzelgebäuden zu keiner zusätzlichen Minderung des Treibhauspotenzials kommt. Durch die Vernetzung der Stromversorgung auf Quartiersebene und den Einsatz eines gemeinsamen Batteriespeichers kann das Treibhauspotenzial jedoch weiter gesenkt werden (siehe Kapitel 6.4.4.3).

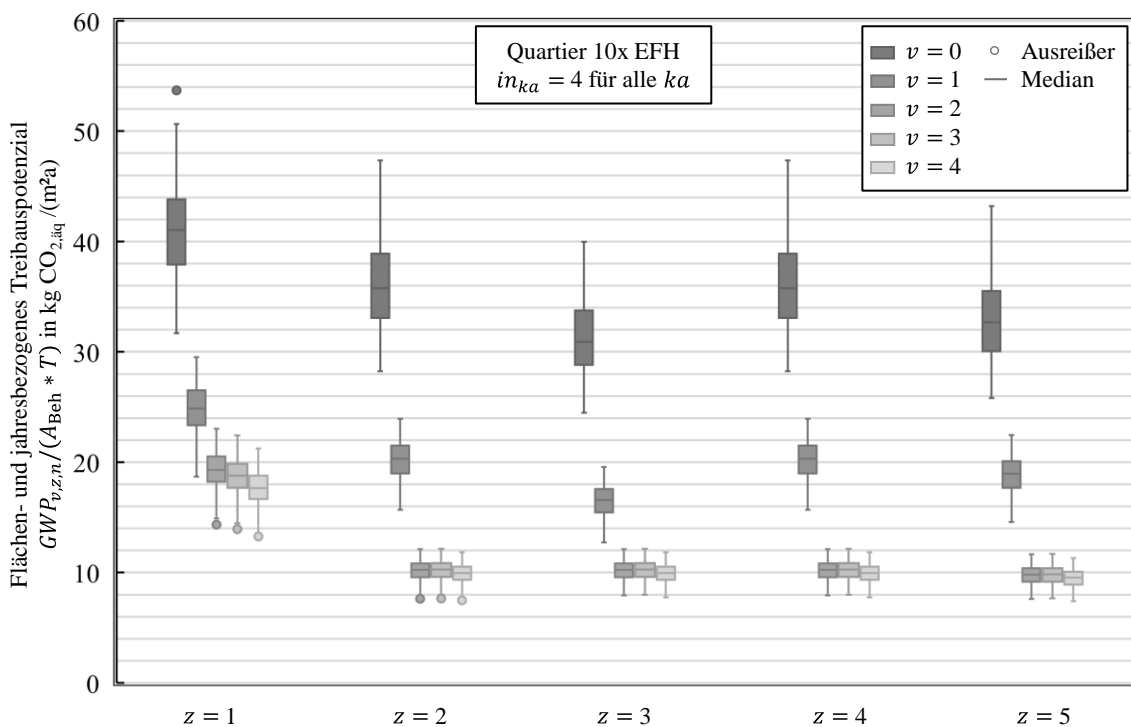


Abbildung 6-9: Bewertungsergebnis flächen- und jahresbezogenes Treibhauspotenzial der Varianten für die verschiedenen Szenarien

Um den Einfluss der Zufallsvariable X_{GWP} zu untersuchen, wird diese für alle Stichproben konstant gehalten ($y_{GWP,n} = 0,5$ für all n). Das gleiche Vorgehen wird für die Zufallsvariablen $X_{TLD,w}$ durchgeführt. In Abbildung 6-10 sind die resultierenden Treibhauspotenziale der Stichproben den vorherigen, auf der Variation aller Variablen basierenden Bewertungsergebnissen gegenübergestellt. Zur Vereinfachung ist nur das Szenario $z = 2$ sowie die Varianten $v = 0$ bis 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Streubreiten insbesondere in den Varianten zwar leicht abnehmen, wenn X_{GWP} nicht berücksichtigt wird, ein Großteil der Streuungen in den Ergebnissen jedoch aus den stochastischen Energiebedarfsmodellen resultieren.

Auch für die Betrachtung der Zufallsvariablen für die Abbildung der Streuungen in den technischen Lebensdauern $X_{TLD,w}$ ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Variationen der technischen Lebensdauern sind insbesondere für Ausreißerpunkte verantwortlich, die entstehen, wenn diese Werte annehmen, bei denen sich Zeitpunkte von Austauschprozessen über die Systemgrenzen verschieben.

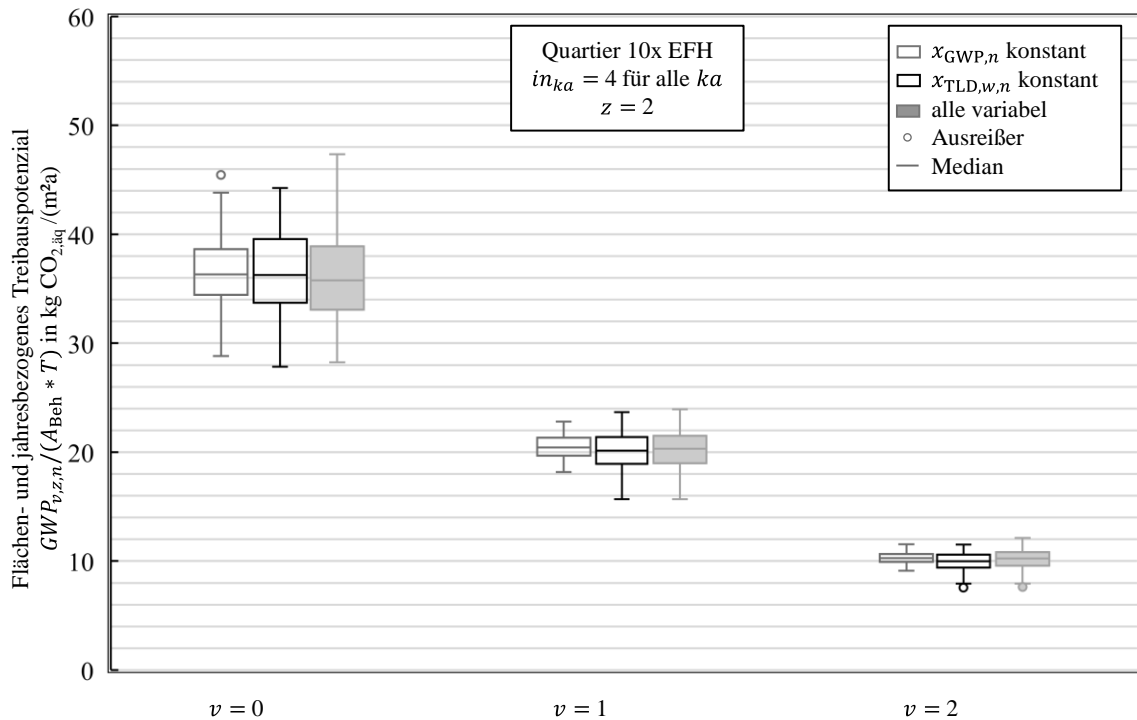


Abbildung 6-10: Untersuchung des Einflusses von X_{GWP} und $X_{TLD,w}$ auf das flächen- und jahresbezogene Treibhauspotenzial des Quartiers

6.4.4.3 Erneuerbarer Deckungsgrad

Um die Auswirkungen der Verwendung der Batteriespeicher weitergehend zu untersuchen, sind in Abbildung 6-11 die erneuerbaren Deckungsgrade für die Varianten dargestellt. Hierbei zeigt sich klar, dass durch die Nutzung der Gebäudebatteriespeicher der erneuerbare Deckungsgrad erhöht werden kann, da eine größere Menge des erzeugten PV-Stroms vor Ort direkt verwendet werden kann ($\bar{x}(\eta_{cover,2}) = 21\%$ auf $\bar{x}(\eta_{cover,3}) = 26\%$). Durch die Bildung des Quartiersstromnetzes mit einem zentralen, größeren Batteriespeicher lässt sich der Deckungsgrad nochmals deutlich steigern $\bar{x}(\eta_{cover,4}) = 34\%$.

Die Deckungsgrade sind jedoch immer noch weit von einer komplett autarken Energieversorgung $\eta_{cover} = 100\%$ entfernt. Eine reine Vergrößerung der PV-Modulflächen ist dabei allerdings nicht ausreichend, um zu einer Erreichung eines 100-prozentigen Deckungsgrades zu führen. Im vorliegenden Anwendungsfall liegt das Stichprobenmittel der jährlichen mittels PV-Modulen erzeugten Strommenge bei 34.240 kWh/a. Der Gesamtstrombedarf liegt bei 75.910 kWh/a. Der im Vergleich zum Quotienten dieser Energiemengen deutlich geringere Deckungsgrad erklärt sich, da nicht der ganze Strom im Quartier genutzt werden kann. Der in Kapitel 5.4.2 als erweiterter Indikator eingeführte Selbstnutzungsgrad des erzeugten PV-Stroms liegt für Variante 2 lediglich bei 44 % im Mittel. Durch die Hinzunahme der Batteriespeicher lässt sich der Eigennutzungsgrad im Stichprobenmittel nur auf 72 % steigern. Es wird demnach deutlich, dass das Quartier bei einer Umstellung der Wärmeversorgung auf den Energieträger Strom in Interaktion mit dem übergeordneten Netz steht und andere Arten des Abgleichs zwischen Verbrauch und Erzeugung, bspw. durch Lastverschiebungen im Verbrauch oder den Einsatz anderer Speichertechnologien, erreicht werden müssen.

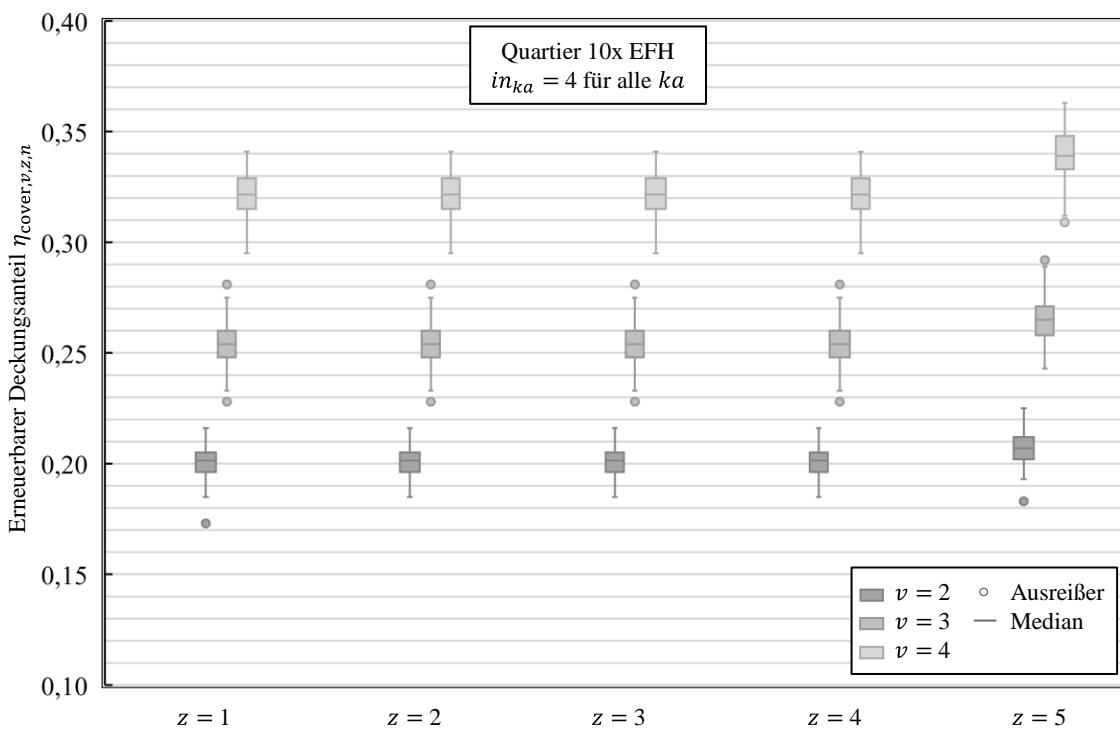


Abbildung 6-11: Bewertungsergebnis erneuerbarer Deckungsgrad der Varianten für die verschiedenen Szenarien

6.4.4.4 Barwert der Lebenszykluskosten

Die dritte für die Sanierungsentscheidung maßgebliche Bewertungsdimension ist die ökonomische Betrachtung. Diese erfolgt in der entwickelten Bewertungsmethodik über den Barwert der Lebenszykluskosten, der für die verschiedenen Varianten über die fünf Szenarien in Abbildung 6-12 auf die beheizte Fläche A_{Beh} bezogen dargestellt ist. Für $z = 1$ zeigt die Sanierungsvariante $v = 2$ eine ökonomische Vorteilhaftigkeit (geringerer Barwert der Lebenszykluskosten) gegenüber den anderen Varianten und weist zudem die geringste Streubreite auf. Alle Sanierungsvarianten sind zudem im Vergleich mit der Basisvariante klar ökonomisch vorteilhaft. Dies ist insbesondere durch den in diesem Szenario sehr hoch angesetzten Gaspreis zu erklären.

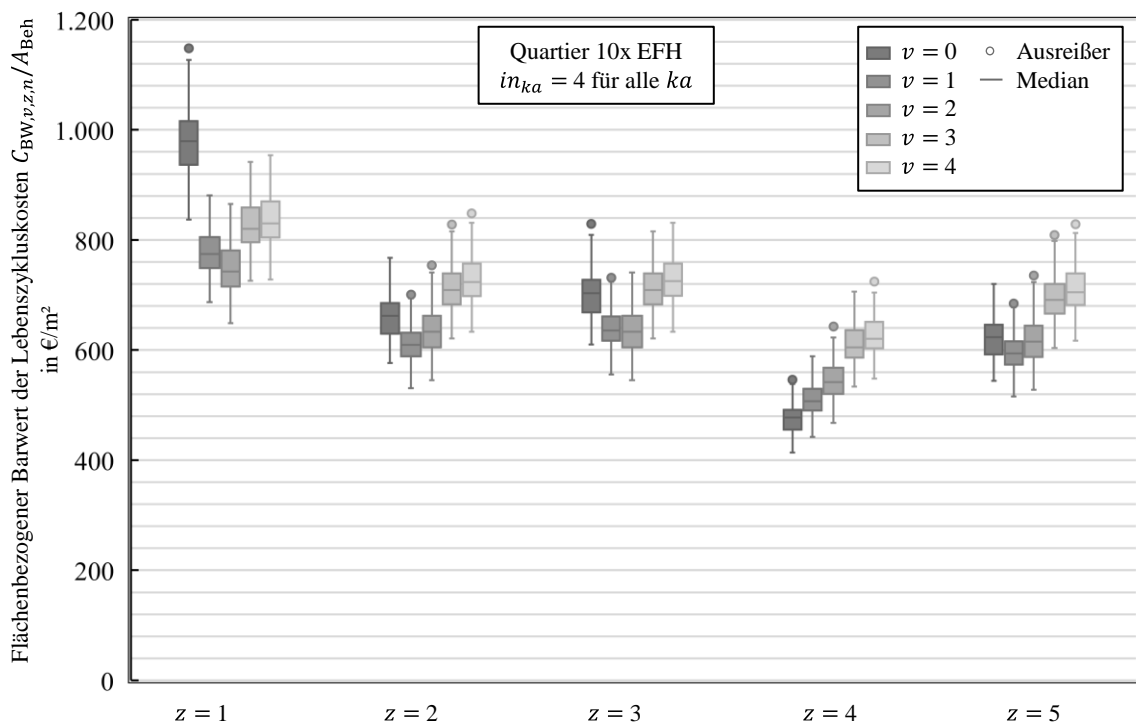


Abbildung 6-12: Bewertungsergebnis flächenbezogener Barwert der Lebenszykluskosten der Varianten für die verschiedenen Szenarien

Für das Szenario $z = 2$ stellt sich die ökonomische Vorteilhaftigkeit anders dar. Der dort angenommene Rückgang der extremen Preisniveaus der Energieträger Strom und Gas zu Beginn des Betrachtungszeitraums führt dazu, dass der Barwert der Lebenszykluskosten für alle Varianten im Vergleich zu Szenario $z = 1$ sinkt. Insbesondere die Mindestsanierung $v = 1$ weist nun im Median einen etwas geringeren Barwert der Lebenszykluskosten als die Sanierungsvariante $v = 2$ auf.

Im Szenario 3 steigen die Kosten für den Energieträger Gas aufgrund der angesetzten Substitution durch Wasserstoff. Bei Betrachtung der Boxplots zeigt sich, dass hierdurch die Variante mit der Wärmepumpe ($v = 2$) wieder einen geringeren Median im Vergleich zur

Mindestsanierung ($v = 1$) aufweist. Allerdings überschneiden sich die Streubereiche deutlich. Durch einen Vergleich der einzelnen Stichprobenergebnisse $C_{BW,1,3,n}$ und $C_{BW,2,3,n}$ lässt sich gemäß Gl. 6-1 eine Wahrscheinlichkeit von 81 % berechnen, mit der die Variante $v = 2$ ökonomisch vorteilhafter im Vergleich zu Variante $v = 1$ ist. Dies bedeutet, dass in 81 % der Stichproben der Barwert der Lebenszykluskosten für die Variante mit der Wärmepumpe und PV-Anlage in diesem Szenario geringer ist als für die Mindestsanierung.

$$Prob(C_{BW,1,3} < C_{BW,2,3}) = \frac{\sum_n C_{\min,n}}{N} \quad \text{Gl. 6-1}$$

mit $C_{\min,n} \begin{cases} 1 & \text{für } C_{BW,1,3,n} < C_{BW,2,3,n} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

In den Ergebnissen für $z = 4$ zeigt sich die Auswirkung des Kalkulationszins. Durch dessen Erhöhung von 3 % auf 6 % findet eine stärkere Gewichtung der Investitionskosten statt. Hierdurch wird die Basisvariante $v = 0$ als wirtschaftlich vorteilhaft gegenüber den Sanierungsvarianten bewertet. Für das Szenario $z = 5$, in welchem die Veränderung des Klimas berücksichtigt wird, sinken die Barwerte aller Varianten leicht, da der gesunkene Heizwärmebedarf eine Reduktion der Betriebskosten für alle Varianten bedingt. Der Vergleich zwischen den Varianten ändert sich jedoch im Vergleich zu $z = 2$ nicht.

Über alle Szenarien zeigt sich zudem, dass die Varianten mit den Batteriespeichern $v = 3$ und $v = 4$ höhere Kosten im Vergleich zur Variante $v = 2$ bedingen. Die hohen Investitionskosten amortisieren sich nicht durch die Einsparungen, die sich durch einen erhöhten Eigennutzungsgrad des PV-Stroms ergeben.

Analog zum Vorgehen bei der Betrachtung der ökologischen Bewertungsdimension wird auch für die ökonomische Bewertung der Einfluss der Zufallsvariablen für die Unsicherheiten der Anschaffungs- und Nutzungskosten sowie der technischen Lebensdauern auf die Bewertungsergebnisse untersucht. In Abbildung 6-13 sind hierzu die Barwerte der Lebenszykluskosten, die sich bei Vernachlässigung der jeweiligen Variablen für das Szenario $z = 2$ ergeben, den vorherigen Bewertungsergebnissen gegenübergestellt.

Für die technischen Lebensdauern zeigt sich die bereits für das Treibhauspotenzial beobachtete Auswirkung auf die Ausreißer. Eine Nichtberücksichtigung der Variablen der Unsicherheiten der Anschaffungs- und Betriebskosten führt zu leicht sinkenden Streubreiten für $v = 1$ und $v = 2$. Für Variante $v = 2$, welche die höchsten Anschaffungskosten besitzt, ist die Veränderung am deutlichsten.

Durch die Anwendung der Bewertungsmethodik konnte beispielhaft die ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit der Durchführung von Sanierungsvarianten unter Berücksichtigung von Unsicherheiten gezeigt werden. Während für die ökologische Bewertungsdimension die Variante $v = 4$ über alle Szenarien als die geringsten Emissionen verursachend eingestuft werden kann, ist die Betrachtung in der ökonomischen

Bewertungsdimension nicht ganz so eindeutig. Hier können die Ergebnisse jedoch Anhaltspunkte liefern, um das Risiko über Wahrscheinlichkeiten ausdrücken, sich für eine Variante zu entscheiden, die im Vergleich mit einer anderen Variante eine geringere Wirtschaftlichkeit aufweist. In der Anwendung muss dann von den jeweiligen Entscheidenden eine eigene Präferenz bezüglich einer Hierarchisierung der Bewertungsindikatoren vorgesetzt werden.

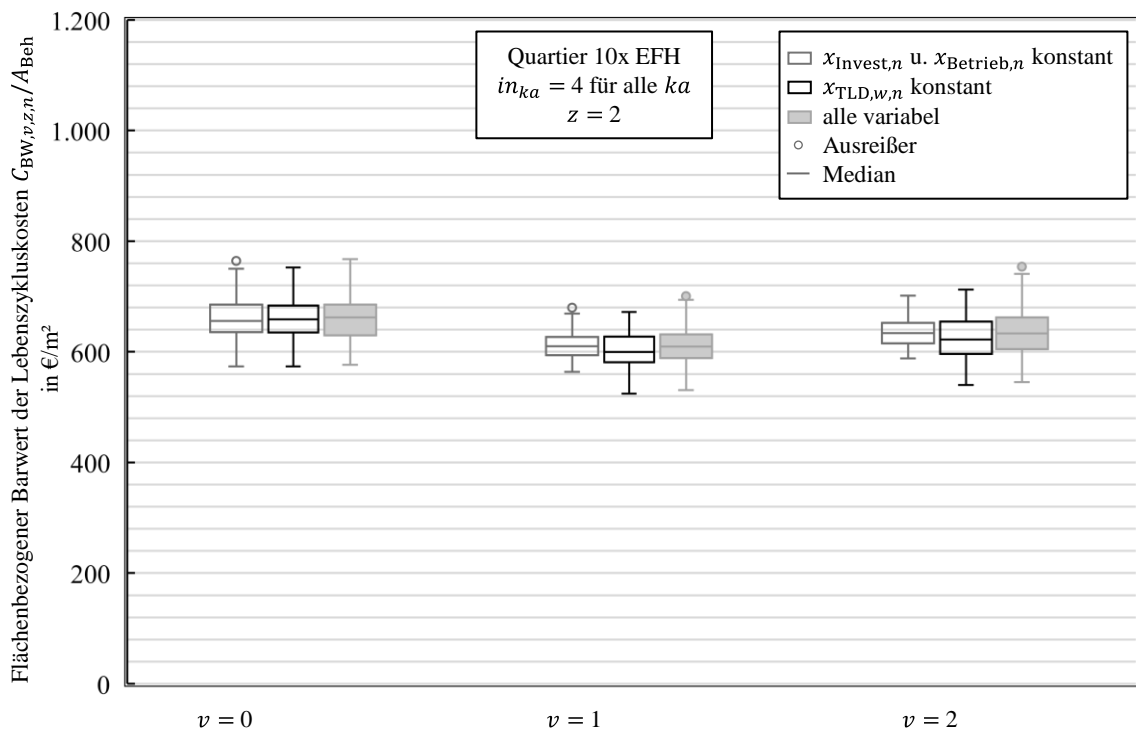


Abbildung 6-13: Untersuchung des Einflusses von X_{Invest} , $X_{Betrieb}$ und $X_{TLD,w}$ auf den flächenbezogenen Barwert der Lebenszykluskosten des Quartiers

6.4.4.5 Anpassung des Informationsniveaus

Die Quartiersbewertung mit der entwickelten Methodik wurde analog zu den Untersuchungen der Energiebedarfsmodelle auch für den Fall eines höheren Informationsniveaus des Ausgangszustands durchgeführt. Die Ergebnisse des Treibhauspotenzials sind in Abbildung 6-14 dargestellt, die Ergebnisse des Barwerts der Lebenszykluskosten in Abbildung 6-15. Durch den erhöhten Informationsstand und die verringerten Streubreiten der Endenergiebedarfe verringern sich auch die Streubreiten in den ökologischen und ökonomischen Bewertungsindikatoren. Die Aussagen zu den Bewertungsindikatoren können demnach mit einer höheren Genauigkeit getroffen werden. Die Reihenfolge der Präferenz der Varianten ändert sich jedoch für die jeweiligen Indikatoren nicht im Vergleich zu den voranstehend vorgestellten Ergebnissen.

