

Bachelorarbeit

Ermittlung optimierter Gebäudeenergiesysteme für den deutschen Wohngebäudebestand unter besonderer Berücksichtigung von Lüftungsverlusten

Determination of optimized building energy systems for the German residential building stock with special consideration of ventilation losses

Aachen, Juni 2019

Jonas Baumgärtner

Matrikelnummer: 330575

Betreuer:

Sebastian Remy, M. Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Diese Arbeit wurde vorgelegt am:

E.ON Energy Research Center | ERC

Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate | EBC

(Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik)

Mathieustraße 10, 52074 Aachen

Kurzfassung

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Vorwort	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Deutscher Wohngebäudebestand	2
2.2 Historische Entwicklung der Gebäudehülle	5
2.3 Sanierungsstand des deutschen Wohngebäudebestandes	9
2.4 Förderprogramme zur energetischen Sanierung	11
3 Stand der Technik	13
3.1 Arten der Optimierung	13
3.2 Referenzmodell als Grundlage dieser Arbeit	17
3.3 Lüftungswärmeverluste in Wohngebäuden	25
3.3.1 Fensterlüftung	26
3.3.2 Infiltration	30
3.3.3 Maschinelle Lüftung	32
4 Parameterbeschaffung	34
4.1 Kategorisierung des Gebäudebestandes	34
4.2 Parameter zur Modellierung von Lüftungswärmeverlusten	37
5 Modellerweiterung und Parameterwahl	40
5.1 Modellierung dynamischer Lüftungswärmeverluste	40
Literaturverzeichnis	42

A Tabellen	48
A.1 Anzahl an Wohneinheiten nach Alter und Gebäudetyp (IWU Berechnungen)	48
A.2 U-Werte nach TABULA	49
A.3 Anzahl, Anteil und U_g -Werte gängiger Verglasungsarten	50
A.4 Inputparameter Gebäudealter und -lage	51
A.5 Kostenkennlinie und Nutzungsdauer der Gebäudehüllenkomponenten	51
A.6 Nutzungskosten und Betriebskosten der Anlagentechnik	52

Nomenklatur

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C	Wärmekapazität	W/kg
H	Enthalpie	J
\dot{H}	Enthalpiestrom	J/s
E	Exergie	J
e	spezifische Exergie	J/kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
p	Druck	Pa
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	spezifische Gaskonstante	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
S	Entropie	J/K
\dot{S}	Entropiestrom	W/K
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
U	innere Energie	J
U_T	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
h	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
V	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
\dot{W}	Leistung	W
Y	Wasserbeladung der Luft	g/kg

Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
ψ	Wärmebrückenwirkung	—

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
MFH	Mehrfamilienhaus (<i>multy family home</i>)
SFH	Einfamilienhaus (<i>single family home</i>)
WschV	Wärmeschutzverordnung

Abbildungsverzeichnis

2.1	errichtete Wohngebäude nach Mikrozensus-Klassen sowie deren Anteil am Gebäudebestand [in %]. [45]	3
2.2	Anzahl an Wohneinheiten bei Einfamilienhäuser (SFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) sowie deren relativer Anteil [in %] nach Baualtersklassen. [46]	4
2.3	Flächenspezifischer Transmissionswärmeverlust H'_t nach Baujahr und Gebäudeart. [4]	9
2.4	Anteil der Gebäudetypen Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Mehrfamilienhäuser mit nachträglicher Dämmung der Bauteile Außenwand, Dach/Obergeschossdecke und Fußboden/Kellerdecke [4]	11
3.1	Schematischer Ablauf des Optimierungsprogrammes	18