6 Beispielhafte Anwendung der entwickelten Methodik

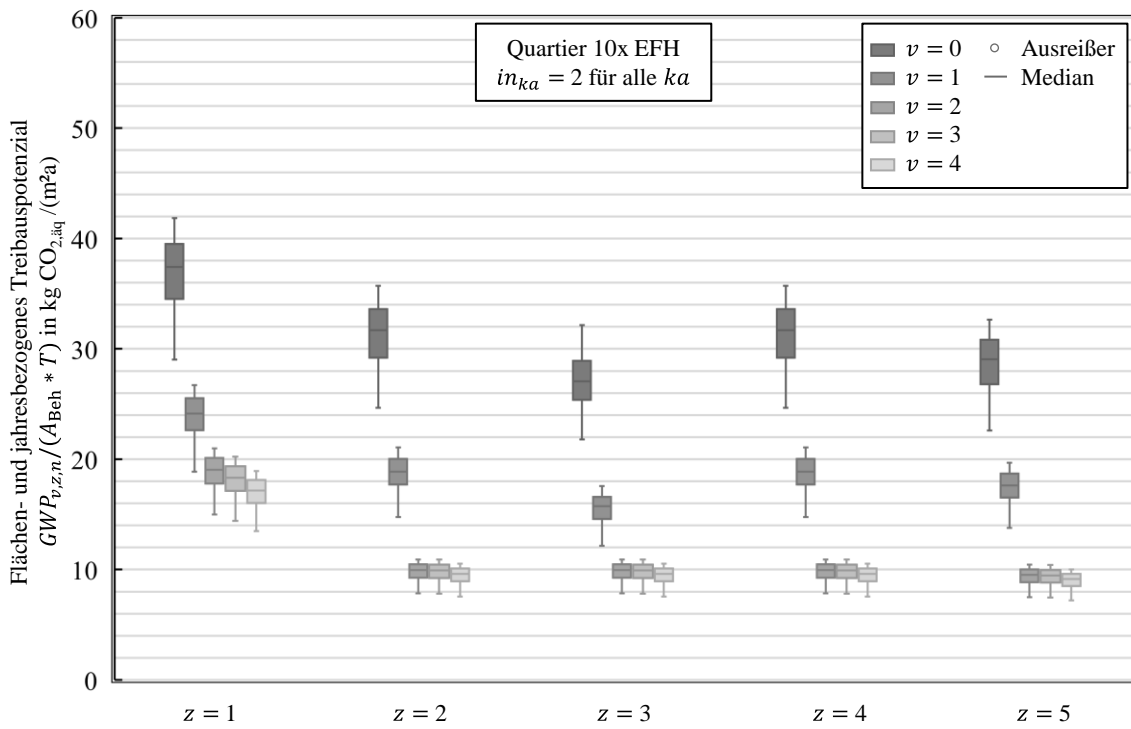


Abbildung 6-14: Bewertungsergebnis flächen- und jahresbezogenes Treibhauspotenzial der Varianten für die verschiedenen Szenarien bei erhöhtem Informationsniveau des Ausgangszustands

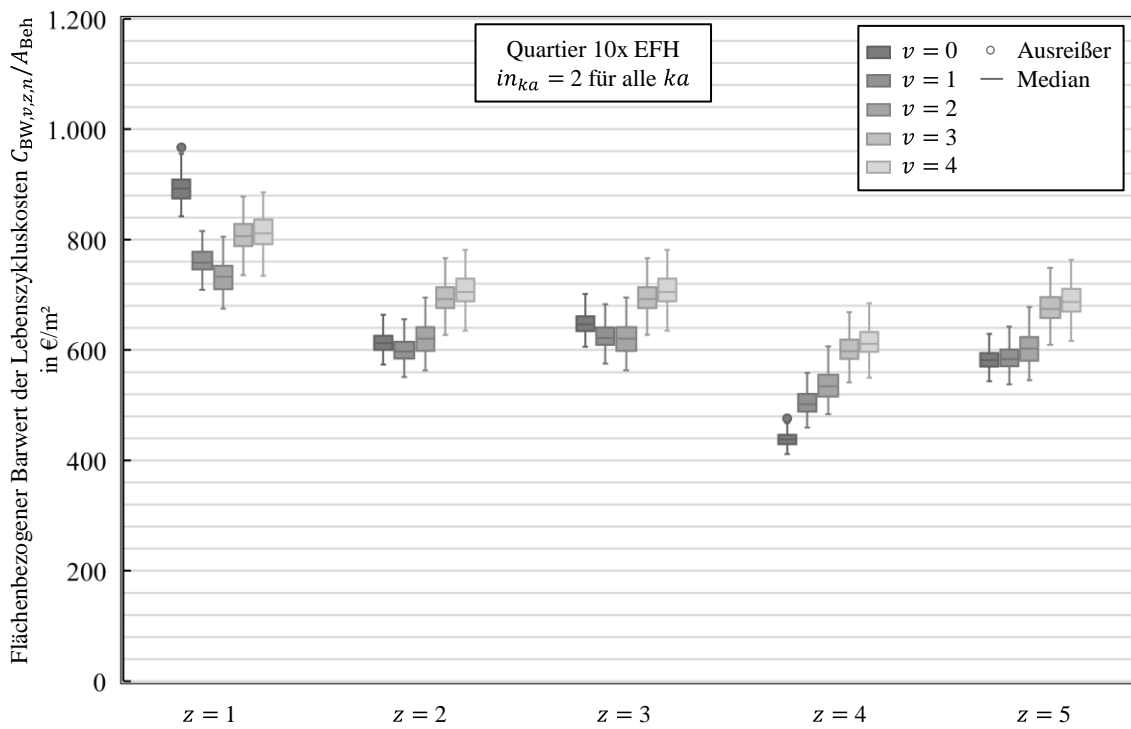


Abbildung 6-15: Bewertungsergebnis flächenbezogener Barwert der Lebenszykluskosten der Varianten für die verschiedenen Szenarien bei erhöhtem Informationsniveau des Ausgangszustand

7 ABLEITUNG VON HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Anfertigung dieser Arbeit erfolgte vor dem in Kapitel 1.1 dargestellten Hintergrund des immer weiter voranschreitenden Klimawandels und den Herausforderungen, die bei der Minderung der Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors und der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung derzeit noch bestehen. Diese manifestieren sich in der wiederholten Verfehlung der politischen Emissionsminderungsziele. Die Bewertungsmethode zur Berücksichtigung streuender Einflussgrößen über den Lebenszyklus bei der ökonomischen und ökologischen Bewertung von Wohnquartieren wurde daher mit der Absicht entwickelt, ein Hilfsmittel zu schaffen, welches die Durchführung von Sanierungskonzepten im Bestand anstoßen kann. Die folgenden Handlungsempfehlungen wurden mit Blick auf diese Zielsetzung entwickelt.

Insbesondere aus den Ergebnissen der beispielhaften Anwendung, jedoch auch aus gewonnenen Erkenntnissen während des Entwicklungsprozesses, lassen sich drei Handlungsempfehlungen ableiten. Diese Handlungsempfehlungen richten sich vorrangig an gesellschaftliche und politische Agierende im Handlungsfeld der energetischen Quartierssanierung. Sie sollen dazu dienen, die wissenschaftlichen Erkenntnisse dieser Arbeit praxisgerecht und komprimiert für die entsprechenden Zielgruppen aufzubereiten und damit einen Wissenstransfer zu unterstützen.

Handlungsempfehlung 1

Unsicherheiten sollten bei der Bewertung von Quartierssanierungskonzepten berücksichtigt und kommuniziert werden.

Die erste Handlungsempfehlung ergibt sich bereits per se aus der identifizierten Forschungslücke. Unsicherheiten, die sich vornehmlich aus Parameterstreuungen ergeben, sowie Szenariungewissheiten sollten bei der Bewertung von Quartierssanierungskonzepten berücksichtigt werden. Deterministische Bewertungen können die Komplexität der Entscheidung für eine Sanierungsvariante insbesondere im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen über den Lebenszyklus nicht adäquat abbilden. Die entwickelte Methodik bietet hier einen ganzheitlichen Ansatz, um die angesprochenen Unsicherheiten zu berücksichtigen und lässt sich in die Bewertungspraxis bspw. im Rahmen einer Energieberatung integrieren.

Mit den Ergebnissen der Bewertungsmethodik wird eine anschauliche Kommunikation von ökonomischen und ökologischen Potenzialen und Risiken der Sanierungsentscheidung ermöglicht. Angaben zu Unsicherheiten der Bewertungsergebnisse sollten dabei entweder graphisch in Form der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Boxplots oder zusätzlich

anhand statistischer Kennwerte wie dem Stichprobenmittel und der empirischen Standardabweichung erfolgen. Die graphische Darstellung ermöglicht es insbesondere fachfremden Anwendenden, einen leichteren Zugang zu den stochastischen Ergebnissen zu finden.

Eine weitere gute Möglichkeit für den Vergleich der Varianten liefert die in Kapitel 6.4.4.4 exemplarisch durchgeführte Berechnung von Wahrscheinlichkeiten für die Vorteilhaftigkeit einer Variante durch den Vergleich der Ergebnisse für jede Stichprobe. Wenn auch den Szenarien Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden, kann somit eine alleinige Kennzahl bspw. für das Risiko einer Kostensteigerung durch die Sanierung gegeben werden. Dies wird im Rahmen der Untersuchung jedoch wegen dem stark ungewissen Charakter der über die Szenarien abgebildeten Parameter nicht durchgeführt und nicht empfohlen.

Vor der Sanierungsentscheidung lassen sich die Unsicherheiten durch eine Datenaufnahme des Untersuchungsgegenstands reduzieren. In der Anwendung hat sich gezeigt, dass durch eine Erhöhung des Informationsniveaus, bspw. durch eine Vor-Ort Begehung im Rahmen einer Energieberatung die Streubreiten des Endenergiebedarfs teilweise deutlich reduziert werden können, was auch zu einer Reduktion in den Streuungen der ökonomischen und ökologischen Bewertungsindikatoren führt. Eine solche Datenaufnahme sollte daher nach Möglichkeit immer als Ausgangspunkt für die anschließende Variantenbewertung unter Unsicherheit dienen, um die Parameterstreuungen zu reduzieren. In der durchgeführten Sensitivitätsanalyse konnten für die Einfamilienhäuser insbesondere die energetische Qualität der Außenwände, ausgedrückt über deren Transmissionswärmeverlust, sowie die Verteilverluste der Anlagentechnik als relevante Parameter identifiziert werden.

Handlungsempfehlung 2

Die Systemgrenzen der Bewertung einer Sanierungsentscheidung sollten über die ordnungsrechtlichen Vorgaben hinaus definiert werden.

Insbesondere in der Entwicklung der Methodik hat sich die Notwendigkeit der Erweiterung der Systemgrenzen über die ordnungsrechtlichen Vorgaben hinaus, welche für die Nachweisführungen im Gebäudeenergiegesetz gefordert werden, gezeigt.

Zunächst betrifft dies die zu berücksichtigenden Energieströme. Die Nichteinbeziehung des Haushaltsstroms ist zwar für eine Vergleichbarkeit der Energieeffizienz der Gebäude sinnvoll. Gerade für den Einbezug von Photovoltaik-Anlagen und die Kopplung der Wärme- und Stromversorgung ist jedoch die Betrachtung der gesamten Energieströme relevant, um fundierte Aussagen über tatsächliche Eigenverbräuche und Deckungsgrade

treffen zu können. Hierfür sollte zudem die zeitliche Auflösung hoch genug gewählt werden, damit Bilanzen wirklichkeitsgetreu gebildet werden können. Die Bilanzierung mit einer Auflösung von 15-Minuten Schritten erscheint sinnvoll.

Zudem sollte die Bewertung zwingend nicht nur ein Jahr der Nutzungsphase, sondern eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus der Gebäude umfassen. Was für die ökonomische Bewertung bei der Investitionsentscheidung durch eine Betrachtung der Amortisationsdauern bereits den Standard in der Praxis darstellt, muss auch bei der Bewertung der energetischen und insbesondere der ökologischen Dimensionen berücksichtigt werden. Der Energieaufwand und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen der Herstellung und Entsorgung können einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung haben und sollten daher nicht vernachlässigt werden.

Wird die Nutzungsphase durch die Betrachtung eines exemplarischen Jahres approximiert, so sollte hierbei zudem ein mittleres Jahr des Betrachtungszeitraums verwendet werden. Dieses sollte bereits die alterungsbedingten Verschlechterungen bspw. in der Dämmwirkung der Wärmedämmstoffe oder den Wirkungsgraden der Anlagentechnik berücksichtigen. Auch eine Modellierung der zu erwartenden klimatischen Veränderungen kann sinnvoll sein.

Weiterhin sollten die räumlichen Systemgrenzen auf das Quartier erweitert werden. Für die gemeinsame Nutzung von lokal erzeugter Energie ist dies bereits im Ordnungsrecht vorgesehen, aber auch die Anforderungen an den Wärmeschutz und die Energieeffizienz sollten hier gemeinsam betrachtet werden können. Die Anwendung der Bewertungsmethodik hat gezeigt, dass sich die Streubreiten der Energiebedarfe aufgrund der Fehlerfortpflanzung reduzieren, wenn ein Quartier als Zusammenschluss von Einzelgebäuden betrachtet wird. Wenn eine gemeinsame Betrachtung des Quartiers vorgenommen wird, kann dies als Teil der Kommunikation verwendet werden, um so die Akzeptanz für Quartierssanierungskonzepte zu erhöhen. Auch bei heterogenen Eigentumsverhältnissen kann daher ein Zusammenschluss zu einer gemeinsamen Sanierung, nicht nur aufgrund von erwartbaren Synergieeffekten, sondern auch zur Senkung von Unsicherheiten und einer damit einhergehenden Risikoreduktion vorteilhaft sein.

Handlungsempfehlung 3

Für die zukünftigen Entwicklungspfade des Energiesystems sollten klare Leitplanken vorgegeben werden.

Der Vollzug der Energiewende auf der Makroebene im Energiesystem ist auch für die Einzelsanierungsentscheidung maßgeblich. In der entwickelten Bewertungsmethodik wurden die Veränderungen im übergeordneten Energiesystem über die Ausgestaltung von Szenarien berücksichtigt. Werden hier klare Leitplanken vorgegeben, so kann dies dazu dienen, die Szenarien zu definieren und klar einzuschränken.

Mit dem Klimaschutzgesetz existieren bereits klare Vorgaben für die Emissionsminderungen in den verschiedenen Sektoren. Es zeigt sich allerdings, dass diese bisher teilweise nicht eingehalten werden konnten. Insbesondere wenn die Wärmeversorgung des Gebäudesektors elektrifiziert werden soll, gelingt eine Klimaneutralität hier nur, sofern auch die Emissionen des bezogenen Stroms in einem ausreichenden Maße reduziert werden. In der Vergangenheit konnten die Minderungsziele im Energiesektor zwar erreicht werden, in den letzten Jahren ist der weitere Ausbau der erneuerbaren Energieträger jedoch zunehmend ins Stocken geraten und mit der geringeren Verfügbarkeit der Gaslieferungen hat der mit einer hohen Emissionsintensität behaftete Energieträger Kohle zeitweise wieder verstärkten Einsatz bei der Stromerzeugung erfahren. Der Ausbau der erneuerbaren Energieträger muss daher zwingend in den kommenden Jahren forciert werden, damit eine Umstellung der Gebäudewärmeversorgung auf Wärmepumpen den gewünschten Effekt erzielt.

Die exemplarische Anwendung hat unter den getätigten Annahmen gezeigt, dass eine Verwendung von Wasserstoff zur schrittweisen Substitution der Gasversorgung bereits frühzeitig beginnen muss, um eine alternative Möglichkeit der wirksamen Reduktion der Treibhausgasemissionen darzustellen. Unter Berücksichtigung der Investitionszyklen scheint dies schwer realisierbar. Hier sind demnach politisch entweder sehr schnelle Weichenstellungen vorzunehmen, um die entsprechende Infrastruktur vorzubereiten oder klare Randbedingungen vorzugeben, welche zu einer Incentivierung der Anstrengungen im Marktumfeld führen. Ansonsten kann der flächendeckende Einsatz von grünem Wasserstoff als Substitut für Erdgas zu keiner aus ökologischer Sicht sinnvollen Dekarbonisierung der Wärmeversorgung im Gebäudesektor beitragen.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zu Beginn der Arbeit wurde in *Kapitel 2* der politische Rahmen der Energiewende im Gebäudesektor dargestellt. Zudem wurden Grundlagen zu Energiebedarfen in Quartieren und den Energieversorgungskonzepten zur Deckung der Bedarfe erläutert. Anschließend wurden Modelle zur Berechnung der Energiebedarfe klassifiziert und die Grundlagen der dynamischen Gebäudesimulation sowie bestehende Modelle aus der Gruppe der Bottom-up Ingenieurmodelle vorgestellt. Es zeigte sich, dass diese Art der Modellierung die Energieströme in Quartieren aufgrund einer hohen zeitlichen Auflösung gut abbildet.

In *Kapitel 3* wurden mathematische Grundlagen zum Unsicherheitsbegriff und der Abbildung stochastischer Prozesse über Zufallsvariablen erläutert. Zudem wurde ein Überblick über Methoden zur Charakterisierung und Quantifizierung von Unsicherheiten gegeben. Die Monte-Carlo Analyse sowie Szenarioanalysen ließen sich hierbei als etablierte und für eine Anwendung im vorliegenden Forschungskontext geeignete Methoden identifizieren. Anschließend wurden verschiedene Arten der Unsicherheiten bei Energiebedarfsmodellen, namentlich Parameterstreuungen, Modellunsicherheiten und Szenarioungewissheiten, detailliert erläutert. Zudem wurden in der Literatur vorhandene Modellierungsansätze für die Berücksichtigung der Unsicherheiten bei Energiebedarfsmodellen von Quartieren vorgestellt.

Kapitel 4 gab zunächst einen Überblick über die Entscheidungstheorie, um den Kontext der Quartiersbewertung als Entscheidungsproblem zu setzen. Anschließend wurden Methoden der Lebenszyklusbetrachtung sowie der ökologischen und ökonomischen Bewertungsdimensionen vorgestellt. Hierbei wurden insbesondere Ursachen von Unsicherheiten dargestellt. Zudem erfolgte ein Überblick über bestehende Bewertungsansätze für Quartierssanierungskonzepte, aus dem sich ein Forschungsbedarf hinsichtlich der ganzheitlichen Abbildung der ökonomischen, ökologischen und energetischen Bewertungsdimension über den Lebenszyklus unter Berücksichtigung der Unsicherheiten ergab.

Daher schloss in *Kapitel 5* die Methodenentwicklung an. Als Bewertungsanlass wurde der Variantenvergleich im Vorfeld einer anstehenden energetischen Quartierssanierung festgelegt. Als Bewertungsziel wurde die möglichst ganzheitliche Bewertung der energetischen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der verschiedenen Varianten über einen mehrjährigen Betrachtungszeitraum zur Entscheidungsunterstützung definiert. Die Systemgrenzen bilden dabei das Quartier als Zusammenschluss mehrerer Wohngebäude sowie die Anlagentechnik des Versorgungskonzepts in den verschiedenen Zuständen vor und nach den betrachteten Sanierungen.

Zur Abbildung der Unsicherheiten in der Bewertung wurde eine Monte-Carlo Analyse verwendet. Zudem wurde die Abbildung zukünftiger ungewisser Entwicklungen der Energiepreise und Emissionsfaktoren sowie einiger weiterer Modellparameter über

Szenarien definiert. Innerhalb der Methodik erfolgt die Berechnung der Bewertungsindikatoren Treibhauspotenzial (GWP), Barwert der Lebenszykluskosten sowie des erneuerbaren Deckungsgrads für jede Stichprobe der Monte-Carlo Analyse und jedes Szenario. Dabei werden neben den Sanierungsvarianten auch eine Basisvariante für den Ausgangszustand betrachtet. Grundlage der Bewertung sind die Energiebedarfe des Quartiers, zu deren Ermittlung ein für leitungsgebundene Quartierswärmeversorgungskonzepte zweistufiges, dynamisches Simulationsmodell erarbeitet wurde. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierzu die Simulationsumgebung „IDA ICE“ verwendet.

Die unsicheren Parameter des Energiebedarfsmodells wurden über Zufallsvariablen abgebildet, für die Wahrscheinlichkeitsfunktionen aus der Literatur abgeleitet wurden. Hierfür wurden zunächst Informationsniveaus festgelegt, um den Grad der verfügbaren Informationen bei der Unsicherheitsquantifizierung zu berücksichtigen. Zur Durchführung der Monte-Carlo Analyse wurden zur Zufallszahlgenerierung Sobol-Sequenzen verwendet, die in Untersuchungen die schnellste Konvergenz zeigten. Der Stichprobenumfang konnte damit zu $N = 128$ determiniert werden.

Die ökonomische Bewertung erfolgt innerhalb der Methodik mit den Ergebnissen des Energiebedarfsmodells ebenfalls für jede Stichprobe der Monte-Carlo Analyse mit einer Lebenszykluskostenrechnung. Die Unsicherheiten für Nutzungsdauern, Anschaffungskosten und Betriebskosten wurden hier ebenfalls über Zufallsvariablen abgebildet. Die Entwicklung der Energieträgerkosten sowie der Kalkulationszins wurden hingegen über Szenarien definiert. Für die Berechnung des Treibhauspotenzials wurde eine vereinfachte Ökobilanz als Methode festgelegt. Hier wurde die Unsicherheit für die Umweltwirkungen als globale Zufallsvariable definiert. Die Entwicklungen der Emissionen aus der Nutzung der Energieträger wurden über die Szenarien abgebildet.

Auf die Methodenentwicklung folgend wurde in *Kapitel 6* ein Quartier aus zehn Einfamilienhäusern als beispielhafter Anwendungsfall konzipiert. Für den Anwendungsfall wurde zunächst eine Sensitivitätsanalyse für das entwickelte stochastische Simulationsmodell des Energiebedarfs durchgeführt. Hiermit konnte der Einfluss der verwendeten Modellvariablen auf den Endenergiebedarf bestimmt und damit die Berechnungsergebnisse plausibilisiert werden. Insbesondere die Streuung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwände und der Verteilverluste zeigten in allen betrachteten Informationsniveaus einen großen Einfluss auf die resultierenden Streuungen des Endenergiebedarfs.

Als weiterführende Untersuchung wurden vier verschiedene Sanierungskonzepte in insgesamt fünf Szenarien mit der Methodik bewertet. Die Szenarien bildeten dabei eine Reihe möglicher Entwicklungen der Modelleingangsvariablen über den Lebenszyklus ab. Es konnte gezeigt werden, dass die Bewertungsergebnisse auch auf diese Parameteränderungen robust und erwartbar reagieren. Über eine Darstellung der Ergebnisse mittels Boxplots konnte eine graphische Analyse der Unsicherheiten vorgenommen werden.

Zudem ließen sich die Ergebnisse der Varianten über ausgewählte statistische Kenngrößen auch quantitativ vergleichen.

Kapitel 7 bildete den Abschluss der Arbeit mit der Ableitung von Handlungsempfehlungen aus den erzielten Ergebnissen. Diese richten sich an gesellschaftliche und politische Agierende im Handlungsfeld der energetischen Quartierssanierung und sollen den Wissenstransfer unterstützen. Sie lassen sich als gebündeltes Plädoyer für die Unsicherheitsberücksichtigung und Lebenszyklusbetrachtung in der Bewertung von Sanierungsentscheidungen verstehen. Der hierfür notwendige Rahmen muss sowohl ordnungsrechtlich als auch wirtschaftlich geschaffen werden.

Fazit und Ausblick

Mit der entwickelten Bewertungsmethodik steht erstmals ein Werkzeug zur Verfügung, um Quartierssanierungsentscheidungen unter Unsicherheit adäquat zu unterstützen. Die Berücksichtigung des Lebenszyklus in der ökologischen und ökonomischen Bewertungsdimension ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung der Auswirkungen verschiedener Sanierungskonzepte. Die angegebenen Streubreiten der Bewertungsindikatoren können genutzt werden, um Aussagen über die Unsicherheiten in der Bewertung vorzunehmen und diese in die Entscheidung für eine Variante einfließen zu lassen. Zudem wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, wie sich die Unsicherheiten innerhalb eines Szenarios als Wahrscheinlichkeiten der Vorteilhaftigkeit einer Variante gegenüber anderen Varianten in einer der Bewertungsdimensionen ausdrücken lassen. Dies kann für eine Risikoabschätzung genutzt werden.

Durch die beispielhafte Anwendung der Methodik konnte deren Anwendbarkeit gezeigt und die Ergebnisse auch durch die verwendeten Sensitivitätsanalysen plausibilisiert werden. Die Bewertungsergebnisse erscheinen robust und entsprechen dem für die jeweiligen Parameterkombinationen Erwartbarem. Allerdings erfolgte die Anwendung lediglich an einem theoretischen Quartier aus Einfamilienhäusern. In einem nächsten Schritt sollten daher weitere Untersuchungsgegenstände definiert werden, um auch die Anwendbarkeit für Versorgungsvarianten mit einem Wärmenetz sowie mit anderen Gebäudetypen zu bestätigen. Bei der softwareseitigen Implementierung der Methodik wurde bereits darauf geachtet, eine Vielzahl möglicher Gebäudetypen und Versorgungskonzepte abbilden zu können, sodass mögliche nächste Schritte hier bereits vorbereitet sind.

Weiterführend wäre zudem insbesondere die Anwendung an realen Untersuchungsgegenständen erstrebenswert. Dadurch ließen sich die Ergebnisse der Methodik validieren und falls notwendig Kalibrierungen der Modellvariablen vornehmen. Hierfür ist jedoch

eine ausreichende Datenbasis vor und nach einer Sanierung notwendig, die durch ein Monitoring-Konzept sichergestellt werden muss. Ein laufendes Forschungsvorhaben der wissenschaftlichen Begleitforschung des 7. Energieforschungsprogramm des BMWK „Energiewendebauen“ befasst sich mit dem Aufbau einer einheitlichen Monitoring-Datenbank für die im Forschungsprogramm durchgeführten Umsetzungsprojekte. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit steht die Datenbank jedoch noch nicht zur Verfügung.

Die verwendete hohe Detaillierung in der Energiebedarfsmodellierung bedingt lange Simulationszeiten für die Anwendung der Methodik. Es sollte daher untersucht werden, ob auch Energiebedarfsmodelle mit einer geringeren Detaillierung bspw. in Form von reduzierten 1-Zonen-Modellen für die Methodik verwendet werden können. Hierzu sind insbesondere Anpassungen in der Modellierung der Unsicherheiten der Geometrie-parameter notwendig. Zudem ist die Berücksichtigung der Modellunsicherheit neu zu bewerten, welche in der vorliegenden Methodik aufgrund der hohen Detaillierung der Modellierung vernachlässigt wurde.

Des Weiteren ist zu untersuchen, ob eine Reduzierung der Modelldetaillierung mit einer starken Steigerung der Streubreiten der Endenergiebedarfe einhergeht, die dann den Variantenvergleich erschweren könnte. Durch die Sensitivitätsanalysen konnte jedoch gezeigt werden, dass viele der modellierten Zufallsvariablen für die Unsicherheiten der Geometrieparameter im detaillierten Modell nur sehr geringe Auswirkungen haben. Ein Potenzial für die Verwendung von reduzierten thermischen Modellen scheint demnach vorhanden zu sein.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Systemgrenzen der Methodik zu erweitern. Auch hierfür wurden in der Entwicklung und der softwareseitigen Implementierung bereits die Grundlagen gelegt. Insbesondere die Erweiterung um Nichtwohngebäude oder Gebäude mit gemischter Nutzung kann einen Mehrwert liefern, um heterogene Stadtquartiere bewerten zu können. Hierfür ist eine Quantifizierung der Unsicherheiten in den Eingangsparametern der Energiemodelle für die Nichtwohngebäude notwendig. Insbesondere für die Parameter der Nutzung liegen bereits mehrere Studien in der internationalen Literatur vor, die als Anknüpfungspunkte dienen können.

Zudem stellt der Einbezug des Verkehrssektors eine mögliche Erweiterung dar, um die Potenziale der Sektorkopplung durch die zunehmende Elektrifizierung zu berücksichtigen. Auch die zeitlich hochaufgelöste Berücksichtigung der Emissionen des Stroms über dynamische Emissionsfaktoren kann den Informationsgehalt der Bewertung erhöhen. Allerdings ist es denkbar, dass durch eine gestiegene Komplexität der Methodik durch eine Erweiterung der Systemgrenzen die Unsicherheiten in einem Maße steigen, dass eine Unterscheidbarkeit der Varianten nicht mehr ausreichend gegeben ist.

Zuletzt ist auch eine Erweiterung der Methodik auf Neubau- oder Nachverdichtungsprojekte denkbar. Hierzu ist lediglich eine Anpassung der Definition der Basisvariante notwendig, mit der die Bewertungsvarianten verglichen werden. Diese kann beispielsweise das Referenzgebäude des GEG darstellen.

LITERATURVERZEICHNIS

Ackermann, T. (2020): Energiebedarf versus Energieverbrauch unter Einbeziehung von Langzeitmessungen zum Temperaturverlauf. *Bauphysik* 42 (1), S. 1–10. DOI: 10.1002/bapi.201900030.

Agora Energiewende [Hrsg.] (2021): Ein Gebäudekonsens für Klimaneutralität. 10 Eckpunkte wie wir bezahlbaren Wohnraum und Klimaneutralität 2045 zusammen erreichen, Agora Energiewende, Berlin.

Agora Energiewende [Hrsg.] (2023): Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023, Agora Energiewende, Berlin.

Ali, U.; Shamsi, M. H.; Hoare, C.; Mangina, E.; O'Donnell, J. (2019): A data-driven approach for multi-scale building archetypes development. *Energy and Buildings* 202, S. 109364. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109364.

Ali, U.; Shamsi, M. H.; Hoare, C.; Mangina, E.; O'Donnell, J. (2021): Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis. *Energy and Buildings* 246, S. 111073. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111073.

Anand, C. K.; Amor, B. (2017): Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, S. 408–416. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.058.

Arendt, P. D.; Apley, D. W.; Chen, W. (2012): Quantification of Model Uncertainty: Calibration, Model Discrepancy, and Identifiability. *Journal of Mechanical Design* 134 (10), S. 100908. DOI: 10.1115/1.4007390.

Aschmann, V.; Effenberger, M. (2012): Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades Biogas betriebener BHKW über die Betriebsdauer. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft [Hrsg.], Freising-Weihenstephan.

BBR/DWD [Hrsg.] (2017): Handbuch - Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst, Offenbach.

BBSR [Hrsg.] (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, online verfügbar: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf (21.03.2023).

- BCG [Hrsg.] (2021):** Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Studie im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI), The Boston Consulting Group, München.
- BDEW [Hrsg.] (2023a):** BDEW-Gaspreisanalyse April 2023 - Haushalte, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin.
- BDEW [Hrsg.] (2023b):** BDEW-Strompreisanalyse April 2023 - Haushalte, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin.
- Bednar, T.; Hagentoft, C.-E. (2015):** Risk management by probabilistic assessment. Development of guidelines for practice. IEA EBC Annex 55 Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting- Probability Assessment of Performance and Cost (RAP-RETRO). Chalmers University of Technology [Hrsg.], Göteborg.
- BEE [Hrsg.] (2021):** Neues Strommarktdesign, Bundesverband Erneuerbare Energie e.V., Kassel, Freiburg, Berlin.
- Begleitforschung Energiewendebauen [Hrsg.] (2020):** Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“, Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN, Jülich.
- Bewersdorff, D. (2021):** HYGGIency - Raumhygiene und Behaglichkeit durch energetische Sanierung im Quartier. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- BKI [Hrsg.] (2022a):** BKI Baupreise kompakt 2023 - Altbau, Statistische Baupreise für Positionen mit Kurztexen. Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Stuttgart.
- BKI [Hrsg.] (2022b):** BKI Baupreise kompakt 2023 - Neubau, Statistische Baupreise für Positionen mit Kurztexen. Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Stuttgart.
- BMUB [Hrsg.] (2017):** Energetische Stadtsanierung in der Praxis II - Erste Ergebnisse der Begleitforschung und gute Beispiele, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin.
- BMWi [Hrsg.] (2020a):** Bekanntmachung der Richtlinie „Energieberatung für Nichtwohngebäude, Anlagen und Systeme“ (EBN) vom 13. November 2020, in: BAnz AT 11.12.2020 B2, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- BMWi [Hrsg.] (2020b):** Richtlinie über die Förderung der Energieberatung für Wohngebäude (Vor-Ort-Beratung, individueller Sanierungsfahrplan) vom 28. Januar 2020, in: BAnz AT 04.02.2020 B1, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- BMWK [Hrsg.] (2022a):** Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM) vom 9. Dezember 2022, in: BAnz AT 30.12.2022 B1, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin.

- BMWK [Hrsg.] (2022b):** Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude (BEG NWG) vom 9. Dezember 2022, in: BAnz AT 30.12.2022 B3, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin.
- BMWK [Hrsg.] (2022c):** Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude (BEG WG) vom 9. Dezember 2022, in: BAnz AT 30.12.2022 B2, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin.
- BMWK [Hrsg.] (2022d):** Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) vom 1. August 2022, in: BAnz AT 18.08.2022 B1, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin.
- BMWK/BMWSB [Hrsg.] (2022):** Sofortprogramm gemäß § 8 Abs. 1 KSG für den Sektor Gebäude, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin.
- BMWK/BMWSB [Hrsg.] (2023):** Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes und mehrerer Verordnungen zur Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien. Bearbeitungsstand vom 15.02.2023, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz und Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin.
- BMWSB [Hrsg.] (2021):** ÖKOBAUDAT Datenbank 2021-II, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin, online verfügbar: <https://www.oekobaudat.de/> (10.04.2023).
- BMWSB [Hrsg.] (2022a):** Energetische Stadtsanierung in der Praxis IV - Aktivierung von Privateigentümern, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin.
- BMWSB [Hrsg.] (2022b):** Energetische Stadtsanierung in der Praxis V - Leitfaden zum Einsatz des Förderbausteins „Sanierungsmanagement“, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin.
- BMWSB [Hrsg.] (2023):** Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude - Klimafreundlicher Neubau (KFN) vom 25.01.2023, in: BAnz AT 13.02.2023 B5, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin.
- Bohne, D. (2022):** Gebäudetechnik und Technischer Ausbau von Gebäuden. 12. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Brown, P. N.; Hindmarsh, A. C.; Petzold, L. R. (1998):** Consistent Initial Condition Calculation for Differential-Algebraic Systems. *SIAM Journal on Scientific Computing* 19 (5), S. 1495–1512. DOI: 10.1137/S1064827595289996.

- BSW [Hrsg.] (2023):** Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Speicher/Mobilität), Bundesverband Solarwirtschaft e.V., Berlin, online verfügbar: https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2022/08/bsw_faktenblatt_stromspeicher.pdf (13.03.2023).
- Bundesnetzagentur [Hrsg.] (2023):** Gasimporte. Aus Webdossier aktuelle Lage Gasversorgung, Bundesnetzagentur, Bonn, online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Gasversorgung/aktuelle_gasversorgung/_svg/Gasimporte/Gasimporte.html (19.03.2023).
- Bundesregierung [Hrsg.] (2022):** Finanzplan des Bundes 2022 bis 2026, Deutscher Bundestag, Berlin, Drucksache 20/3101.
- Burhenne, S. (2013):** Monte Carlo Based Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Performance Simulation. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie.
- BVerfG [Hrsg.] (2021):** Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021- 1 BvR 2656/18 -, Rn. 1-270, Bundesverfassungsgericht, Karlsruhe.
- BWP [Hrsg.] (2023):** Wärmepumpenabsatz 2022: starkes Wachstum von 53 Prozent gegenüber dem Vorjahr, Pressemitteilung des Bundesverbands Wärmepumpe e.V., Berlin.
- C.A.R.M.E.N. [Hrsg.] (2023):** Marktübersicht Batteriespeicher. Informationsangebot, Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V., Straubing, online verfügbar: https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/12/Marktuebersicht-Batteriespeicher_2023_01.pdf (26.03.2023).
- Carnell, R. (2022):** lhs: Latin Hypercube Samples. R package version 1.1.5, online verfügbar: <https://CRAN.R-project.org/package=lhs> (29.03.2023).
- Carnieletto, L.; Ferrando, M.; Teso, L.; Sun, K.; Zhang, W.; Causone, F.; Romagnoni, P.; Zarrella, A.; Hong, T. (2021):** Italian prototype building models for urban scale building performance simulation. *Building and Environment* 192, S. 107590. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107590.
- Chen, Y.; Hong, T. (2018):** Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models. *Applied Energy* 215, S. 717–735. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.073.
- Conci, M. (2019):** E³ – A parametric model to evaluate trade-offs between the Energetic, Economic, and Ecological lifecycle performance of building projects. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- de Wit, S. (2003):** Uncertainty in building simulation, in: Malkawi, A. M./Augenbroe, G. (Hrsg.) (2003): *Advanced Building Simulation*. Spon Press, New York, S. 25-59.
- dena [Hrsg.] (2021a):** dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, Deutsche Energie-Agentur, Berlin.

- dena [Hrsg.] (2021b):** dena-Studie, Das Quartier – Teil 1, Überblick über die gesetzlichen Rahmenbedingungen und Förderrichtlinien für die Energieversorgung von Gebäuden im räumlichen Zusammenhang, Deutsche Energie-Agentur, Berlin.
- dena [Hrsg.] (2022a):** DENA-GEBÄUDEREPORT 2023. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand., Deutsche Energie-Agentur, Berlin.
- dena [Hrsg.] (2022b):** dena-STUDIE: Das Quartier – Teil 2, Analyse des Zusammenspiels und Aufzeigen von Schwachstellen, Deutsche Energie-Agentur, Berlin.
- DGNB [Hrsg.] (2018):** DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau Version 2018, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Stuttgart.
- Diefenbach, N.; Loga, T.; Born, R.; Großklos, M.; Herbert, C. (2002):** Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand. Institut Wohnen und Umwelt [Hrsg.], Darmstadt.
- Dutang, C.; Savicky, P. (2022):** randtoolbox: Generating and Testing Random Numbers. R package version 2.0.2., online verfügbar: <https://CRAN.R-project.org/package=randtoolbox> (29.03.2023).
- EEA; Ember [Hrsg.] (2023):** Preisentwicklung von CO₂-Emissionsrechten im europäischen Emissionshandel (EU-ETS) von 2005 bis 2022, Europäische Umweltagentur, Sandbag Climate Campaign CIC, Kopenhagen, London, online verfügbar unter:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1304069/umfrage/preisentwicklung-von-co2-emissionsrechten-in-eu/> (17.03.2023).
- El Kontar, R.; Polly, B.; Charan, T.; Fleming, K.; Moore, N.; Long, N.; Goldwasser, D. (2020):** URBANopt: An Open-Source Software Development Kit for Community and Urban District Energy Modeling. In: Building Performance Modeling Conference and SimBuild co-organized by ASHRAE and IBPSA-USA, Virtuell, 29.09.-01.10.2020.
- Eleftheriadis, G.; Hamdy, M. (2017):** Impact of building envelope and mechanical component degradation on the whole building performance: a review paper. *Energy Procedia* 132, S. 321–326. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.739.
- Engelhardt, R.; Koenen, J. F.; Brenneis, M.; Kloberdanz, H.; Bohn, A. (2011):** An Approach to Classify Methods to Control Uncertainty in Load-Carrying Structures. *Applied Mechanics and Materials* 104, S. 33–44. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.104.33.
- EQUA [Hrsg.] (2015):** Learn some IDA scripting - IDA Indoor Climate and Energy Power User Days 2015, EQUA Simulation AB, Stockholm.
- Erhorn-Kluttig, H.; Jank, R.; Schrempf, L.; Dütz, A.; Rumpel, F.; Schrade, J.; Erhorn, H.; Beier, C.; Sager, C.; Schmidt, D. (2011):** Energetische Quartiersplanung. Methoden - Technologien - Praxisbeispiele. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart.

- ERK [Hrsg.] (2022):** Prüfbericht zu den Sofortprogrammen 2022 für den Gebäude- und Verkehrssektor – Prüfung der den Maßnahmen zugrundeliegenden Annahmen gemäß § 12 Abs. 2 Bundes-Klimaschutzgesetz, Expertenrat für Klimafragen, Berlin.
- Ermschel, U.; Möbius, C.; Wengert, H. (2016):** Investition und Finanzierung. 4. Aufl. Gabler, Berlin.
- Europäische Kommission [Hrsg.] (2021):** Europäischer Grüner Deal: Kommission schlägt vor, die Renovierung und Dekarbonisierung von Gebäuden zu fördern. Pressemitteilung vom 15. Dezember 2021, Europäische Kommission, Brüssel.
- Faure, X.; Johansson, T.; Pasichnyi, O. (2021):** Impacts of the level of details, shadowing and thermal zoning on urban building energy modelling (UBEM) on a district scale. In: 20th European Round Table on Sustainable Consumption and Production, Graz, 08.-10.09.2021.
- Feist, W. (1994):** Thermische Gebäudesimulation. Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze. 1. Aufl. Müller, Jur. Verl., Heidelberg.
- Ferrando, M.; Causone, F.; Hong, T.; Chen, Y. (2020):** Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society* 62, S. 102408. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102408.
- Ferrari, S.; Zagarella, F.; Caputo, P.; D'Amico, A. (2019):** Results of a literature review on methods for estimating buildings energy demand at district level. *Energy* 175, S. 1130–1137. DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.172.
- Figl, H.; Kusche, O. (2020):** ÖKOBAUDAT-Handbuch. Technisch/formale Informationen und Regeln zur ÖKOBAUDAT-Datenbank Version 1.1. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [Hrsg.], Berlin, Wien, Freiburg.
- Fischer, D.; Wolf, T.; Scherer, J.; Wille-Hausmann, B. (2016):** A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households. *Energy and Buildings* 124, S. 120–128. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.069.
- Forbes, C.; Evans, M.; Hastings, N.; Peacock, B. (2011):** Statistical distributions. 4. Aufl. Wiley, Hoboken, New Jersey.
- Frick, D. (2011):** Theorie des Städtebaus. Zur baulich-räumlichen Organisation von Stadt. 3. veränd. Aufl. Wasmuth, Tübingen, Berlin.
- Frondel, M.; Kükenthal, V. C.; Larysch, T.; Osberghaus, D. (2021):** Wahrnehmung des Klimawandels in Deutschland: Eine Längsschnittbefragung privater Haushalte. *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 45 (2), S. 119–131. DOI: 10.1007/s12398-021-00303-2.

- Gholami, M.; Torreggiani, D.; Tassinari, P.; Barbaresi, A. (2021):** Narrowing uncertainties in forecasting urban building energy demand through an optimal archotyping method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148, S. 111312. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111312.
- Göllinger, T. (2022):** Technoökonomie der Energiewende. Ökonomische Grundlagen von Schlüsseltechnologien der Energietransformation. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden.
- Götze, U. (2014):** Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Aufl. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
- Goulouti, K.; Favre, D.; Giorgi, M.; Padey, P.; Galimshina, A.; Habert, G.; Lasvaux, S. (2021):** Dataset of service life data for 100 building elements and technical systems including their descriptive statistics and fitting to lognormal distribution. *Data in brief* 36, S. 107062. DOI: 10.1016/j.dib.2021.107062.
- Goulouti, K.; Padey, P.; Galimshina, A.; Habert, G.; Lasvaux, S. (2020):** Uncertainty of building elements' service lives in building LCA & LCC: What matters? *Building and Environment* 183, S. 106904. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106904.
- Groen, E. A.; Heijungs, R.; Bokkers, E.; Boer, I. de (2014):** Methods for uncertainty propagation in life cycle assessment. *Environmental Modelling & Software* 62, S. 316–325. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.10.006.
- Großklos, M. (2017):** Erzeugungs- und Verbrauchsprofile für die Planung von Mieterstrom, in: Behr, I./Großklos, M. (Hrsg.) (2017): Praxishandbuch Mieterstrom. Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 113–123.
- Grunewald, J.; Nicolai, A.; Hirth, S.; Weiß, D.; van Treeck, C.; Frisch, Jérôme, Nouri, Amin et al. (2022):** Schlussbericht ENOB: SimQuality - Entwicklung von Qualitätsstandards für die energetische Gebäude- und Quartierssimulation als Planungswerkzeug, Institut für Bauklimatik, Technische Universität Dresden.
- Grünig, R.; Kühn, R. (2017):** Prozess zur Lösung komplexer Entscheidungsprobleme: Ein heuristischer Ansatz. 5. Aufl. Springer Gabler, Berlin.
- Guerra Santin, O. (2013):** Occupant behaviour in energy efficient dwellings: evidence of a rebound effect. *Journal of Housing and the Built Environment* 28 (2), S. 311–327. DOI: 10.1007/s10901-012-9297-2.
- Haunss, S.; Sommer, M.; Fritz, L. (2020):** Fridays for Future - Konturen einer neuen Protestbewegung, in: Haunss, S./Sommer, M. (Hrsg.) (2020): Fridays for Future - Die Jugend gegen den Klimawandel: Konturen der weltweiten Protestbewegung. transcript Verlag, Bielefeld, S. 7–14.

- Hegger, M.; Dettman, J.; Martin, A. (2012):** UrbanReNet. Schlussbericht, EnEff:Stadt – Verbundprojekt Netzoptimierung – Teilprojekt: Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum, Fachgebiet Entwerfen und Energieeffizientes Bauen, Technische Universität Darmstadt.
- Helton, J. C. (1997):** Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 57 (1-4), S. 3–76. DOI: 10.1080/00949659708811803.
- Helton, J. C.; Johnson, J. D.; Sallaberry, C. J.; Storlie, C. B. (2006):** Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 91 (10-11), S. 1175–1209. DOI: 10.1016/j.res.2005.11.017.
- Hesse, T.; Bleher, D.; Braungardt, S.; Sutter, J.; Winger, C. (2021):** Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien in effizienten Gebäuden und Quartieren. Umweltbundesamt [Hrsg.], Dessau-Roßlau.
- Hindmarsh, A. C.; Brown, P. N.; Grant, K. E.; Lee, S. L.; Serban, R.; Shumaker, D. E.; Woodward, C. S. (2005):** SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers. *ACM Transactions on Mathematical Software* 31 (3), S. 363–396. DOI: 10.1145/1089014.1089020.
- Hoffman, F. O.; Hammonds, J. S. (1994):** Propagation of uncertainty in risk assessments: the need to distinguish between uncertainty due to lack of knowledge and uncertainty due to variability. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis* 14 (5), S. 707–712. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1994.tb00281.x.
- Holický, M. (2013):** Introduction to Probability and Statistics for Engineers. Springer, Berlin/Heidelberg.
- Hong, T.; Chang, W.-K.; Lin, H.-W. (2013):** A fresh look at weather impact on peak electricity demand and energy use of buildings using 30-year actual weather data. *Applied Energy* 111, S. 333–350. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.05.019.
- Icha, P.; Lauf, T. (2022):** Entwicklung der spezifischen Treibhausgas- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2021. Umweltbundesamt [Hrsg.], Dessau-Roßlau.
- IPCC [Hrsg.] (2021):** Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge/New York.
- IPCC [Hrsg.] (2023):** Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6) - Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf.
- Islam, H.; Jollands, M.; Setunge, S. (2015):** Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, S. 129–140. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.006.