Tabellenverzeichnis

2.1 Übersicht über verschiedene Förder- und Anreizprogramme zur energetischen Verbesserung von Wohngebäuden	12
3.1 Übersicht diverser Ansätze der Energiesystemoptimierung in der Literatur	17
3.2 U-Werte der Gebäudehülle für ein EnEV-Referenzgebäude nach EnEV 2009.	21
3.3 Anlagentechnik und Maßnahmen der energetischen Ertüchtigung der Gebäudehülle sowie deren Nutzungsdauer im Optimierungsmodell	22
3.4 Leistungsspezifische Emission der Energieträger [26]	22
3.5 Kategorien der Einflussfaktoren zum Fensteröffnen/-schließen [19]	26
3.6 Triebkräfte zum Öffnen und Schließen eines Fensters [10]	27
3.7 Numerische Werte der Fitkoeffizienten nach Maas [32]	28
3.8 Berechnungsansätze zur Bestimmung des Luftvolumenstroms durch ein geöffnetes Fenster	30
3.9 Richtwerte für Luftdichtheit von Gebäuden bei einer Druckprüfung mit 50 Pa Druckdifferenz nach DIN V 4108-6	31
3.10 Literaturwerte der Rückwärmezahl in Wärmetauschern	33
4.1 U-Werte der neuen Gebäudeklassen Cluster A und Cluster B in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$	37
A.1 Anzahl an Wohneinheiten [in Tausend] nach Baualtersklasse und Gebäudetyp. [15] .	48
A.2 Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile Dach, Außenwand, Fenster (U_w) und Boden nach Gebäudeart und Baualtersklasse [in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$]	49
A.3 Bestand an Fenstern in Deutschland im Jahr 2015. [4]	50
A.4	50
A.5 Ausprägungen der Inputparameter Gebäudealter und -lage	51
A.6 y-Achsenabschnitt und Steigung der Kostenkennlinie sowie Nutzungsdauer der Bauteile Außenwand, Boden, Dach und Fenster [24]	51
A.7 Nutzungsdauer und Betriebskosten verschiedener Technologien	52
A.8 Mindest- und Maximalluftwechsel durch Infiltration nach DIN 1946-6 und DIN 4108-7	52

Vorwort

1 Einleitung

1.1 Motivation

das ist die einleitung

1.2 Aufgabenstellung

das ist die aufgabenstellung

2 Grundlagen

Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung optimierter Gebäudeenergiesysteme für den deutschen Wohngebäudebestand. Hierzu wird in Kapitel 2.1 der Bestand analysiert, um auf dieser Untersuchung aufbauend die nationale Wohngebäudesituation in einigen wenigen, repräsentativen Klassen abzubilden. Des Weiteren wird in 2.2 die historische Entwicklung der Gebäudehülle im Neubaulzustand betrachtet und in 2.3 die Abweichungen des Neubaulzustandes durch Sanierung erläutert. Daraus werden Zeiträume der Baualtersklassen mit ähnlichen Baustoffen und Dämmdicken zusammengefasst. Kapitel 2.4 stellt Förderprogramme zum Anreiz energetischer Sanierung vor. Weiterhin werden in Kapitel 3.1 und 3.2 Arten der mathematischen Optimierung sowie das im Rahmen dieser Arbeit erweiterte Optimierungsprogramm vorgestellt und in Kapitel 3.3 die Grundlagen der Lüftungswärmeverlusten in Wohngebäuden.

2.1 Deutscher Wohngebäudebestand

Zunächst wird der Wohngebäudebestand hinsichtlich Alter und Größe ausgewertet. Als Daten werden die Statistiken des Zensus2011, einer nationalen statistischen Erhebung von privaten Haushalten, betrachtet. Besagte Statistiken werden in verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen des Instituts für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) ausgewertet und evaluiert. Weiterhin werden für die gebäudetypischen Kennwerte die Typgebäude des europaweiten Projekts „Typology Approach for Building Stock Energy Assessment“ (TABULA) berücksichtigt. Die nationalen Daten Deutschlands werden durch das IWU erhoben und berechnet.

Nach den 2011 veröffentlichten Zensus Daten besteht der deutsche Wohngebäudebestand aus rund 18.368.000 Gebäuden mit 39.432.000 Wohnungen [1]. Wie in Abbildung 2.1 zu erkennen ist, prägt den deutschen Wohngebäudebestand einen Boom in der Nachkriegszeit. So wurden in den Jahren von 1949 bis 1978 etwa 7,2 Millionen Häuser errichtet. Diese Klasse allein bildet 38 % der deutschen Wohngebäude ab. Mit circa 2,7 Millionen Gebäuden und einem Anteil von etwa 14 % bilden die vor 1919 fertiggestellten Wohnobjekte den zweitgrößten Anteil, sowie die Häuser mit Baualter zwischen 1919 und 1948 mit knapp 12 % die drittgrößte Gruppe. Folglich sind knapp zwei Drittel der deutschen Wohngebäude vor 1978 erbaut worden. Eine weitere relevante Klasse beschreiben mit fast 10 % die von 1979 bis 1986 geschaffenen Wohnbauten. Zusammen mit den drei Klassen 1987 - 1990, 1991 - 1995 und 1996 - 2000 werden durch diese vier Gruppen mehr als ein Viertel des Wohngebäudebestandes in Deutschland abgebildet. Im Gegensatz zu den zuvor