- Janssen, H. (2013):** Monte-Carlo based uncertainty analysis: Sampling efficiency and sampling convergence. *Reliability Engineering & System Safety* 109, S. 123–132. DOI: 10.1016/j.ress.2012.08.003.
- Jentsch, M. F.; James, P. A.; Bourikas, L.; Bahaj, A. S. (2013):** Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renewable Energy* 55, S. 514–524. DOI: 10.1016/j.renene.2012.12.049.
- Jordan, U.; Vajen, K. (2001):** Influence Of The DHW Load Profile On The Fractional Energy Savings. *Solar Energy* 69, S. 197–208. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00154-7.
- Juhrich, K. (2022):** CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe Aktualisierung 2022. Umweltbundesamt [Hrsg.], Dessau-Roßlau.
- Kacker, R. N.; Lawrence, J. F. (2007):** Trapezoidal and triangular distributions for Type B evaluation of standard uncertainty. *Metrologia* 44 (2), S. 117–127. DOI: 10.1088/0026-1394/44/2/003.
- KfW [Hrsg.] (2023a):** Merkblatt Energetische Stadtsanierung - Zuschuss Klimaschutz und Klimaanpassung im Quartier, Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt.
- KfW [Hrsg.] (2023b):** Merkblatt IKK - Energetische Stadtsanierung - Quartiersversorgung. Klimaschutz und Klimaanpassung im Quartier, Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt.
- Klauß, S. (2010):** Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. [Hrsg.], Kassel.
- Koch, T.; Achenbach, S.; Müller, A. (2021):** Anpassung der Kostenfunktionen energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten auf das Preisniveau 2020. Institut Wohnen und Umwelt [Hrsg.], Darmstadt.
- Kochendorfer, B.; Liebchen, J.; Viering, M. (2021):** Bau-Projekt-Management: Grundlagen und Vorgehensweisen. Grundlagen und vorgehensweisen. 6. Aufl. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Koert, J. (2019):** Entwicklung einer Methodik zur ökonomischen Bewertung von Bestandsquartieren unter einer akteursbezogenen Betrachtungsweise. Masterthesis, Technische Universität Darmstadt.
- Koert, J. (2023):** Darstellung der Bewertungsmethodik und Simulationsmodell, In: Projektendbericht Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgung vernetzter Quartiere (E4Q) (noch unveröffentlicht).
- Kühnapfel, J. B. (2021):** Scoring und Nutzwertanalysen. Ein Leitfaden für die Praxis. Springer Gabler, Wiesbaden.

- Laasch, T.; Laasch, E. (2013):** Haustechnik. Grundlagen - Planung - Ausführung. 13. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Lange, T.; Mosler, K. (2017):** Statistik kompakt. Basiswissen für Ökonomen und Ingenieure. 1. Aufl. Springer Gabler, Berlin/Heidelberg.
- Langevin, J.; Reyna, J. L.; Ebrahimigharehbaghi, S.; Sandberg, N.; Fennell, P.; Nägeli, C.; Laverge, J.; Delghust, M.; Mata, É.; van Hove, M.; Webster, J.; Federico, F.; Jakob, M.; Camarasa, C. (2020):** Developing a common approach for classifying building stock energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 133, S. 110276. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110276.
- Lloyd, S. M.; Ries, R. (2007):** Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches. *Journal of Industrial Ecology* 11 (1), S. 161–179. DOI: 10.1162/jiec.2007.1136.
- Loga, T.; Großklos, M.; Müller, A.; Swiderek, S.; Behem, G. (2021):** Realbilanzierung für den Verbrauch-Bedarf-Vergleich. Realistische Bilanzierung und Quantifizierung von Unsicherheiten als Grundlage für den Soll-Ist-Vergleich beim Energieverbrauchscontrolling. Institut Wohnen und Umwelt [Hrsg.], Darmstadt.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. (2015):** Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt [Hrsg.], Darmstadt.
- Loga, T.; Stein, B.; Hacke, U.; Müller, A.; Großklos, M.; Born, R.; Renz, I.; Cischinsky, H.; Hörner, M.; Weber, I. (2019):** Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung [Hrsg.], BBSR-Online-Publikation 04/2019, Bonn.
- Lomas, K. J.; Eppel, H. (1992):** Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. *Energy and Buildings* 19 (1992), S. 21–44. DOI: 10.1016/0378-7788(92)90033-D.
- Lund, H.; Østergaard, P. A.; Nielsen, T. B.; Werner, S.; Thorsen, J. E.; Gudmundsson, O.; Arabkoohsar, A.; Mathiesen, B. V. (2021):** Perspectives on fourth and fifth generation district heating. *Energy* 227, S. 120520. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120520.
- Lützkendorf, T. (2022):** Grundlagen für die Erstellung der Ökobilanz von Gebäuden, nBau. Nachhaltig Bauen. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- Macdonald, I. (2002):** Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation. Dissertation, Universität Strathclyde.
- Macdonald, I.; Strachan, P. (2001):** Practical application of uncertainty analysis. *Energy and Buildings* 33 (2001), S. 219–227.

- Malhotra, A.; Bischof, J.; Allan, J.; O'Donnell, J. (2020):** A Review on Country Specific Data Availability and Acquisition Techniques for City Quarter Information Modelling for Building Energy Analysis. In: BauSIM 2020 - 8th Conference of IBPSA Germany and Austria, Graz, 23.-25.09.2020.
- Malhotra, A.; Bischof, J.; Nichersu, A.; Häfele, K.-H.; Exenberger, J.; Sood, D.; Allan, J.; Frisch, J.; van Treeck, C.; O'Donnell, J.; Schweiger, G. (2022):** Information modelling for urban building energy simulation—A taxonomic review. *Building and Environment* 208, S. 108552. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108552.
- Marsh, E.; Allen, S.; Hattam, L. (2023):** Tackling uncertainty in life cycle assessments for the built environment: A review. *Building and Environment* 231, S. 109941. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109941.
- Martínez-Rocamora, A.; Solís-Guzmán, J.; Marrero, M. (2016):** LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58, S. 565–573. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.243.
- Mavromatidis, G.; Orehounig, K.; Carmeliet, J. (2018):** A review of uncertainty characterisation approaches for the optimal design of distributed energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 88, S. 258–277. DOI: 10.1016/j.rser.2018.02.021.
- McKay, M. D.; Beckman, R. J.; Conover, W. J. (1979):** A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics* 21 (2), S. 239. DOI: 10.2307/1268522.
- Moens, D.; Vandepitte, D. (2005):** A survey of non-probabilistic uncertainty treatment in finite element analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 194 12-16, S. 1527–1555. DOI: 10.1016/j.cma.2004.03.019.
- Müller, A. (2023):** Methodik zur datenbasierten Typisierung von Quartieren anhand baulicher Strukturen. Geometrisch-topologische Grundlagen für die energetische Bewertung des nationalen Quartiersbestandes auf Basis von Geoinformationsdaten. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Müller, A.; Heit, P. (2022):** Anpassung der mittleren Typgebäude für Altbauten mit Daten der Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Institut Wohnen und Umwelt [Hrsg.], Darmstadt.
- Müller, A.; Koert, J. (2022):** Ergebnisbroschüre E4Q. Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgung vernetzter Quartiere. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt/Institut Wohnen und Umwelt [Hrsg.], Darmstadt.

- Müller, A.; Koert, J.; Wörner, P. (2021):** Household specific self-consumption of photovoltaic-based power generation – a comprehensive parametric study to increase the reliability of energy consulting. In: Proceedings of Building Simulation 2021, Brügge, 01.-03.09.2021.
- Müller, N.; Pfnür, A. (2016):** Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei verschärften energetischen Standards für Wohnungsneubauten aus den Perspektiven von Eigentümern und Mietern. Methodisches Vorgehen und Fallbeispiel. Andreas Pfnür [Hrsg.], Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 32, Darmstadt.
- Mun, J.; Lee, J.; Kim, M. (2021):** Estimation of Infiltration Rate (ACH Natural) Using Blower Door Test and Simulation. *Energies* 14 (4), S. 912. DOI: 10.3390/en14040912.
- Münzenberg, U. (2004):** Der natürliche Luftwechsel in Gebäuden und seine Bedeutung bei der Beurteilung von Schimmelpilzschäden, In: Umwelt, Gebäude und Gesundheit. Innenraumhygiene, Raumluftqualität und Energieeinsparung. Ergebnisse des 7. Fachkongresses der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF), 04.-05.03.2004, München.
- Norouziasl, S.; Jafari, A.; Zhu, Y. (2021):** Modeling and simulation of energy-related human-building interaction: A systematic review. *Journal of Building Engineering* 44, S. 102928. DOI: 10.1016/j.jobee.2021.102928.
- Nouri, A.; Nicolai, A.; Krämer, B.; Hirth, S.; Agudelo, J.; Seifert, C.; Malhotra, A.; Madjidi, M.; Frisch, J.; van Treeck, C. (2020):** Entwicklung von Qualitätsstandards für die energetische Gebäude- und Anlagensimulation als Planungswerkzeug. In: BauSIM 2020 - 8th Conference of IBPSA Germany and Austria, Graz, 23.-25.09.2020.
- Offermann, M.; Manteuffel, B. von; Hermelink, A.; John, A.; Jahnke, K.; Zastrau, K. (2015):** Nutzenergiebedarf für Warmwasser in Wohngebäuden. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung [Hrsg.], BBSR-Online-Publikation Nr. 17/2017. Bonn.
- Pehnt, M.; Mellwig, P.; Lempik, J.; Werle, M.; Schulze Darup, B.; Schöffel, W.; Drusche, V. (2021):** Neukonzeption des Gebäudeenergiegesetzes (GEG 2.0) zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes. Energie Effizienz Institut, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Architekturbüro Schulze Darup [Hrsg.], Heidelberg et al.
- Pfnür, A.; Müller, N. (2013):** Energetische Gebäudesanierung in Deutschland, Studie Teil II: Prognose der Kosten alternativer Sanierungsfahrpläne und Analyse der finanziellen Belastungen für Eigentümer und Mieter bis 2050. Andreas Pfnür [Hrsg.], Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 28, Darmstadt.
- PHI [Hrsg.] (2023):** Gebäudekriterien: Passivhaus - EnerPHit - PHI-Energiesparhaus-Standard. Version 10c vom 03.04.2023, Passivhaus Institut, Darmstadt.

Posit Team (2022): RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software PBC [Hrsg.], Boston.

Prataviera, E.; Vivian, J.; Lombardo, G.; Zarrella, A. (2022): Evaluation of the impact of input uncertainty on urban building energy simulations using uncertainty and sensitivity analysis. *Applied Energy* 311, S. 118691. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118691.

Quaschnig, V. (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende – Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Forschungsgruppe Solarspeichersysteme HTW Berlin [Hrsg.], Berlin.

R Core Team (2022): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing [Hrsg.], Wien.

Reinhart, C. F.; Cerezo Davila, C. (2016): Urban building energy modeling – A review of a nascent field. *Building and Environment* 97, S. 196–202. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.12.001.

Remmen, P.; Lauster, M.; Mans, M.; Fuchs, M.; Osterhage, T.; Müller, D. (2018): TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. *Journal of Building Performance Simulation* 11 (1), S. 84–98. DOI: 10.1080/19401493.2017.1283539.

Ritter, D.; Bauknecht, D.; Krieger, S. (2021): Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Dachanlagen - Eine differenzierte Betrachtung von Volleinspeise- und Eigenverbrauchsanlagen. Studie durchgeführt vom Öko-Institut Freiburg, CLIMATE CHANGE 00/2021, Umweltbundesamt [Hrsg.], Dessau-Roßlau.

Ritter, F. (2011): Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen - Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

Robinson, D.; Haldi, F.; Kämpf, J.; Leroux, P.; Perez, D.; Raheed, A.; Wilke, U. (2009): CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. In: 11. International IBPSA Conference, Glasgow, 27.-30.07.2009.

Roth, C. (2011): Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten. Ein Beitrag zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden bei ungewissem Lebensweg. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

Roth, U. (1980): Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Forschungsprojekt BMBau RS II 4-704102-77.10(1980), Bonn.

- Schmitt, A. (2022):** EU Energy Outlook 2060: Wie entwickelt sich der europäische Strommarkt in den nächsten 37 Jahren? Energy Brainpool [Hrsg.], online verfügbar: <https://blog.energybrainpool.com/eu-energy-outlook-2060-wie-entwickelt-sich-der-europaeische-strommarkt-in-den-naechsten-37-jahren/> (13.03.2023).
- Simpson, T.; Lin, D.; Chen, W. (2001):** Sampling Strategies for Computer Experiments: Design and Analysis. *International Journal of Reliability and Applications* 2 (3), S. 209–240.
- Smith, A.; Luck, R.; Mago, P. J. (2010):** Analysis of a combined cooling, heating, and power system model under different operating strategies with input and model data uncertainty. *Energy and Buildings* 42 (11), S. 2231–2240. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.07.019.
- Smith, S. M.; Geden, O.; Nemet, G. F.; Gidden, M.; Lamb, W. F.; Powis, C. (2023):** The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition, Online verfügbar unter: <https://www.stateofcdr.org> (19.01.2023).
- Sobol, I. M.; Levitan, Y. L. (1999):** A pseudo-random number generator for personal computers. *Computers & Mathematics with Applications* 37 (4-5), S. 33–40. DOI: 10.1016/S0898-1221(99)00057-7.
- Strobl, T. (2017):** Raumklima und Luftwechsel: Lüftung von Wohngebäuden, In: Tagungsband zur 8. HolzBauSpezial Bauphysik, Bad Wörishofen, 22.-23.03.2017.
- Sun, Y.; Carmichael, D. G. (2018):** Uncertainties related to financial variables within infrastructure life cycle costing: a literature review. *Structure and Infrastructure Engineering* 14 (9), S. 1233–1243. DOI: 10.1080/15732479.2017.1418008.
- Sunderland, L.; Jahn, A. (2021):** Energetische Mindeststandards für den Gebäudebestand. Regulatory Assistance Project [Hrsg.], Brüssel.
- Sunikka-Blank, M.; Galvin, R. (2012):** Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. *Building Research & Information* 40 (3), S. 260–273. DOI: 10.1080/09613218.2012.690952.
- Swan, L. G.; Ugursal, V. I. (2009):** Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (8), S. 1819–1835. DOI: 10.1016/j.rser.2008.09.033.
- Swiler, L. P.; Paez, T. L.; Mayes, R. L. (2009):** Epistemic uncertainty quantification tutorial. In: Proceedings of the IMAC-XXVII, Orlando, 09.-12.2. 2009.
- Tian, W.; Heo, Y.; Wilde, P. de; Li, Z.; Yan, D.; Park, C. S.; Feng, X.; Augenbroe, G. (2018):** A review of uncertainty analysis in building energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, S. 285–301. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.029.

UBA [Hrsg.] (2016): Repräsentative Erhebung von Pro-Kopf- Verbräuchen natürlicher Ressourcen in Deutschland (nach Bevölkerungsgruppen), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

UBA [Hrsg.] (2019): UBA-Kurzposition zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre – Carbon Dioxide Removal (sogenannte „negative Emissionen“), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

UBA [Hrsg.] (2022a): Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 4,5 Prozent. Gemeinsame Pressemitteilung von Umweltbundesamt und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Nr. 15/2022, online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent> (23.02.2023).

UBA [Hrsg.] (2022b): Trends der Lufttemperatur, Umweltbundesamt, online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur#2021-bisher-21-warmstes-jahr-in-deutschland> (27.03.2023).

UBA [Hrsg.] (2023): Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2022 gemäß Bundesklimaschutzgesetz. Begleitender Bericht, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

UNFCCC [Hrsg.] (2016): The Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change.

vbw/Prognos [Hrsg.] (2022): Strompreisprognose, Studie durchgeführt von prognos AG im Auftrag des vbw - Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V., Basel/München.

VDEW [Hrsg.] (1999): Repräsentative VDEW-Lastprofile, VDEW-Materialien, 32/99, Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e. V., Frankfurt am Main.

Wachsmuth, J.; Oberle, S.; Zubair, A.; Köppel, W. (2019): Wie klimafreundlich ist LNG? Kurzstudie zur Bewertung der Vorkettenemissionen bei Nutzung von verflüssigtem Erdgas (LNG). CLIMATE CHANGE 21/2019. Umweltbundesamt [Hrsg.], Dessau-Roßlau.

Waddicor, D. A.; Fuentes, E.; Sisó, L.; Salom, J.; Favre, B.; Jiménez, C.; Azar, M. (2016): Climate change and building ageing impact on building energy performance and mitigation measures application: A case study in Turin, northern Italy. *Building and Environment* 102, S. 13–25. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.03.003.

Wagnitz, M. (2016): Ausrichtung der Heizungs-, Klima- und Lüftungstechnik an den Bedürfnissen der Nutzer im Wohnungsbau (Heizen 2020). Dissertation, Technische Universität Dresden.

- Weber, I.; Hacke, U.; Loga, T.; Müller, A.; Grafe, M.; Großklos, M. (2022):** Nutzerverhalten in energetisch modernisierten Gebäuden (MOBASY-Teilbericht). Ergebnisse einer schriftlichen Mieterbefragung. Institut Wohnen und Umwelt [Hrsg.], Darmstadt.
- Weißberger, M. (2016):** Lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik. Dissertation, Technische Universität München.
- Weißmann, C. (2017):** Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzten Wohnquartieren: Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Weithaas, T. (2003):** Bestimmung des natürlichen Luftwechsels im Altbaubestand anhand von Blower-Door Messungen. Korrelation zwischen den aus Blower-Door- und Tracergasmessungen erhaltenen „natürlichen“ Luftwechsel. Diplomarbeit, Technische Universität Freiberg.
- Welsch, M. (2011):** Erläuterungen zur BBSR-Tabelle "Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach BNB". Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [Hrsg.], online verfügbar: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/Erlaeuterungen_BNB-Tabelle_Nutzungsdauern_2011-07-07.pdf (21.03.2023).
- Wetter, M.; Bonvini, M.; Nouidui, T. S. (2016):** Equation-based languages – A new paradigm for building energy modeling, simulation and optimization. *Energy and Buildings* 117, S. 290–300. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.017.
- Wetter, M.; van Treec, C. (2017):** New Generation Computational Tools for Building & Community Energy Systems. Annex 60 Final Report. Internationale Energieagentur, Energy in Buildings and Communities Programme [Hrsg.], Birmingham.
- Wetter, M.; van Treec, C.; Helsen, L.; Maccarini, A.; Saelens, D.; Robinson, D.; Schweiger, G. (2019):** IBPSA Project 1: BIM/GIS and Modelica framework for building and community energy system design and operation – ongoing developments, lessons learned and challenges. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 323 (1), S. 12114. DOI: 10.1088/1755-1315/323/1/012114.
- Wilde, P. de; Tian, W.; Augenbroe, G. (2011):** Longitudinal prediction of the operational energy use of buildings. *Building and Environment* 46 (8), S. 1670–1680. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.02.006.

- Wirth, H. (2023):** Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 1.3.2023. Fraunhofer ISE [Hrsg.], online verfügbar: www.pv-fakten.de (21.03.2023).
- Wong, C. H. H.; Cai, M.; Ren, C.; Huang, Y.; Liao, C.; Yin, S. (2021):** Modelling building energy use at urban scale: A review on their account for the urban environment. *Building and Environment* 205, S. 108235. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108235.
- Wörner, P. (2020):** Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Stromverbrauch in Wohngebäuden - Entwicklung eines komplexen Simulationsmodells für energetische Analysen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Xiu, D. (2009):** Fast numerical methods for stochastic computations: a review. *Commun. Comput. Phys.*, 5 (2-4), S. 242–272.
- Zhao, J. (2012):** Development of a Novel Statistical Method and Procedure for Material Characterization and a Probabilistic Approach to Assessing the Hygrothermal Performance of Building Enclosure. Dissertation, Syracuse University.

Normenverzeichnis

DVGW-Arbeitsblatt W551:2004-04 Technische Maßnahmen zur Minderung des Legionellenwachstums in Neuanlagen. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V., Bonn.

DIN 4108 Beiblatt 2:2019-06 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Beiblatt 2: Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN 18202:2019-07 Toleranzen im Hochbau – Bauwerke. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN 18960:2020-11 Nutzungskosten im Hochbau. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN EN 13306:2018-02 Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN EN 15804:2022-03 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN EN 15978:2012-10 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN EN ISO 10211:2018-03 Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2017). DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN EN ISO 14040:2021-02 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020) . DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN EN ISO 14044:2021-02 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020) . DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN V 18599-1:2018-09 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

DIN V 18599-2:2018-09 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

VDI 2067 Blatt 1:2018-09 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.

Rechtsquellenverzeichnis

Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.

Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023) vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 20. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2512) geändert worden ist.

Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz – KWKG 2023) vom 21. Dezember 2015 (BGBl. I S. 2498), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 20. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2512) geändert worden ist.

Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen (Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz - TEHG) 21. Juli 2011 (BGBl. I S. 1475), das zuletzt durch Artikel 18 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist.

Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2153) geändert worden ist.

Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz – BEHG) vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2728), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 9. November 2022 (BGBl. I S. 2006) geändert worden ist.

Gesetz zur Aufteilung der Kohlendioxidkosten (Kohlendioxidkostenaufteilungsgesetz - CO2KostAufG) vom 5. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2154).

Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz – GEG) vom 8. August 2020 (BGBl. I S.1728), das zuletzt durch Artikel 18a des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist.

Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung (Kohleverstromungsbeendigungsgesetz - KVBG) vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1818), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 19. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2479) geändert worden ist.

Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 (Europäisches Klimagesetz).

Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 (ABl. L 153, S.13) über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EU-Gebäuderichtlinie, Neufassung).

Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz (EU-Energieeffizienzrichtlinie).

Richtlinie (EU) 2018/844 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 (ABl. L 156, S.75) zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz.

Richtlinie (EU) 2018/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 (ABl. L 328, S.210) zur Änderung der Richtlinie 2012/27/EU zur Energieeffizienz.

Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates.

Durchführungsbeschluss (EU) 2020/2126 der Kommission vom 16. Dezember 2020 zur Festlegung der jährlichen Emissionszuweisungen an die Mitgliedstaaten für den Zeitraum 2021 bis 2030 gemäß der Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates.

Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates (Governance-Verordnung).

Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 (EU-Lastenteilungsverordnung).

ANHANG

Anhang A – Wahrscheinlichkeitsfunktionen der definierten Zufallsvariablen 167

Anhang B – Gebäudemodell für die Energiebedarfsmodellierung 181

Anhang C – Grundannahmen für den Anwendungsfall..... 184

Anhang D – Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für das Energiebedarfsmodell..... 187

Anhang A – Wahrscheinlichkeitsfunktionen der definierten Zufallsvariablen

Für die Abbildung der Parameterstreuungen mittels Zufallsvariablen werden die begrenzte Normalverteilung $\mathcal{TN}(\mu, \sigma, a, b)$, die Log-Normalverteilung $\mathcal{LN}(\mu, \sigma)$ und die Trapezverteilung $\mathcal{T}(a, c, d, b)$ verwendet. Die Parameter und Formeln der hier verwendeten Wahrscheinlichkeitsfunktionen wurden in Kapitel 3.1.3 dargestellt.

Geometrieparameter der Gebäudemodelle

In Tabelle A-1 bis Tabelle A-4 sind die Parameter der Verteilungsfunktionen der Zufallsvariablen der Geometrieparameter der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für die vier Informationsniveaus zusammengefasst.

Tabelle A-1: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Geometrieparameter der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,g} = 1$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 1$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{gfl,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,002\mu$	0,730	1,400			TOL
$X_{gh,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,003\mu$	2,00	3,50			TOL
$X_{lbv,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,002\mu$	0,810	1,310			TOL
$X_{fea,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,01\mu$	0,050	0,500			TOL
$X_{aus,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	0,05	$\mu - 180$	$\mu + 180$			TOL
$X_{neig,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	0,05	10	60			TOL
$X_{wfl,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,002\mu$	0,70	1,00			TOL
TOL = Bautoleranzen nach DIN 18202								

Tabelle A-2: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Geometrieparameter der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,g} = 2$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 2$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{gfl,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,01\mu$	0,730	1,400			Log21
$X_{gh,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,007\mu$	2,00	3,50			Log21
$X_{lbv,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,01\mu$	0,810	1,310			Log21
$X_{fea,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,05\mu$	0,050	0,500			Log21
$X_{aus,g}$	\mathcal{TN}	Messung	1	$\mu - 180$	$\mu + 180$			e.F.
$X_{neig,g}$	\mathcal{TN}	Messung	1	10	60			Log21
$X_{wfl,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,02\mu$	0,70	1,00			Log21
e.F. := eigene Festlegung; Log21:= Loga et al. (2021)								

Tabelle A-3: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Geometrieparameter der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,g} = 3$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 3$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{gfl,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,05\mu$	0,730	1,400			Log21
$X_{gh,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,02\mu$	2,00	3,50			Log21
$X_{lbv,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,05\mu$	0,810	1,310			Log21
$X_{fea,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,1\mu$	0,050	0,500			Log21
$X_{aus,g}$	\mathcal{TN}	Messung	5	$\mu - 180$	$\mu + 180$			e.F.
$X_{neig,g}$	\mathcal{TN}	Messung	2	10	60			Log21
$X_{wfl,g}$	\mathcal{TN}	Messung	$0,05\mu$	0,70	1,00			Log21
e.F. := eigene Festlegung; Log21:= Loga et al. (2021)								

Tabelle A-4: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Geometrieparameter der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,g} = 4$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 4$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{gfl,g}$	\mathcal{TN}	aus Typ	$0,1\mu$	0,730	1,400			Log21
$X_{gh,g}$	\mathcal{TN}	aus Typ	$0,05\mu$	2,00	3,50			Log21
$X_{lbv,g}$	\mathcal{TN}	aus Typ	$0,1\mu$	0,810	1,310			Log21
$X_{fea,g}$	\mathcal{TN}	aus Typ	$0,25\mu$	0,050	0,500			Log21
$X_{aus,g}$	\mathcal{TN}	aus Typ	45	$\mu - 180$	$\mu + 180$			e.F.
$X_{neig,g}$	\mathcal{TN}	aus Typ	5	10	60			Log21
$X_{wfl,g}$	\mathcal{TN}	aus Typ	$0,17\mu$	0,70	1,00			Log21
e.F. := eigene Festlegung; Log21:= Loga et al. (2021); Typ := Typgebäude								

Gebäudehülle im Ausgangszustand

In Tabelle A-5 bis Tabelle A-8 sind die Parameter der Verteilungsfunktionen der Zufallsvariablen der Parameter der Gebäudehülle im Ausgangszustand der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für die vier Informationsniveaus zusammengefasst.

Tabelle A-5: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Parameter der Gebäudehülle im Ausgangszustand der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,g} = 1$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 1$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{Uda,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,1\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Uaw,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,1\mu$	0,05	4			Log21
$X_{Ufe,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,1\mu$	0,4	4,5			Log21
$X_{Uog,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,1\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Ukd,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,1\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Uwb,g}$	\mathcal{TN}	aus Plan	0,01	0,01	0,2			Log21
$X_{inf,g}$	\mathcal{TN}	BDT	$0,1\mu$	0,05	0,7			Str17

BDT := Blower-Door-Test; Log21 := Loga et al. (2021); Str17 := Strobl (2017)

Tabelle A-6: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Parameter der Gebäudehülle im Ausgangszustand der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,g} = 2$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 2$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{Uda,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,25\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Uaw,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,25\mu$	0,05	4			Log21
$X_{Ufe,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,15\mu$	0,4	4,5			Log21
$X_{Uog,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,25\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Ukd,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,25\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Uwb,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	0,05	0,01	0,2			Log21
$X_{inf,g}$	\mathcal{TN}	aus BA	$0,25\mu$	0,05	0,7			Str17

BA := Baualter; IWU15 := IWU-Gebäudetypologie aus Loga et al. (2015); Log21 := Loga et al. (2021); Str17 := Strobl (2017)

Tabelle A-7: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Parameter der Gebäudehülle im Ausgangszustand der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,g} = 3$

Zufallsvariable	Verteilungsparameter für $in_{ka,g} = 3$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{Uda,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,3\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Uaw,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,3\mu$	0,05	4			Log21
$X_{Ufe,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,3\mu$	0,4	4,5			Log21
$X_{Uog,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,3\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Ukd,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	$0,3\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Uwb,g}$	\mathcal{TN}	IWU15	0,07	0,01	0,2			Log21
$X_{inf,g}$	\mathcal{TN}	aus BA	$0,5\mu$	0,05	0,7			Str17

BA := Baualter; IWU15 := IWU-Gebäudetypologie aus Loga et al. (2015); Log21 := Loga et al. (2021); Str17 := Strobl (2017)

Tabelle A-8: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Parameter der Gebäudehülle im Ausgangszustand der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,g} = 4$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 4$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{Uda,g}$	\mathcal{TN}	MGB16	$0,5\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Uaw,g}$	\mathcal{TN}	MGB16	$0,5\mu$	0,05	4			Log21
$X_{Ufe,g}$	\mathcal{TN}	MGB16	$0,5\mu$	0,4	4,5			Log21
$X_{Uog,g}$	\mathcal{TN}	MGB16	$0,5\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Ukd,g}$	\mathcal{TN}	MGB16	$0,5\mu$	0,05	3			Log21
$X_{Uwb,g}$	\mathcal{TN}	0,1	0,1	0,01	0,2			Log21
$X_{inf,g}$	\mathcal{TN}	0,26	$0,5\mu$	0,05	0,7			Str17

Log21 := Loga et al. (2021); MGB16 := Mittlerer Gebäudebestand 2016 aus Müller/Heit (2022); Str17 := Strobl (2017)

Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle

In der folgenden Tabelle A-9 sind die Parameter der Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen für die Beschreibung der Sanierung der Gebäudehülle dargestellt. Die Verteilungsfunktionen sind nur für $in_{kv} = 1$ definiert.

Tabelle A-9: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Sanierung der Gebäudehülle der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{kv} = 1$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{kv} = 1$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{dda,g,v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	0,001	0	-			TOL
$X_{daw,g,v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	0,001	0	-			TOL
$X_{dog,g,v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	0,001	0	-			TOL
$X_{dkd,g,v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	0,001	0	-			TOL
$X_{lda,g,v}$	\mathcal{TN}	1,1*HA	$0,05\mu$	HA	0,05			Wad16
$X_{law,g,v}$	\mathcal{TN}	1,1*HA	$0,05\mu$	HA	0,05			Wad16
$X_{log,g,v}$	\mathcal{TN}	1,1*HA	$0,05\mu$	HA	0,05			Wad16
$X_{lkd,g,v}$	\mathcal{TN}	1,1*HA	$0,05\mu$	HA	0,05			Wad16
$X_{ufe,g,v}$	\mathcal{TN}	aus HA	$0,1\mu$	0,4	1,6			Log21
$X_{wb,g,v}$	\mathcal{TN}	aus SN	0,01	0,005	0,1			Log21
$X_{inf,g,v}$	\mathcal{TN}	aus SN	$0,25\mu$	0,01	0,2			Str17

HA := Herstellerangabe; Log21 := Loga et al. (2021); SN := Sanierungsniveau; Str17 := Strobl (2017); TOL := Herstelltoleranzen; Wad16 := Waddicor et al. (2016)

Anlagentechnik

In der folgenden Tabelle A-10 bis Tabelle A-13 sind die Parameter der Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen für die Beschreibung der Anlagentechnik für die jeweiligen Informationsniveaus dargestellt. Für die Anlagentechnik der Quartierszentrale wird definitorisch $g = 0$ gesetzt.

Tabelle A-10: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Anlagentechnik der Gebäudeenergiebedarfsmodelle oder Quartiersnetze für $in_{ka,g} = in_{kv} = 1$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = in_{kv} = 1$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{ke,g,v}$	\mathcal{TN}	0,9*HA	0,02 μ	0,7	HA			Ele17
$X_{wp,g,v}$	\mathcal{TN}	0,9*HA	0,02 μ	1,5	HA			Ele17
$X_{fern,g,v}$	\mathcal{TN}	0,95*HA	0,02 μ	0,9	HA			Ele17
$X_{bhkw,g,v}$	\mathcal{TN}	0,9*HA	0,02 μ	0,4	HA			Ele17
$X_{bhel,g,v}$	\mathcal{TN}	0,98*HA	0,01 μ	0,1	HA			Ele17
$X_{pump,g,v}$	\mathcal{TN}	0,9*HA	0,02 μ	0,5	HA			Ele17
$X_{vol,g,v}$	\mathcal{TN}	HA	0,01 μ	0,5 μ	1,5 μ			TOL
$X_{verlust,g,v}$	\mathcal{TN}	aus SN	0,1 μ	0	2,0 μ			Ele17
$X_{solarA,g,v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	0,002 μ	0,5 μ	1,5 μ			TOL
$X_{solarWk,g,v}$	\mathcal{TN}	0,95*HA	0,02 μ	0,1	HA			Wir23
$X_{batt,g,v}$	\mathcal{TN}	0,85*HA	0,02 μ	0,3*HA	HA			CAR23

CAR23 := C.A.R.M.E.N. (2023); e.F. := eigene Festlegung; Ele17 := Eleftheriadis/Hamdy (2017); HA := Herstellerangabe; SN := Sanierungsniveau; TOL := Herstellungstoleranzen; Wir23 := Wirth (2023)

Tabelle A-11: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Anlagentechnik der Gebäudeenergiebedarfsmodelle oder Quartiersnetze für $in_{ka,g} = 2$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 2$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{ke,g,v}$	\mathcal{TN}	0,9*SW	0,03 μ	0,7	SW			Ele17; Wol04
$X_{wp,g,v}$	\mathcal{TN}	0,9*SW	0,03 μ	1,5	SW			Ele17
$X_{fern,g,v}$	\mathcal{TN}	0,9*SW	0,03 μ	0,9	SW			Ele17
$X_{bhkw,g,v}$	\mathcal{TN}	0,9*SW	0,03 μ	0,4	SW			Ele17
$X_{bhel,g,v}$	\mathcal{TN}	0,98*SW	0,02 μ	0,1	SW			Ele17
$X_{pump,g,v}$	\mathcal{TN}	0,9*SW	0,03 μ	0,5	SW			Ele17
$X_{vol,g,v}$	\mathcal{TN}	SW	0,05 μ	0,5 μ	1,5 μ			e.F.
$X_{verlust,g,v}$	\mathcal{TN}	aus SN	0,2 μ	0	2,0 μ			Ele17

e.F. := eigene Festlegung; Ele17 := Eleftheriadis/Hamdy (2017); SN := Sanierungsniveau; SW := Schätzwert aus Baujahr; Wol04 := Wolff et al. (2004)

Tabelle A-12: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Anlagentechnik der Gebäudeenergiebedarfsmodelle oder Quartiersnetze für $in_{ka,g} = 3$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 3$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{ke,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	0,7	SW			Ele17
$X_{wp,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	1,5	SW			Ele17
$X_{fern,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	0,9	SW			Ele17
$X_{bhkw,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	0,4	SW			Ele17
$X_{bhel,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,98*SW$	$0,02\mu$	0,1	SW			Ele17
$X_{pump,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	0,5	SW			Ele17
$X_{vol,g,v}$	\mathcal{TN}	SW	$0,1\mu$	$0,5\mu$	$1,5\mu$			e.F.
$X_{verlust,g,v}$	\mathcal{TN}	aus SN	$0,5\mu$	0	$2,0\mu$			Ele17

e.F. := eigene Festlegung; Ele17 := Eleftheriadis/Hamdy (2017); SN := Sanierungsniveau;
SW := Schätzwert aus Baujahr

Tabelle A-13: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Anlagentechnik der Gebäudeenergiebedarfsmodelle oder Quartiersnetze für $in_{ka,g} = 4$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,g} = 4$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{ke,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	0,7	SW			Ele17
$X_{wp,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	1,5	SW			Ele17
$X_{fern,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	0,9	SW			Ele17
$X_{bhkw,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	0,4	SW			Ele17
$X_{bhel,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,98*SW$	$0,02\mu$	0,1	SW			Ele17
$X_{pump,g,v}$	\mathcal{TN}	$0,9*SW$	$0,03\mu$	0,5	SW			Ele17
$X_{vol,g,v}$	\mathcal{TN}	SW	$0,2\mu$	$0,5\mu$	$1,5\mu$			e.F.
$X_{verlust,g,v}$	\mathcal{TN}	30	1μ	0	$2,0\mu$			Ele17

e.F. := eigene Festlegung; Ele17 := Eleftheriadis/Hamdy (2017); SW := Schätzwert

Nutzerverhalten im Ausgangszustand

In der folgenden Tabelle A-14 bis Tabelle A-16 sind die Parameter der Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen für die Beschreibung des Nutzerverhaltens im Ausgangszustand für die jeweiligen Informationsniveaus dargestellt.

Tabelle A-14: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen des Nutzerverhaltens einer Wohnung der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,anw} = 2$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,anw} = 2$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{tSet,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-0,5;12)$	$\mu+0,5$	$\text{Max}(\mu-0,5;12)$	$\mu+0,5$	Log19
$X_{tSenk,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-0,5;0)$	$\mu+0,5$	$\text{Max}(\mu-0,5;0)$	$\mu+0,5$	Log19
$X_{hSenk,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-0,5;0)$	$\mu+0,5$	$\text{Max}(\mu-0,5;0)$	$\mu+0,5$	Log19
$X_{dSenk,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-0,5;0)$	$\mu+0,5$	$\text{Max}(\mu-0,5;0)$	$\mu+0,5$	Log19
$X_{ach,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-0,05;0)$	$\mu+0,05$	$\text{Max}(\mu-0,05;0)$	$\mu+0,05$	Log19
$X_{int,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-0,5;0)$	$\mu+0,5$	μ	μ	Log19
$X_{tww,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$0,5\mu$	$1,5\mu$	μ	μ	Log19
Log19 := Loga et al. (2019); NB := Nutzerbefragung								

Tabelle A-15: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen des Nutzerverhaltens einer Wohnung der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,anw} = 3$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,anw} = 3$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{tSet,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-1;12)$	$\mu+1$	$\text{Max}(\mu-1;12)$	$\mu+1$	Log19
$X_{tSenk,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-1;0)$	$\mu+1$	$\text{Max}(\mu-1;0)$	$\mu+1$	Log19
$X_{hSenk,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-1;0)$	$\mu+1$	$\text{Max}(\mu-1;0)$	$\mu+1$	Log19
$X_{dSenk,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-1;0)$	$\mu+1$	$\text{Max}(\mu-1;0)$	$\mu+1$	Log19
$X_{ach,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-0,1;0)$	$\mu+0,1$	$\text{Max}(\mu-0,1;0)$	$\mu+0,1$	Log19
$X_{int,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$\text{Max}(\mu-0,5;0)$	$\mu+0,5$	$\text{Max}(\mu-0,5;0)$	$\mu+0,5$	Log19
$X_{tww,anw}$	\mathcal{T}	aus NB		$0,5\mu$	$1,5\mu$	$0,5\mu$	$1,5\mu$	Log19
Log19 := Loga et al. (2019); NB := Nutzerbefragung								

Tabelle A-16: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen des Nutzerverhaltens einer Wohnung der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{ka,anw} = 4$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{ka,anw} = 4$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{tSet,anw}$	\mathcal{J}			18	24	20	22	Log19
$X_{tSenk,anw}$	\mathcal{J}			0	4	1	2	Log19
$X_{hSenk,anw}$	\mathcal{J}			5	10	6	8	Log19
$X_{dSenk,anw}$	\mathcal{J}			8	10	8	10	Log19
$X_{ach,anw}$	\mathcal{J}			0,05	0,5	0,1	0,1	Log19
$X_{int,anw}$	\mathcal{J}			1,5	4	2	4	Log19
$X_{tww,anw}$	\mathcal{J}	GTyp		$0,2\mu$	2μ	$0,2\mu$	2μ	Log19

GTyp := Gebäudetyp; Log19 := Loga et al. (2019)

Änderung des Nutzerverhaltens nach der Sanierung

In der folgenden Tabelle A-17 sind die Parameter der Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen für die Beschreibung der Anpassung des Nutzerverhaltens an die Sanierung dargestellt. Die Verteilungsfunktionen sind nur für $in_{kv} = 4$ definiert.

Tabelle A-17: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Anpassung des Nutzerverhaltens nach einer Sanierung einer Wohnung der Gebäudeenergiebedarfsmodelle für $in_{kv} = 4$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{kv} = 4$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{tZus,anw}$	\mathcal{J}			0	2	1	1	Log19
$X_{achZus,anw}$	\mathcal{J}			0	0,11	0,05	0,05	Log19

Log19 := Loga et al. (2019)

Anwendungsstrombedarf

In der folgenden Tabelle A-20 bis Tabelle A-19 sind die Parameter der Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen für die Beschreibung des Anwendungsstrombedarfs der Gebäudenutzer für die jeweiligen Informationsniveaus dargestellt.

Tabelle A-18: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen $X_{pwr,anw}$ für den Anwendungsstrombedarf der Gebäudenutzer

Informationsniveau	Funktionsparameter von $X_{pwr,anw}$					Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	
$in_{pwr,anw} = 1$	JN	aus Abrechnung	$0,05\mu$	$0,5\mu$	2μ	e.F. / Wör20
$in_{pwr,anw} = 2$		aus HH-Gruppe	$0,10\mu$			
$in_{pwr,anw} = 3$			$0,15\mu$			
$in_{pwr,anw} = 4$			$0,25\mu$			
e.F. := eigene Festlegung; HH := Haushalt; Wör20 := Wörner (2020)						

Tabelle A-19: kumulierte Verteilungsfunktion zur Zuordnung der Haushaltsgruppen für den Anwendungsstrombedarfsprofile $X_{profil,anw}$ der Gebäudenutzer nach Wörner (2020)

Haushaltsgruppe $x_{profil,anw,n}$	$F(x_{profil,anw,n})$				
	$in_{profil,anw} = 3$			$in_{profil,g,anw} = 4$	
	1 Person	2 Personen	>2 Personen	EFH	MFH
H1	0,500	-	-	-	0,227
H2	0,673	-	-	-	0,306
H3	1,000	-	-	0,213	0,454
H4	-	0,182	-	0,307	0,519
H5	-	0,321	-	0,378	0,568
H6	-	0,711	-	0,578	0,707
H7	-	1,000	-	0,727	0,810
H8	-	-	0,189	0,778	0,846
H9	-	-	0,729	0,925	0,948
H10	-	-	1,000	1,000	1,000
EFH := Einfamilienhaus; MFH := Mehrfamilienhaus					

Quartiersnetz

In der folgenden Tabelle A-20 bis Tabelle A-23 sind die Parameter der Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen für die Beschreibung des Quartiersnetzes für die jeweiligen Informationsniveaus dargestellt. Sofern das Quartiersnetz erst im Zuge einer Sanierungsvariante geplant wird ist $in_{kq} = 1$ anzuwenden.

Tabelle A-20: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen für das Wärmenetzmodell für $in_{kq} = 1$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{kq} = 1$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{I\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,01\mu$	$0,5\mu$	2μ			e.F.
$X_{d\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,01\mu$	$0,5\mu$	2μ			e.F.
$X_{u\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,01\mu$	0	1			e.F.
e.F. := eigene Festlegung								

Tabelle A-21: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen für das Wärmenetzmodell für $in_{kq} = 2$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{kq} = 2$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{I\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,05\mu$	$0,5\mu$	2μ			e.F.
$X_{d\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,05\mu$	$0,5\mu$	2μ			e.F.
$X_{u\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,05\mu$	0	1			e.F.
e.F. := eigene Festlegung								

Tabelle A-22: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen für das Wärmenetzmodell für $in_{kq} = 3$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{kq} = 3$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{I\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,1\mu$	$0,5\mu$	2μ			e.F.
$X_{d\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,1\mu$	$0,5\mu$	2μ			e.F.
$X_{u\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,1\mu$	0	1			e.F.
e.F. := eigene Festlegung								

Tabelle A-23: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen für das Wärmenetzmodell für $in_{kq} = 4$

Zufallsvariable	Funktionsparameter für $in_{kq} = 4$							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{I\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	Aus ES	$0,5\mu$	$0,5\mu$	2μ			e.F.
$X_{d\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,5\mu$	$0,5\mu$	2μ			e.F.
$X_{u\text{Netz},v}$	\mathcal{TN}	aus Plan	$0,5\mu$	0	1			e.F.
e.F. := eigene Festlegung								

Technische Lebensdauern

Tabelle A-24 zeigt die Parameter der definierten Verteilungsfunktionen der Zufallsvariablen für die Beschreibung der Technischen Lebensdauern der Komponenten TLD sowie für die Anschaffungskosten C_{Invest} und Nutzungskosten $C_{Betrieb}$.

Tabelle A-24: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Technischen Lebensdauern

Zufallsvariable	Funktionsparameter							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{TLD,AW,v}$	\mathcal{LN}	39,746	13,161					G21 E2.2
$X_{TLD,Insu,v}$	\mathcal{LN}	57,251	29,592					G21 E2.0
$X_{TLD,Fenster,v}$	\mathcal{LN}	32,267	15,151					G21 E3.1
$X_{TLD,Kessel,v}$	\mathcal{LN}	21,080	4,796					G21 D5.2a
$X_{TLD,WP,v}$	\mathcal{LN}	16,381	4,224					G21 D5.2c
$X_{TLD,Solar,v}$	\mathcal{LN}	20,881	4,825					G21 D5.2d
$X_{TLD,PV,v}$	\mathcal{LN}	22,184	6,095					G21 D1.2a
$X_{TLD,WEsonst,v}$	\mathcal{LN}	19,086	5,753					G21 D5.2
$X_{TLD,WÜ,v}$	\mathcal{LN}	31,016	12,128					G21 D5.4
$X_{TLD,Pellet,v}$	\mathcal{LN}	16,381	4,224					G21 D5.2c
$X_{TLD,BHKW,v}$	\mathcal{LN}	16,381	4,224					G21 D5.2c
$X_{TLD,Kabel,v}$	\mathcal{LN}	30,923	15,130					G21 D1
$X_{TLD,Speicher,v}$	\mathcal{TN}	20,000	2,000	0	40			e.F.
$X_{TLD,Batterie,v}$	\mathcal{TN}	20,000	4,000	0	40			e.F.
$X_{TLD,RohrNW,v}$	\mathcal{TN}	40,000	4,000	0	60			e.F.