genannten Gruppen stellen die nach der Jahrtausendwende konstruierten Häuser mit unter 10 % und nur 1,6 Millionen Häusern einen relativ kleinen Anteil des nationalen Bestandes dar.

Es sei noch zu erwähnen, dass in dieser Betrachtung den Mikrozensus-Klassen gefolgt wird. Diese sind explizit keine gleich langen Zeitintervalle, sondern „orientieren sich an historischen Einschnitten, den Zeitpunkten statistischer Erhebungen und den Veränderungen der wärmetechnisch relevanten Bauvorschriften“ [1]. So beschreibt beispielsweise das relativ kurze Zeitintervall von 1979 bis 1983 den Zeitraum zwischen erster und zweiter Wärmeschutzverordnung, auf welche in Kapitel 2.2 noch näher eingegangen wird.

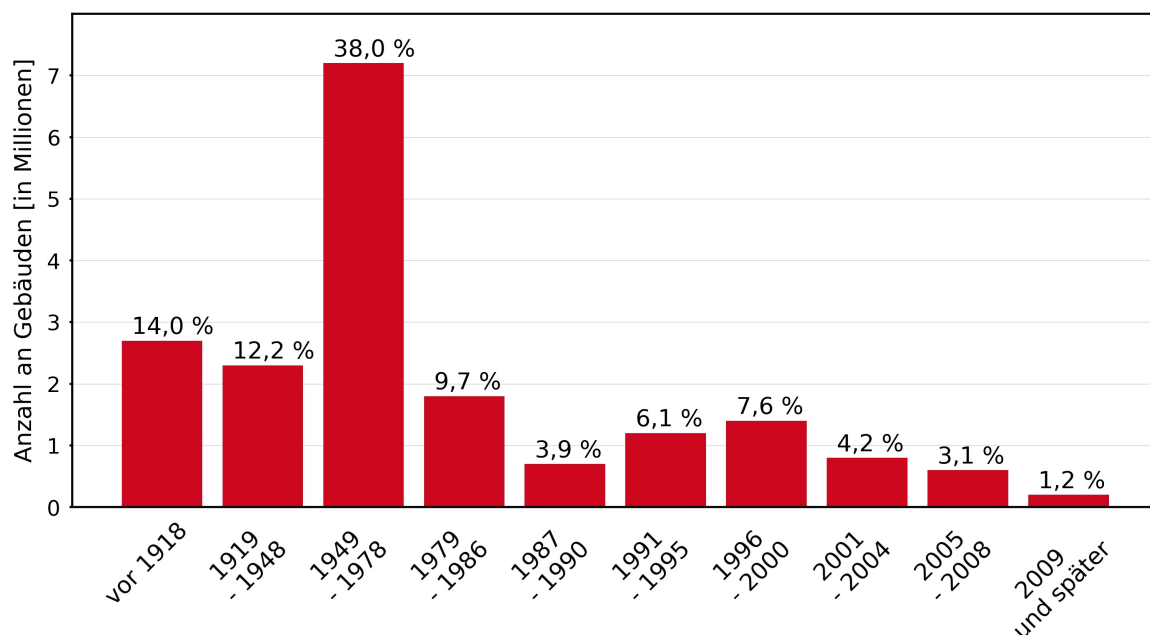


Abbildung 2.1: errichtete Wohngebäude nach Mikrozensus-Klassen sowie deren Anteil am Gebäudebestand [in %]. [45]