AW := Außenwand; e.F. := eigene Festlegung; G21 xx := Komponenten-Code aus Goulouti et al. (2021); Insu := Dämmung allgemein; NW := Nahwärmenetz; PV := Photovoltaik; WE := Wärmeerzeuger; WP := Wärmepumpe; WÜ := Wärmeübergabesysteme

Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanzierung

Tabelle A-25 zeigt die Parameter der definierten Verteilungsfunktionen der Zufallsvariablen für die Beschreibung der Anschaffungskosten $X_{C,Invest}$, Nutzungskosten $X_{C,Betrieb}$ sowie des Treibhauspotenzials X_{GWP} .

Tabelle A-25: Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Variablen der Lebenszykluskostenrechnung

Zufallsvariable	Funktionsparameter							Angelehnt an
	Typ	μ	σ	a	b	c	d	
$X_{C,Invest,Anlage}$	\mathcal{T}			0,730	1,400	0,890	1,150	BKI22
$X_{C,Invest,Dämm}$	\mathcal{T}			0,830	1,280	0,910	1,160	BKI22
$X_{C,Invest,Fenster}$	\mathcal{T}			0,810	1,310	0,870	1,170	BKI22
$X_{C,Invest,Batterie}$	\mathcal{T}			0,810	1,420	0,910	1,090	CAR23
$X_{C,Betrieb}$	\mathcal{TN}	1,000	0,1	0,250	4,000			e.F.
X_{GWP}	\mathcal{T}			0,700	1,000	1,000	1,000	e.F.

BKI22 := BKI (2022a), BKI (2022b); CAR23 := C.A.R.M.E.N. (2023); e.F. := eigene Festlegung

Anhang B – Gebäudemodell für die Energiebedarfsmodellierung

Gebäudemodell Einfamilienhaus

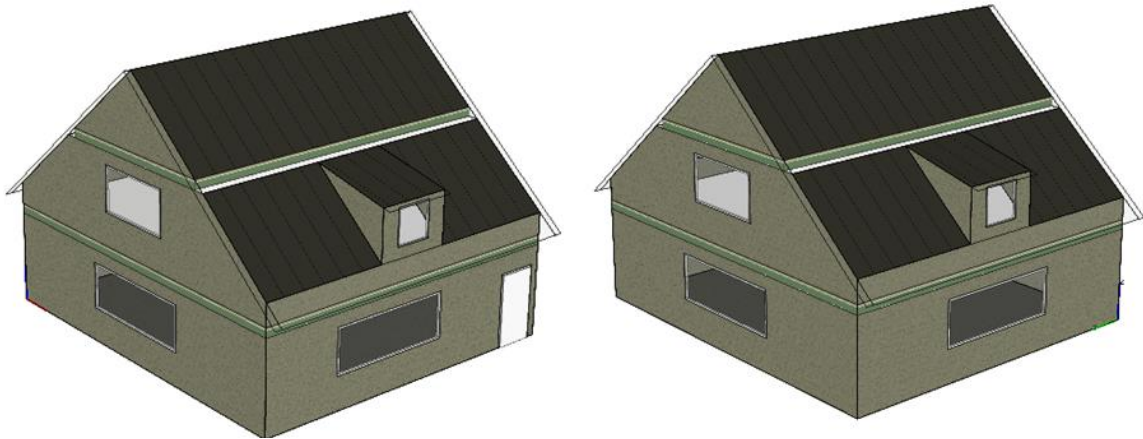


Abbildung B-1: 3D Ansicht des Einfamilienhausmodells in IDA ICE

Tabelle B-1: Geometrieparameter und Gebäudehüllflächen für die verwendeten Gebäudemodelle

	Einfamilienhaus
Geometrieangaben	
Anzahl beheizter Zonen	2
Anzahl unbeheizter Zonen	1 (Dachboden)
Dachneigung	40°
Länge / Breite	10 m / 9 m
Geschosshöhe	2,75 m
Hüllflächen der beheizten Zonen	
Dachflächen beheizter Räume	52 m ²
Oberste Geschosdecke	49 m ²
Außenwand	136 m ²
Fensterfläche	24 m ²
Unterer Gebäudeabschluss	90 m ²

Tabelle B-2: Funktionsparameter der Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Modellparameter des Einfamilienhauses im Ausgangszustand für $in_{ka} = 2$ und $in_{ka} = 4$

Zufallsvariable	$in_{ka} = 2$				$in_{ka} = 4$			
	μ	σ	a	b	μ	σ	a	b
Geometrie								
X_{gfl}	90,000	0,900	0,730	1,400	90,000	9	0,730	1,400
X_{gh}	2,750	0,019	2,000	3,500	2,750	0,138	2,000	3,500
X_{lbv}	0,900	0,009	0,810	1,310	0,900	0,09	0,810	1,310
X_{fea}	0,154	0,008	0,050	0,500	0,154	0,039	0,050	0,500
X_{aus}	0	1	-180	+180	0,00	45	-180	+180
X_{neig}	40	1	10	60	40	5	10	60
Gebäudehülle								
X_{Uda}	0,51	0,128	0,05	3	0,56	0,280	0,05	3
X_{Uaw}	0,78	0,195	0,05	4	1,17	0,585	0,05	4
X_{Ufe}	2,80	0,700	0,4	4,5	2,11	1,055	0,4	4,5
X_{Uog}	1,10	0,275	0,05	3	0,44	0,220	0,05	3
X_{Ukd}	0,85	0,213	0,05	3	0,85	0,425	0,05	3
X_{Uwb}	0,1	0,05	0,01	0,2	0,1	0,1	0,01	0,2
X_{inf}	0,26	0,065	0,05	0,7	0,25	0,125	0,05	0,7
Anlagentechnik								
$X_{ke,v}$	0,81	0,024	0,7	0,9	0,81	0,024	0,7	0,9
$X_{pump,v}$	0,63	0,019	0,5	0,7	0,63	0,019	0,5	0,7
$X_{vol,v}$	0,12	0,006	0,06	0,24	0,12	0,024	0,06	0,24
$X_{verlust,v}$	30	6	0	60	30	30	0	60
Nutzer								
X_{pwr}	2.812	2.812	1.406	5.624	gem. Tab. 5-6 aus $x_{profil,n}$	$0,25\mu$	$0,5\mu$	2μ
X_{profil}	H6				gemäß Tabelle A-19 für EFHs			
	a	c	d	b	a	c	d	b
X_{tSet}	20,5	20,5	21,5	21,5	18	20	22	24
X_{tSenk}	1,5	1,5	2,5	2,5	0	1	2	4
X_{hSenk}	07:00	07:00	08:00	08:00	05:00	06:00	08:00	10:00
X_{dSenk}	7,5	7,5	8,5	8,5	8	8	10	10
X_{ach}	0,21	0,21	0,31	0,31	0,05	0,1	0,1	0,5
X_{int}	2,5	3	3	3,5	1,5	2	4	4
X_{tww}	9,5	19	19	28,5	3,8	3,8	38	38

Tabelle B-3: Funktionsparameter der Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Modellparameter des Einfamilienhauses der Sanierungsvarianten $v = 1$ bis 4

Zufallsvariable	$v = 1$				$v = 2,3,4$			
	μ	σ	a	b	μ	σ	a	b
Gebäudehülle								
$X_{dda,v}$	0,17	0,001	0		0,2	0,001	0	
$X_{daw,v}$	0,14	0,001	0		0,16	0,001	0	
$X_{dog,v}$	0,14	0,001	0		0,14	0,001	0	
$X_{lda,v}$	0,039	0,002	0,035	0,05	0,039	0,002	0,035	0,05
$X_{law,v}$	0,039	0,002	0,035	0,05	0,039	0,002	0,035	0,05
$X_{log,v}$	0,039	0,002	0,035	0,05	0,039	0,002	0,035	0,05
$X_{Ufe,v}$	1,30	0,13	0,4	1,6	1,0	0,1	0,4	1,6
$X_{Uwb,v}$	0,05	0,01	0,005	0,1	0,05	0,01	0,005	0,1
$X_{inf,v}$	0,15	0,038	0,01	0,2	0,1	0,03	0,01	0,2
Anlagentechnik								
$X_{ke,v}$	0,89	0,018	0,7	1				
$X_{wp,v}$					3,15	0,063	1,5	6,0
$X_{pump,v}$	0,72	0,014	0,5	1	0,72	0,014	0,5	1
$X_{vol,v}$	0,12	0,001	0,06	0,24	0,12	0,001	0,06	0,24
$X_{verlust,v}$	10	1	0	20	10	1	0	20
$X_{solarA,v}$					40			
$X_{solarWk,v}$					0,180			
Batteriespeicher (nur $v = 3$ und $v = 4$)								
$X_{batt,3}$					8,5	0,17	3	10
$X_{batt,4}$					63,75	1,275	22,5	75
Nutzeranpassung								
	a	c	d	b	a	c	d	b
$X_{tZus,v}$	0	1	1	2	0	1	1	2
$X_{achZus,v}$	0	0,05	0,05	0,11	0	0,05	0,05	0,11

Anhang C – Grundannahmen für den Anwendungsfall

Ökologische Datenbasis

Tabelle C-1: Verwendete Datensätze aus der ÖKOBAUDAT-Datenbank für den Anwendungsfall

Komponente	Funktionelle Einheit	GWP in kg CO _{2,äq}			Referenznummer ÖKOBAUDAT 2021-II (3/2023)
		A1-A3	C3-C4	D	
EPS-Platten 25 kg/m ³	m ³	77,45	84,00	-34,80	cb582d00-b984-4bb8-ab2e-5302678a721d
Fenster 2-WSV U = 1,3 W/m ² K	m ²	90,37	31,97	-20,96	*
Fenster 3-WSV U = 1,0 W/m ² K	m ²	107,14	33,33	-21,41	*
Gas-Brennwertkessel <20 kW	Stück	251,23	7,73	-48,17	cc25ba78-0036-49ab-8e55-10bdde0317bd
Gas-Brennwertkessel <20-120 kW	Stück	1.313,18	49,35	-318,98	0b82bbb7-4048-4da5-830c-e040e9f3a929
Luft/Wasser- Wärmepumpe 7 kW	Stück	330,57	24,64	-136,81	d59feef8-7a26-499b-a9d8-7149b5d3de24
Warmwasserspeicher	kg	4,30	0,68	-1,01	6899ae8e-86d3-42d0-a1ba-efe711b3aef2
PV-Modul	m ²	302,30	12,21	-33,42	236ee906-0090-42ab-90ae-37bc553be0a0
Batteriespeicher	kWh	256,87	22,75	-32,24	ad5f4666-dffa-45d4-abe4-fb5ab74d63e1
Kabel (5-adrig)	m	0,62	0,28	-0,24	7856b133-31a0-4059-b368-dc227108336e

* Die Fenster werden aus einer für den jeweiligen U-Wert notwendigen Verglasung und einem Rahmen zusammengestellt. Für den Glasanteil sind 90 % angesetzt. Der Rahmen (PVC-Blend- und Flügelrahmen) wird mit einer Länge von 3,38 m aus einer Standardfenstergröße 1,25 m * 1,125 m auf den m² Fensterfläche umgerechnet.

Funktionen der Anschaffungskosten

Tabelle C-2: Verwendete Kostenfunktionen für die mittleren Anschaffungskosten für den Anwendungsfall

Bauteil / Komponente der Anlagentechnik	Bezugsgröße	Einheit <i>cost</i>	Kostenfunktion			Angelehnt an
			Typ	c_1	c_2	
Dämmmaßnahmen						
Dämmung Dach EPS	€/m ²	cm	$c_1 * cost + c_2$	3,27	123,29	Koch21
Dämmung WDVS EPS	€/m ²	cm	$c_1 * cost + c_2$	3,25	112,18	Koch21
Dämmung Kellerdecke EPS	€/m ²	cm	$c_1 * cost + c_2$	1,45	35,73	Koch21
Dämmung Decke OG EPS	€/m ²	cm	$c_1 * cost + c_2$	1,24	4,33	Koch21
Fenster						
Fenster $U = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$	€/Stk.	m ²	$c_1 * cost + c_2$	0,00	426,47	Koch21
Fenster $U = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	€/Stk.	m ²	$c_1 * cost + c_2$	0,00	488,70	Koch21
Wärmeversorgung						
Gas-Brennwertkessel	€/Stk.	kW	$c_1 * cost + c_2$	53,57	6.118,80	BKI22
Luft/Wasser-Wärmepumpe	€/Stk.	kW	$c_1 * cost + c_2$	923,07	4.077,40	BKI22
Speicher 0,5 – 1 m ³	€/Stk.	m ³	$c_1 * cost + c_2$	3.340,00	97,00	BKI22
Stromversorgung						
Photovoltaik-Modul	€/Stk.	m ²	$c_1 * cost + c_2$	285,41	2.837,80	BKI22
Trasse Stromnetz	€/Trasse	m	$c_1 * cost + c_2$	83,83	0,00	Weiß17/BKI22
Batteriespeicher bis 50 kWh Nutzkapazität	€/Stk.	kWh	$c_1 * cost + c_2$	779,78	5.353,00	CAR23
Batteriespeicher über 50 kWh Nutzkapazität	€/Stk.	kWh	$c_1 * cost + c_2$	725,33	55.405,00	CAR23
AW := Außenwand; BKI22 := BKI (2022a), BKI (2022b); CAR23 := C.A.R.M.E.N. (2023); Koch21 := Koch et al. (2021); Weiß17 := Weißmann (2017)						

Die Kostenfunktionen der Dämmmaßnahmen an der Gebäudehülle sowie der Fenster wurden auf Vollkostenbasis von Koch et al. (2021) übernommen. Für die Stromtrasse des Quartierstromnetzes wurde der Aufbau von Weißmann (2017) mit den Preisen des BKI (2022a) aktualisiert. Für die Batteriespeicher wurde eine Kostenfunktion über zwei lineare Regressionen aus den Daten von C.A.R.M.E.N. (2023) gebildet, siehe Abbildung C-1. Für die Wärmeerzeuger sowie das PV-Modul und den Pufferspeicher wurden aus den Werten des BKI (2022a) lineare Kostenfunktionen abgeleitet.

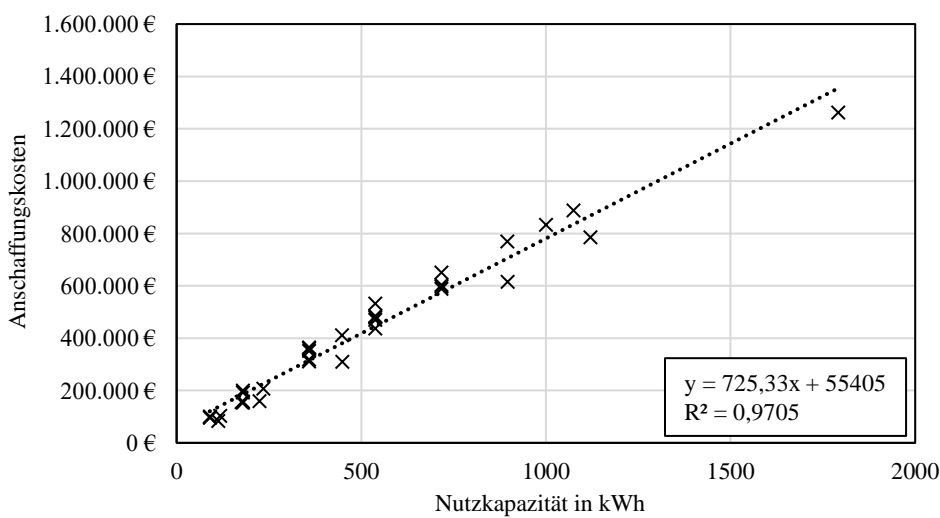
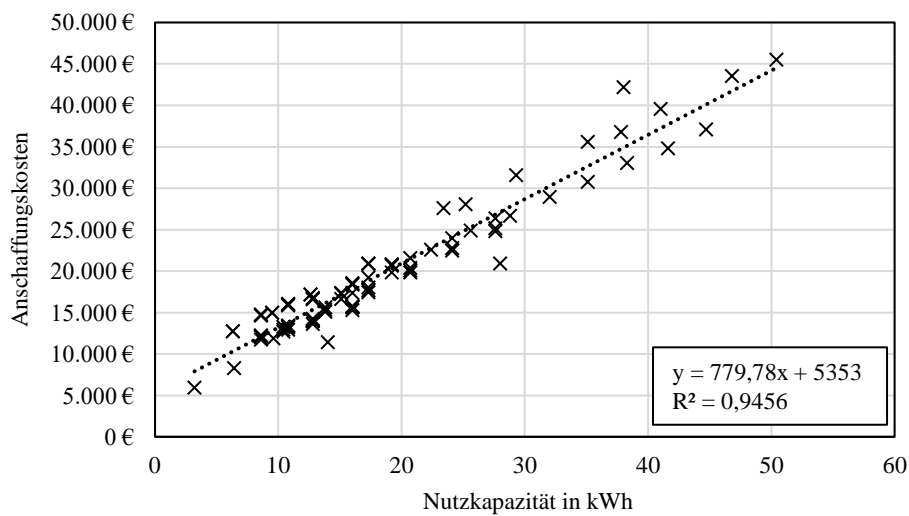


Abbildung C-1: Ermittlung der Kostenfunktionen für Batteriespeicher aus den Daten von C.A.R.M.E.N. (2023)

Nutzungskosten

Tabelle C-3: Verwendete Nutzungskosten für den Anwendungsfall

Bauteil / Komponente der Anlagentechnik	Instandsetzung	Wartung und Inspektion	Angelehnt an
Wärmedämmung	0,00 %	0,10 %	DGNB (2018)
Fenster	0,00 %	0,10 %	
Gas-Brennwertkessel	1,00 %	1,50 %	VDI 2067-1
Luft/Wasser-Wärmepumpe	1,00 %	1,50 %	
Warmwasserspeicher	1,00 %	1,00 %	
PV-Modul	0,60 %	1,00 %	DGNB (2018); Weißmann (2017)
Batteriespeicher	0,60 %	1,00 %	
Trasse Stromnetz	0,60 %	1,00 %	

Anhang D – Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für das Energiebedarfsmodell

Sensitivitäten des Einfamilienhauses im Ausgangszustand

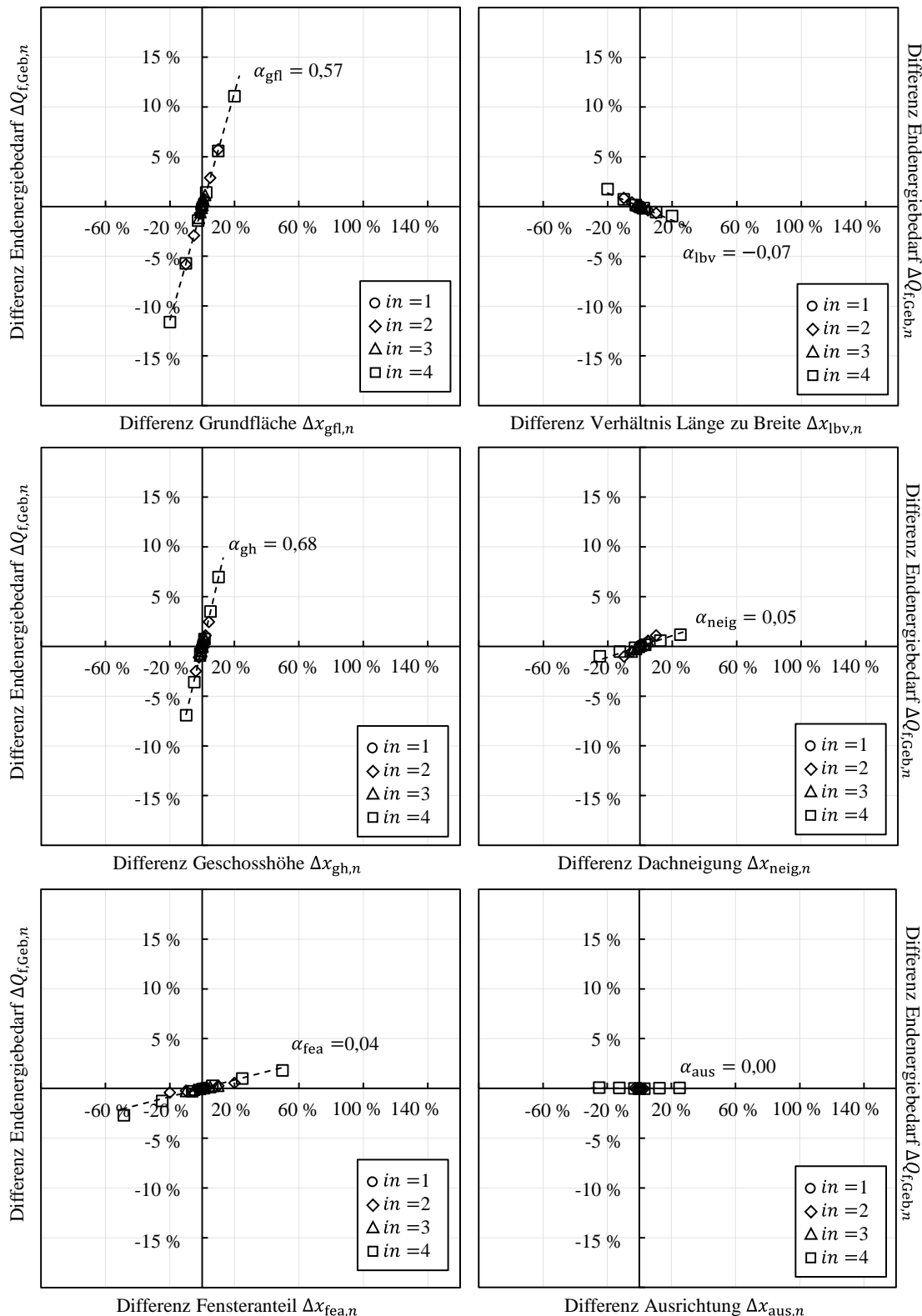


Abbildung D-1: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH im Ausgangszustand für Geometrievariablen

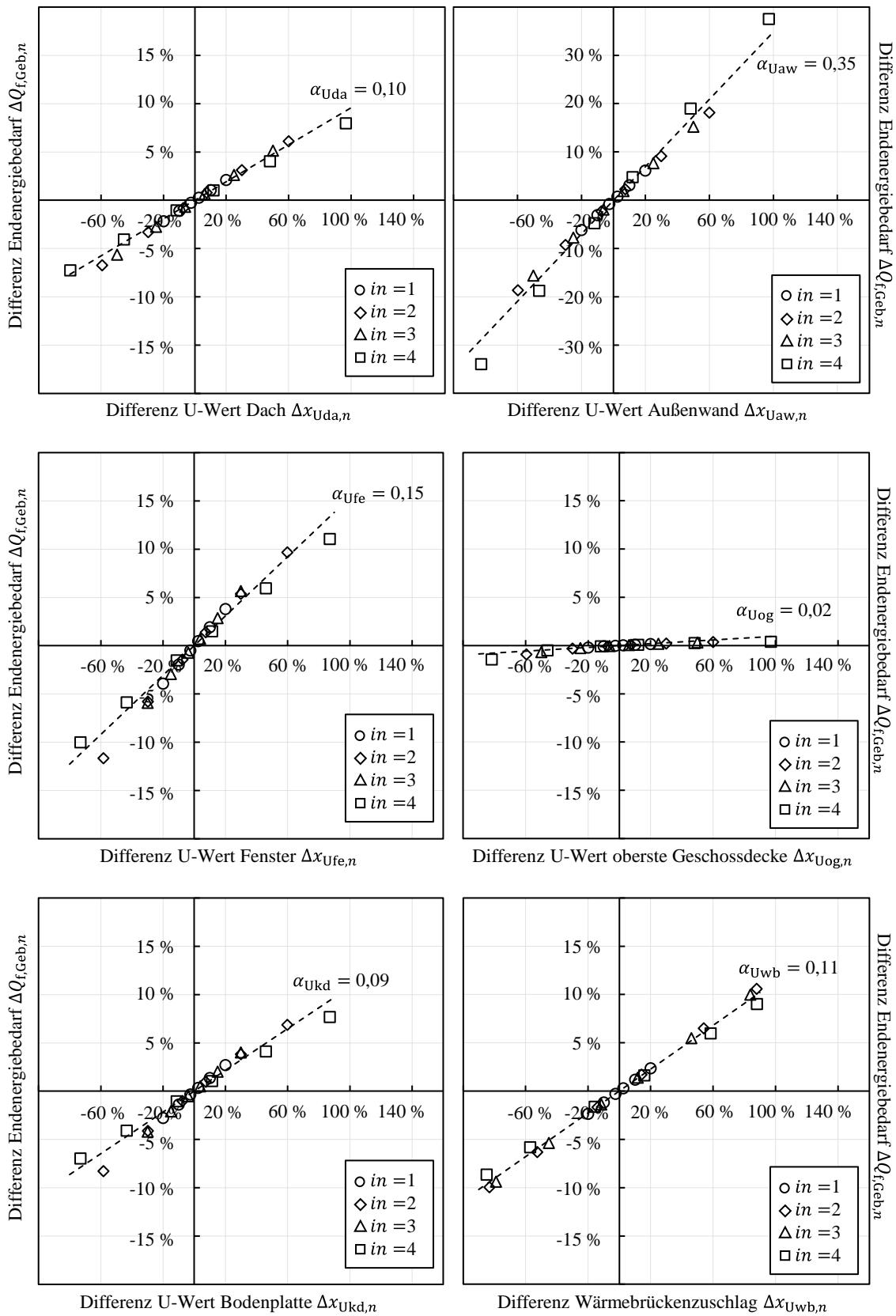


Abbildung D-2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH im Ausgangszustand für Variablen der Gebäudehülle

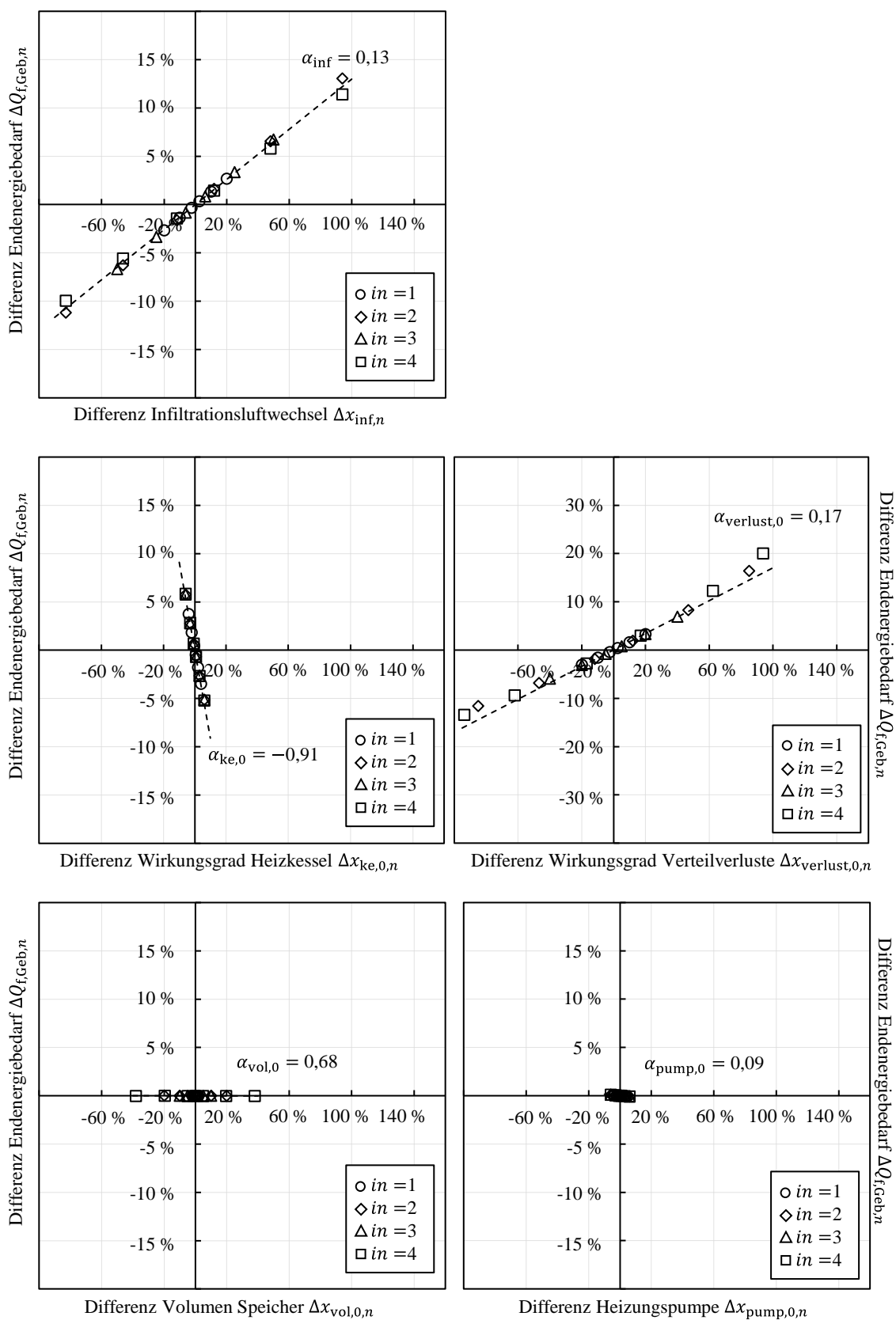


Abbildung D-3: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH im Ausgangszustand für Variablen des Infiltrationsluftwechsels und der Anlagentechnik

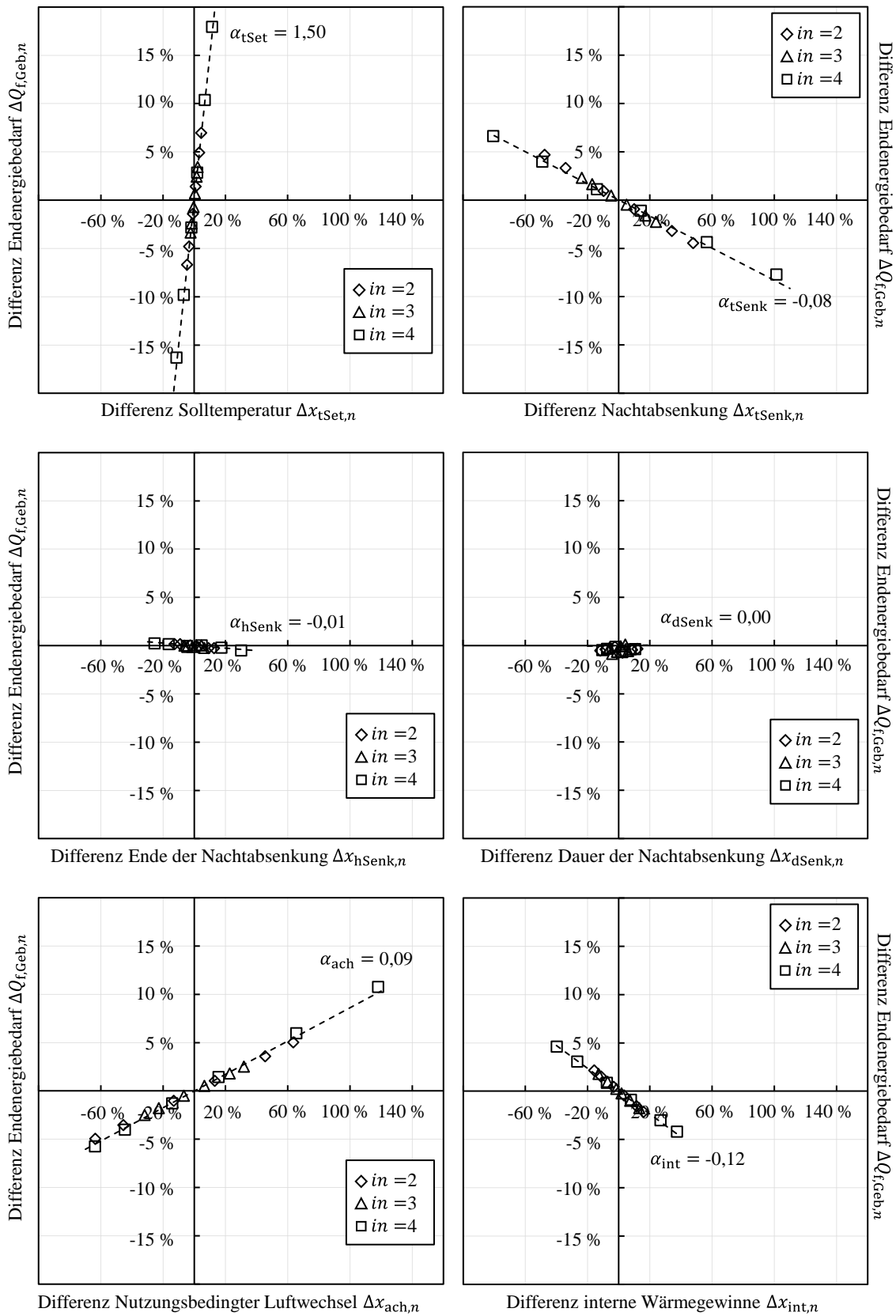


Abbildung D-4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH im Ausgangszustand für Variablen des Nutzerverhaltens Teil 1

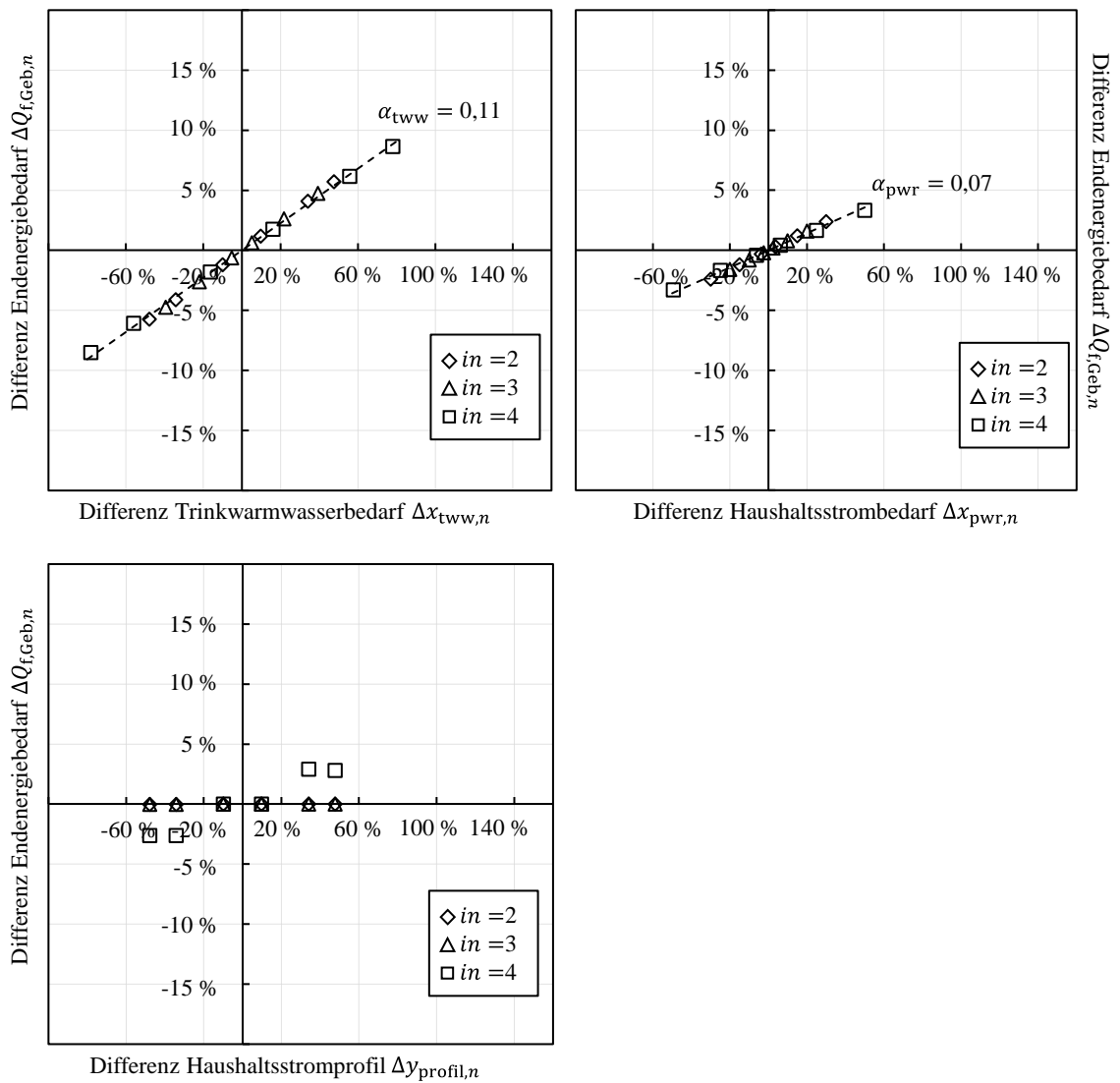


Abbildung D-5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH im Ausgangszustand für Variablen des Nutzerverhaltens Teil 2

Sensitivitäten des Einfamilienhauses im der Sanierungsvariante $v = 1$

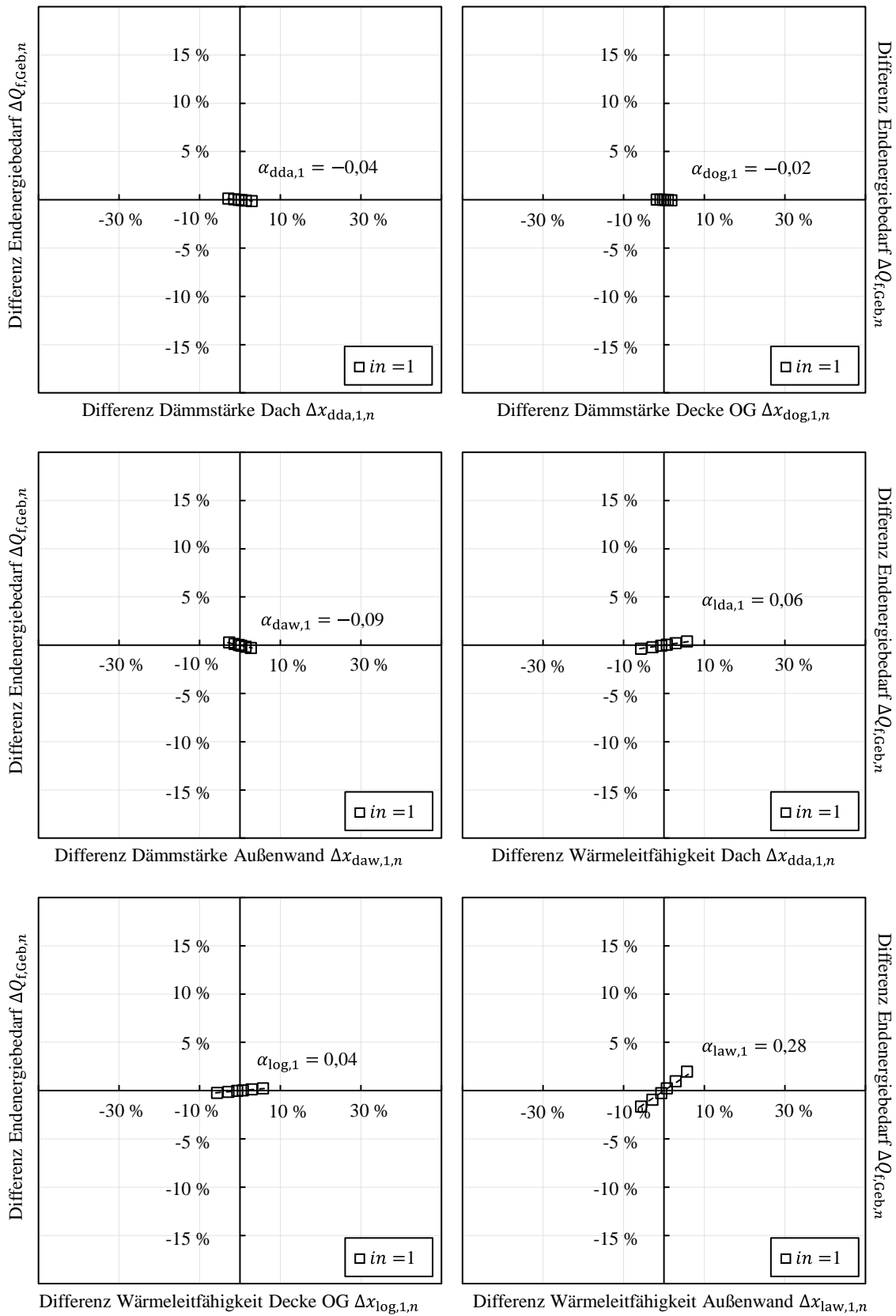


Abbildung D-6: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH für die Sanierungsvariante $v = 1$ für Variablen der Dämmmaßnahmen

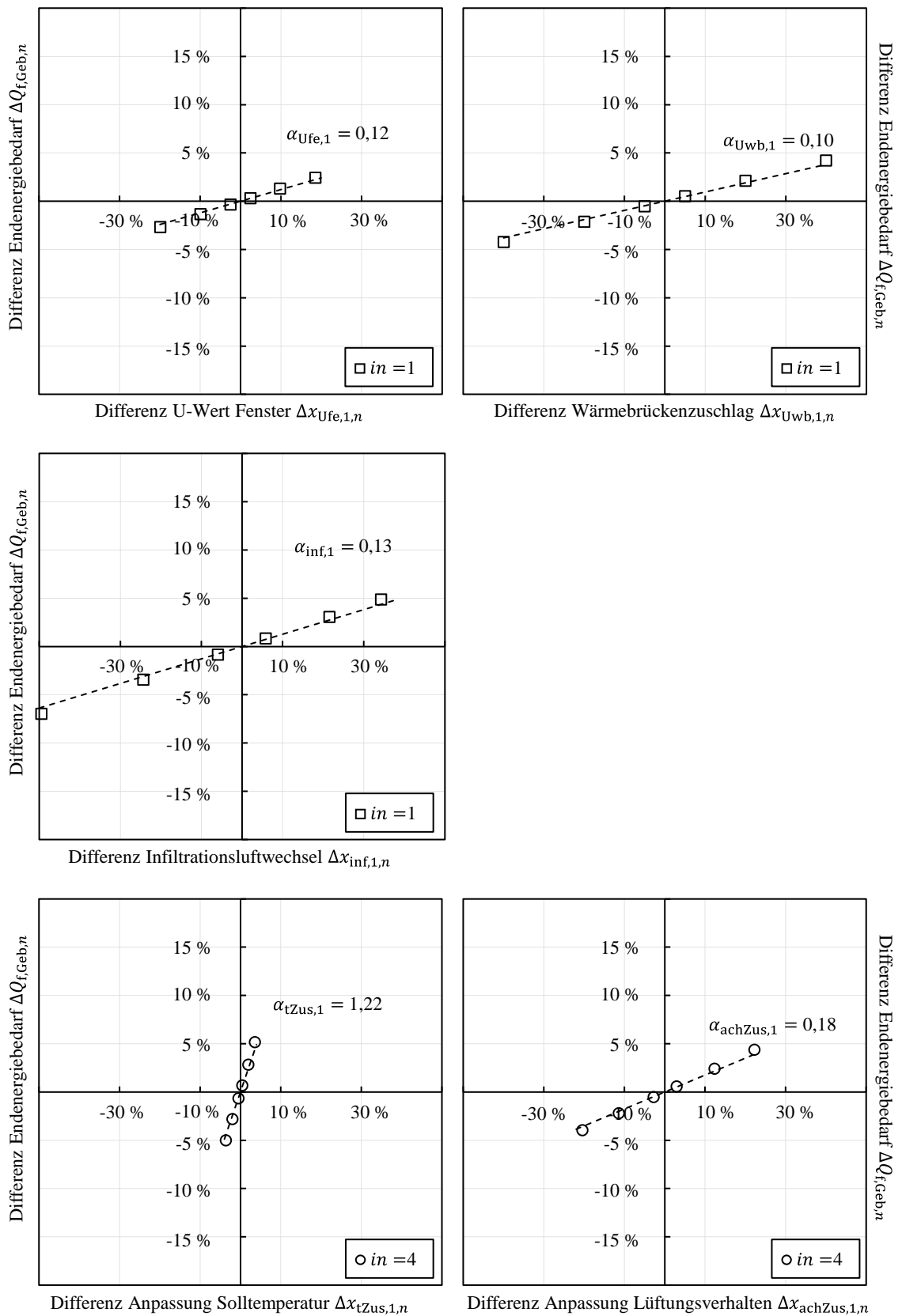


Abbildung D-7: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH für die Sanierungsvariante $v = 1$ für Variablen der Gebäudehülle und der Anpassung des Nutzerverhaltens

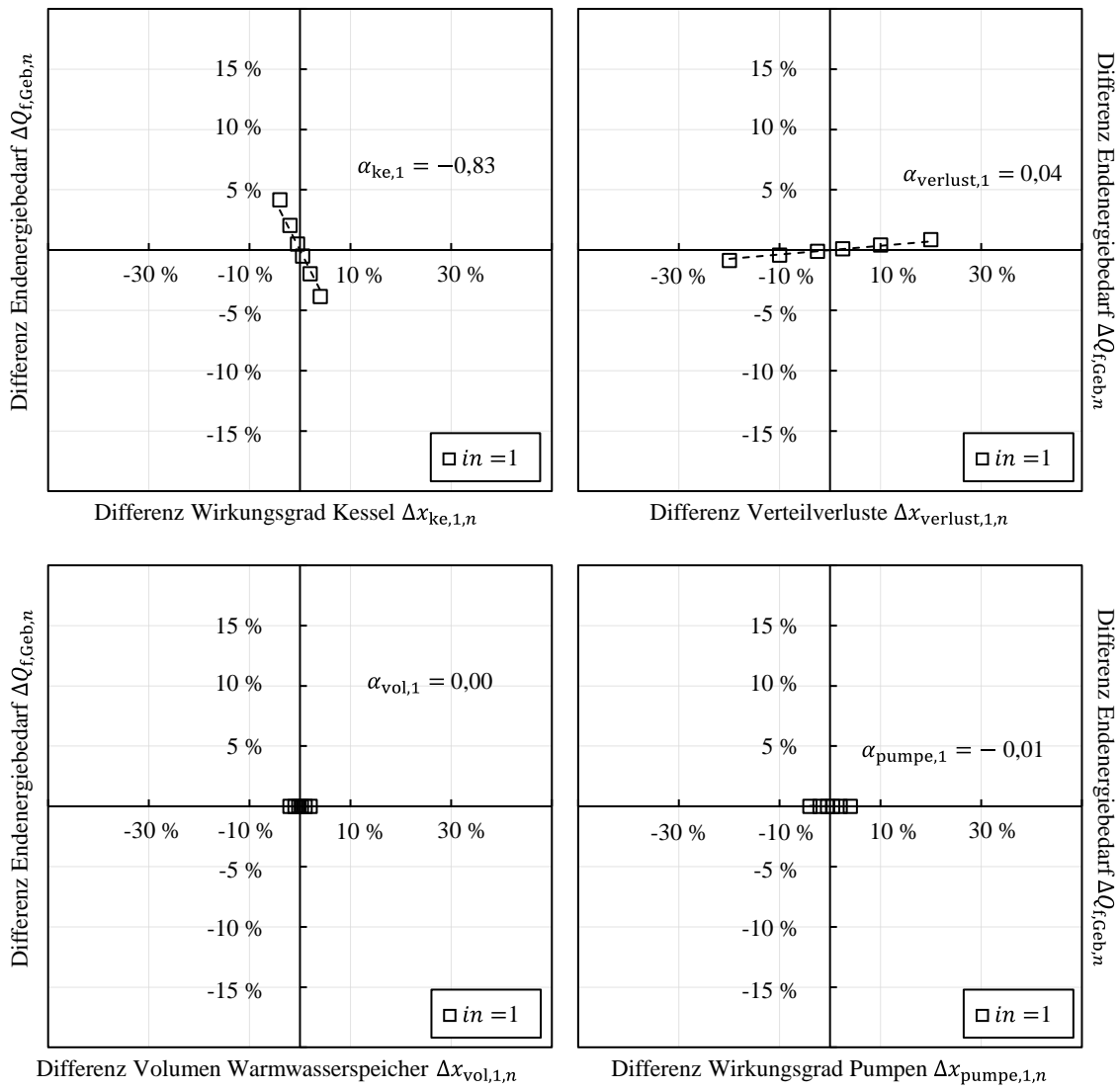


Abbildung D-8: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH für die Sanierungsvariante $v = 1$ für Variablen der Anlagentechnik

Sensitivitäten des Einfamilienhauses im der Sanierungsvariante $v = 2$

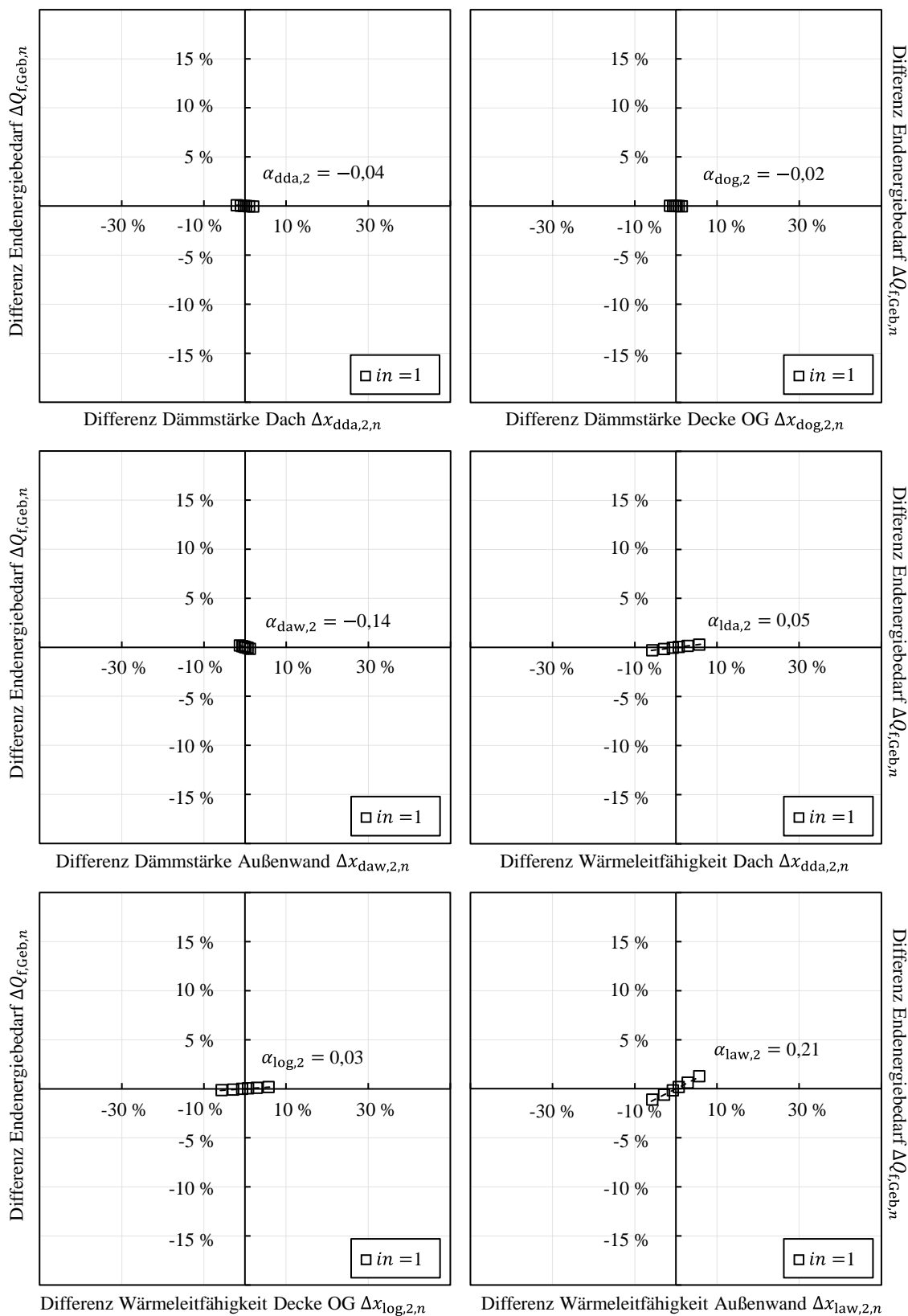


Abbildung D-9: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH für die Sanierungsvariante $v = 2$ für Variablen der Dämmmaßnahmen

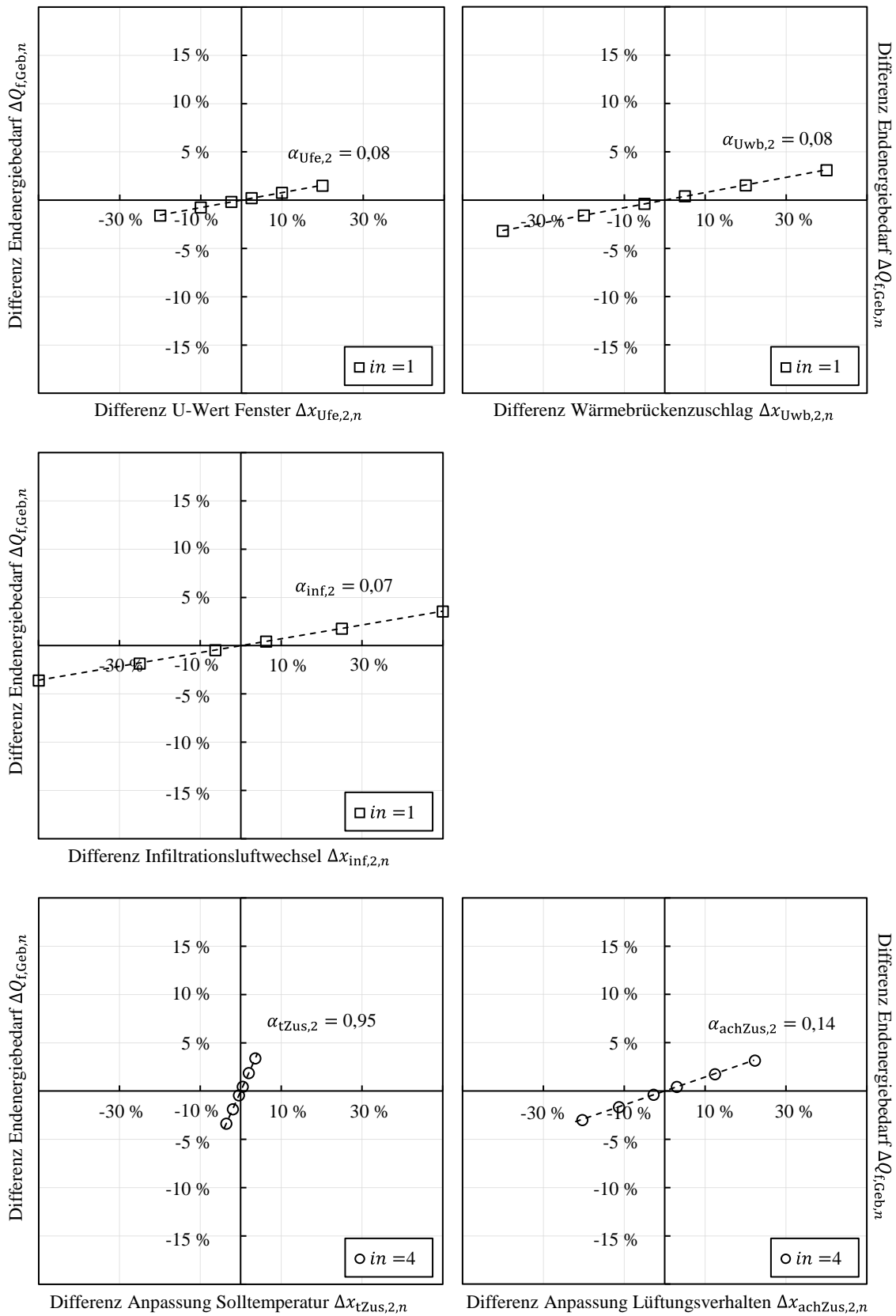


Abbildung D-10: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH für die Sanierungsvariante $v = 2$ für Variablen der Gebäudehülle und der Anpassung des Nutzerverhaltens

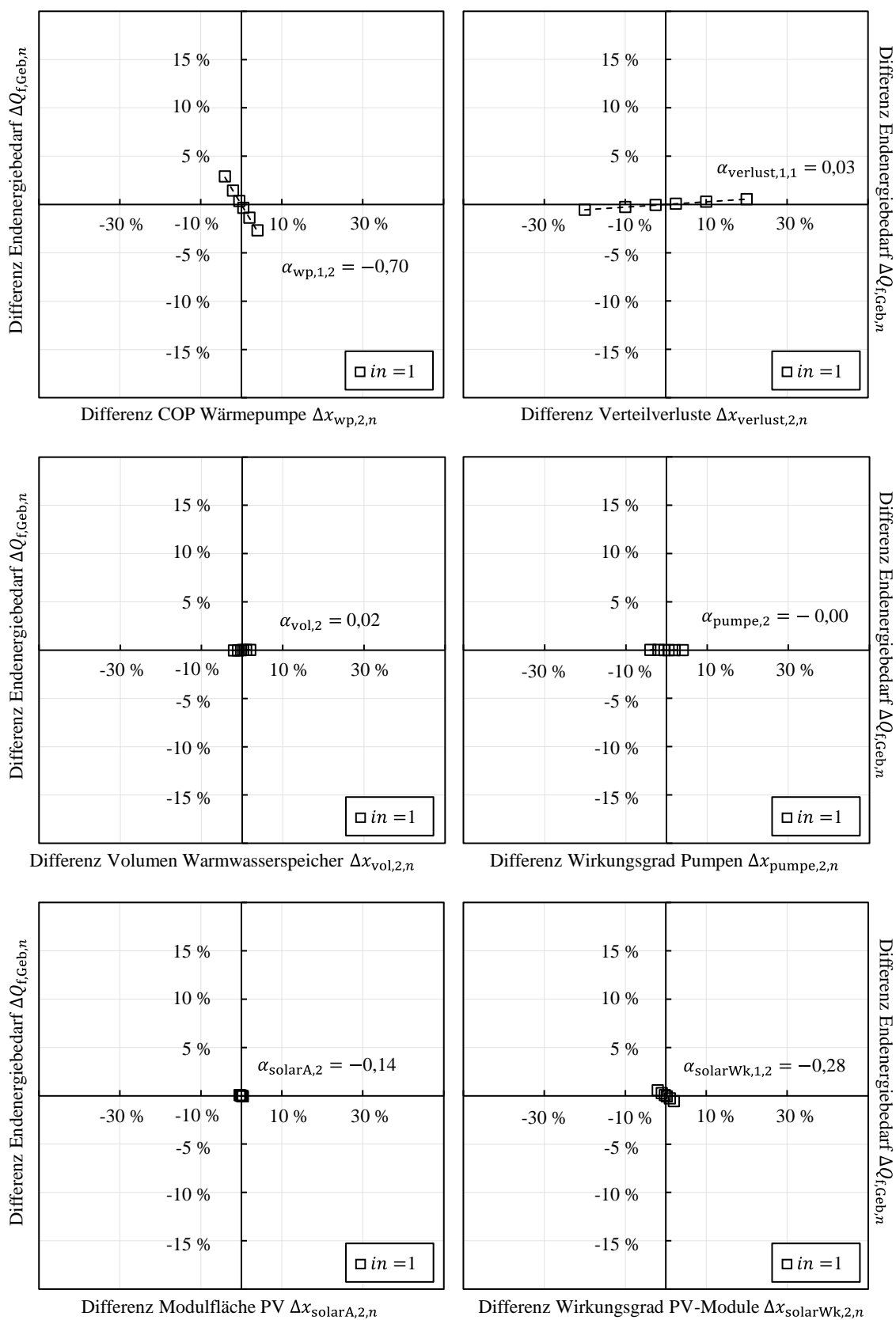


Abbildung D-11: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des EFH für die Sanierungsvariante $v = 2$ für Variablen der Anlagentechnik

Dissertationsreihe

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Institut für Massivbau

Technische Universität Darmstadt

- Heft 1: **Stefan Kempf (2001)**
Technische und wirtschaftliche Bewertung der Mindestbewehrungsregeln für Stahlbetonbauteile
- Heft 2: **Katja Reiche (2001)**
Nachhaltigkeitsanalyse demontagegerechter Baukonstruktionen – Entwicklung eines Analysemodells für den Entwurf von Gebäuden
- Heft 3: **Michael Six (2001)**
Sicherheitskonzept für nichtlineare Traglastverfahren im Betonbau
- Heft 4: **Eric Simon (2002)**
Schubtragverhalten von Mauerwerk aus großformatigen Steinen
- Heft 5: **Holger Schmidt (2003)**
Versagenswahrscheinlichkeit unbewehrter Wand-Decken-Verbindungen bei Gasexplosionen im Fertigteilbau
- Heft 6: **Andreas Bachmann (2003)**
Ein wirklichkeitsnaher Ansatz der böenerregten Windlasten auf Hochhäuser in Frankfurt/Main
- Heft 7: **Duy Tien Nguyen (2004)**
Rotationskapazität von biegebeanspruchten Stahlbetonbauteilen mit Schubrissbildung
- Heft 8: **Gert Wolfgang Riegel (2004)**
Ein softwaregestütztes Berechnungsverfahren zur Prognose und Beurteilung der Nutzungskosten von Bürogebäuden
- Heft 9: **Christian Glock (2004)**
Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände – Nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung
- Heft 10: **Kati Herzog (2005)**
Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen – Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente zur ökonomischen Analyse und Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden
- Heft 11: **Andreas Garg (2006)**
Spannungszustände in Fahrbahnplatten weit gespannter Stahlverbundbrücken – Empfehlungen für die Herstellung der Ortbeton-Fahrbahnplatte von Talbrücken mit der Schalwagenmethode

- Heft 12: **Tilo Proske (2007)**
Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton – Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung
- Heft 13: **Simon Glowienka (2007)**
Zuverlässigkeit von großformatigem Mauerwerk – Probabilistische Analyse von großformatigem Mauerwerk aus Kalksandstein und Porenbeton mit Dünnbettvermörtelung
- Heft 14: **Alexander Renner (2007)**
Energie- und Ökoeffizienz von Wohngebäuden – Entwicklung eines Verfahrens zur lebenszyklusorientierten Bewertung der Umweltwirkungen unter besonderer Berücksichtigung der Nutzungsphase
- Heft 15: **Guido Hausmann (2007)**
Verformungsvorhersage vorgespannter Flachdecken unter Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften
- Heft 16: **Stefan Daus (2007)**
Zuverlässigkeit des Klebeverbundes von nachträglich verstärkten Betonbauteilen – Sicherheitskonzept für den Verbundnachweis von oberflächlich geklebter Bewehrung
- Heft 17: **Thomas Kranzler (2008)**
Tragfähigkeit überwiegend horizontal beanspruchter Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk
- Heft 18: **Lars Richter (2009)**
Tragfähigkeit nichttragender Wände aus Mauerwerk – Ein nichtlineares Berechnungsmodell und Bemessungsverfahren für biegebeanspruchte Innen- und Außenwände
- Heft 19: **Markus Spengler (2010)**
Dynamik von Eisenbahnbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr – Entwicklung eines Antwortspektrums zur Erfassung der dynamischen Tragwerksreaktion
- Heft 20: **Linh Ngoc Tran (2011)**
Berechnungsmodell zur vereinfachten Abschätzung des Ermüdungsverhaltens von Federplatten bei Fertigträgerbrücken
- Heft 21: **Carmen Schneider (2011)**
Steuerung der Nachhaltigkeit im Planungs- und Realisierungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden – Entwicklung eines Instrumentes zur Vorbewertung und Optimierung der Nachhaltigkeitsqualität
- Heft 22: **Frank Ritter (2011)**
Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen – Modellierung und praxisnahe Prognose
- Heft 23: **Benjamin von Wolf-Zdekauer (2011)**
Energieeffizienz von Anlagensystemen zur Gebäudekühlung – Ein nutzenbezogener Bewertungsansatz

- Heft 24: **Eric Brehm (2011)**
Reliability of Unreinforced Masonry Bracing Walls – Probabilistic Approach and Optimized Target Values
- Heft 25: **Carolin Roth (2011)**
Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten – Ein Beitrag zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden bei ungewissem Lebensweg
- Heft 26: **Kay-Uwe Thorn (2013)**
Neuentwicklung eines Ladungsrückhaltesystems aus textilbewehrten Betonfertigteilen
- Heft 27: **Andreas Greck (2013)**
Straßenbrücken mit einteiligem Verbundquerschnitt – Optimierung des Betonierablaufs der Fahrbahnplatte und Entwicklung eines Vorschlags zur vereinfachten globalen Systemberechnung beim Einsatz mehrerer Schalwagen
- Heft 28: **Martin Heimann (2013)**
Tragwerkszuverlässigkeit hochbeanspruchter Druckglieder aus ultrahochfestem Beton
- Heft 29: **Torsten Mielecke (2013)**
Nachhaltigkeitsbewertung von Einfamilienhäusern – Ein Beitrag zur Beurteilung und Optimierung der Nachhaltigkeitsqualität von kleinen Wohngebäuden
- Heft 30: **Sebastian Pohl (2013)**
Nachhaltigkeit im Gebäudebetrieb – Ein Vorschlag zur Diversifizierung des bau- und immobilienwirtschaftlichen Zertifizierungsregimes in Deutschland
- Heft 31: **Stefan Hainer (2015)**
Karbonatisierungsverhalten von Betonen unter Einbeziehung klinkerreduzierter Zusammensetzungen – Ein Modell zur Abschätzung des Karbonatisierungsfortschritts
- Heft 32: **Achim Knauff (2016)**
Heizwärmeerzeugung mit Solarthermie, Geothermie und Photovoltaik für Büro- und Verwaltungsgebäude
- Heft 33: **Ulf Grziwa (2017)**
Zuverlässigkeit schlanker UHPC-Druckglieder mit räumlich streuenden Materialeigenschaften
- Heft 34: **Björn Freund (2017)**
Frischbetondruck lotrechter, geneigter und gekrümmter Betonbauteile bei Verwendung von Betonen mit hoher Fließfähigkeit
- Heft 35: **Gökhan Uysal (2017)**
Kostenrisiken von Industriebauten mit flexiblen Nutzungsszenarien
- Heft 36: **Moien Rezvani (2017)**
Shrinkage model for concrete made of limestone-rich cements – An approach from cement paste to concrete

- Heft 37: **Claudia Weißmann (2017)**
Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzten Wohnquartieren – Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung
- Heft 38: **Markus Blatt (2017)**
Beitrag zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetondeckenknoten ökologischen und ökonomischen Bewertung
- Heft 39: **Michael Schmitt (2017)**
Tragfähigkeit ausfachender Mauerwerkswände unter Berücksichtigung der verformungsbasierten Membranwirkung
- Heft 40: **Valentin Förster (2018)**
Tragfähigkeit unbewehrter Beton- und Mauerwerksdruckglieder bei zweiachsig exzentrischer Beanspruchung
- Heft 41: **Ngoc Linh Tran (2018)**
Shear strength of slender reinforced concrete members without shear reinforcement
- Heft 42: **Jaroslav Kohoutek (2018)**
Zuverlässigkeit integraler Straßenbrücken in Massivbauweise
- Heft 43: **Jochen Zeier (2019)**
Thermisch getrennte Stützen-Decken-Anschlüsse im Stahlbetonbau – Ein Modell zum Tragverhalten bei großen Fugendicken
- Heft 44: **Katharina Fritz (2019)**
Qualifizierte Beurteilung der sektoralen Ressourceninanspruchnahme im deutschen Bauwesen
- Heft 45: **Patrick Wörner (2020)**
Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Stromverbrauch in Wohngebäuden – Entwicklung eines komplexen Simulationsmodells für energetische Analysen
- Heft 46: **Martina Lohmeier (2020)**
Nachhaltigkeitsvergleich von Projektvarianten für Außerortsstraßen – Ein Vorschlag für den Abwägungs- und Entscheidungsprozess in der Vorplanung
- Heft 47: **Larissa Krieger (2020)**
Tragverhalten textilbewehrter Fertigteilplatten aus hochfestem Carbonbeton – Einfluss der Ausbreitung konzentrierter Einzellasten auf die Biegetragfähigkeit
- Heft 48: **Sarah Steiner (2020)**
Carbonation of concrete made of limestone-rich cement – CO₂ diffusivity and alteration of the hydrate phases
- Heft 49: **Redouan El Ghadioui (2020)**
Bemessung carbonbewehrter Betonbauteile unter besonderer Betrachtung des Gebrauchszustandes – Entwicklung eines Modells zur wirklichkeitsnahen Verformungsberechnung

- Heft 50: **Sebastian Hofmann (2021)**
Rissentwicklung in Betonbauteilen mit Basaltfaserkunststoffbewehrung bei wirklichkeitsnaher Betrachtung des Verbundverhaltens – Ein Modell zur Berechnung der Rissbreite im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
- Heft 51: **Dominik Müller (2022)**
Probabilistic Assessment of Existing Masonry Structures – The Influence of Spatially Variable Material Properties and a Bayesian Method for Determining Structure-Specific Partial Factors
- Heft 52: **Christian Alexander Herget (2022)**
Kalksteinmehl als Betonzusatzstoff für umweltfreundliche Betone – Bestimmung eines Anrechenbarkeitsfaktors zur Sicherstellung gleichwertiger Festbetoneigenschaften
- Heft 53: **Maximilian Brinkmann (2023)**
Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile
- Heft 54: **Dominik Hiesch (2023)**
Bemessung von Betonfertigteilen mit vorgespannter Bewehrung aus Faserverbundkunststoff – Entwicklung eines Bemessungskonzeptes unter Berücksichtigung wirklichkeitsnaher Bauteilverformungen
- Heft 55: **André Müller (2023)**
Methodik zur datenbasierten Typisierung von Quartieren anhand baulicher Strukturen – Geometrisch-topologische Grundlagen für die energetische Bewertung des nationalen Quartiersbestandes auf Basis von Geoinformationsdaten
- Heft 56: **Johannes Koert (2023)**
Bewertung von Unsicherheiten beim Variantenvergleich energetischer Quartierssanierungen – Entwicklung eines Simulationsmodells zur Berücksichtigung streuender Einflussgrößen über den Lebenszyklus bei der ökonomischen und ökologischen Bewertung von Wohnquartieren