Eine weitere Unterteilung des Wohngebäudebestandes erhält man bei der Betrachtung der Anzahl an Wohneinheiten im Gebäude. Hierbei setzt sich der Bestand zu zwei Dritteln aus Wohngebäuden mit nur einer Wohnung zusammen. Weitere 17 % bilden Gebäude mit zwei Wohnungen, während die Gebäudeklasse mit 3 - 6 Wohnungen mit 12 % vertreten ist. Die größeren Gebäude mit 7 - 12 Wohnungen sowie mit 13 und mehr Wohnungen sind anteilig am Gebäudebestand mit jeweils 5 % und 1 % relativ kleine Gruppen. Allerdings gelten letztere nur bei einer Gebäudebetrachtung als weniger relevant, da sie bei einer Anschauung der Wohneinheiten logischerweise mit größeren Faktoren im Vergleich zu Einfamilienhäusern einhergehen. [46]

In Abbildung 2.2 sind die Anzahl der Wohneinheiten für die drei Baualtersklassen älter als 1978, 1979 - 1994 und 1995 - 2009 sowie deren Anteil an allen Wohneinheiten bis Baujahr 2009 des Ge-

bäudebestandes dargestellt. In Anlehnung an den vorherigen Abschnitt werden Gebäude mit bis zu 2 Wohnungen als Ein- und Zweifamilienhäuser zusammengefasst und nach der englischen Bezeichnung „single family home“ mit SFH abgekürzt. Wohngebäude mit 3 oder mehr Wohnungen werden als Mehrfamilienhäuser mit der Abkürzung MFH für „multy family home“ gebündelt.

Auffallend ist wiederum der enorme Anteil der Gebäude mit Baualter älter als 1978. Hier zählen die Mehrfamilienhäusern mit 14,8 Millionen Wohnungen und einem Anteil aller bis 2009 errichteten Wohneinheiten von 38 % zur größten Gruppe. Mit 12,5 Millionen Wohnungen und einem Anteil von 32 % entfällt die zweitgrößte Klasse auf die Einfamilienhäuser mit Baujahr älter 1978. Ähnlich wie zuvor bei der Gebäudebetrachtung wurden somit auch mehr als zwei Drittel aller Wohnungen vor 1978 erbaut.

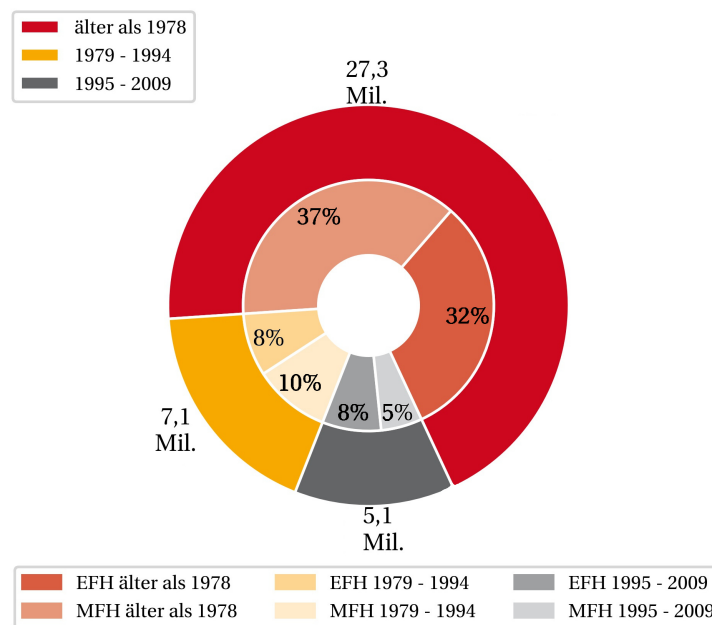


Abbildung 2.2: Anzahl an Wohneinheiten bei Einfamilienhäuser (SFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) sowie deren relativer Anteil [in %] nach Baualtersklassen. [46]

Eine detailliertere Gliederung der Gebäudetypen ist in Tabelle A.1 zu finden. Hier wurden die Anzahl der Wohneinheiten nach Baualtersklasse und Gebäudetyp eingeteilt. Zu den zuvor beschriebenen Ein- und Mehrfamilienhäusern sind in der Tabelle außerdem die Klassen der Reihenhäuser, großen Mehrfamilienhäuser sowie Hochhäuser zu ermitteln. Weiter lassen sich die Anzahl der Wohnungen für diverse Gebäudearten in neuen Bundesländern ablesen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Punkte bei der statistischen Betrachtung des deutschen Gebäudebestandes festhalten:

- ▷ 2/3 aller Gebäude und Wohnungen des Bestandes wurden vor der 1. Wärmeschutzverordnung 1978 errichtet.
- ▷ Bei einer Betrachtung der Wohneinheiten halbiert sich der Bestand in Gebäude mit einer oder zwei Wohnungen (47 %) und drei oder mehr Wohnungen (53 %).
- ▷ Gebäude, die nach der Jahrtausendwende gebaut wurden, bilden keinen signifikanten Anteil des Bestandes.

2.2 Historische Entwicklung der Gebäudehülle

Nachdem das vorherige Kapitel den Gebäudebestand nach Alter und Größe beschreibt, werden nun die zu den jeweiligen Gebäudealtern zugehörigen Baustoffe und Dämmeigenschaften vorgestellt. Hierzu wird zwischen der Isolierung verschiedener Gebäudebauteilen, die im Kontakt mit der Umgebung oder einem unbeheizten Raum stehen, unterschieden. Neben Möglichkeiten zur Dämmung des Daches beziehungsweise der obersten Geschossdecke und der Außenwand werden zudem die Dämmung des Bodens betrachtet. Weiterhin wird auf den Verglasungsstandard verschiedener Epochen eingegangen.

Ein wichtiger Kennwert zur energetischen Bewertung eines Gebäudes und einzelner Gebäudekomponenten beschreibt der U-Wert. Hierbei handelt es sich um den Wärmeübergangskoeffizienten, welcher den Wärmestrom durch 1 m² Bauteilfläche bei 1 K Temperaturdifferenz beschreibt. Berechnet wird dieser als Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstand R_T . Der U-Wert ist definiert als

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{in} \quad \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.1)$$

wobei mit

$$R_T = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (2.2)$$

der Wärmedurchgangswiderstand als Verhältnis der Dämmstoffdicke d_i einer Dämmschicht i und der Wärmeleitfähigkeit λ_i des Baustoffes der Schicht i beschrieben wird.

Für transparente Bauteile und somit explizit für Fenster variiert die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_w :

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f} \quad \text{in} \quad \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.3)$$

Hierbei beschreiben A_f den Flächenanteil des Fensterrahmens und A_g die Glasfläche. Ferner sind U_g und U_f die Wärmeübergangskoeffizienten der Verglasung (Index g) und des Fensterrahmens (Index f). Außerdem werden Wärmebrückenbildungen des Glasrandverbundes mit der Multiplikation des ψ -Wertes mit der Gesamtumfangsfläche der Verglasung l_g berücksichtigt. [30]

Aus den Definitionen der U-Werte und des Wärmedurchgangswiderstandes lässt sich leicht erkennen, dass die Transmissionswärmeverluste eines Gebäudes stark von der Dicke und den Dämmeigenschaften des Dämmmaterials abhängen. Hierbei lassen sich historische Unterscheidungen treffen.

Die drei TABULA-Klassen vor 1918, 1919 - 1948 sowie 1949 - 1957 umfassen die Epochen der Gründerzeit, der Zwischenkriegszeit, den beiden Weltkriegen sowie der Nachkriegszeit. Wie in Kapitel 2.1 bereits dargelegt, prägen die Nachkriegsjahre einen schnellen Wiederaufbau, in dem vor allem mit Trümmern neue Gebäude errichtet wurde. Auch in dem Zeitraum vor 1918 kam es im Rahmen der Ausdehnung der Städte zu zahlreichen neuen Konstruktionen. Aus Tabelle A.2 lässt sich erkennen, dass sich die Wärmeübergangskoeffizienten für die Gebäudetypen der Einfamilien- und Mehrfamilienhaus in diesen Jahren jeweils stark ähneln. Dies ergibt sich auch aus der Darstellung der Geschichte des Dämmstandards von Eicke-Henning. Hier wird festgehalten, dass sich bis zum Jahr 1957 die Dämmindustrie und der Hochbau im Rahmen der Industrialisierung zwar weiterentwickelte, es allerdings dennoch keinen Wandel im Hinblick auf Wärmeschutz gab. So wurde bevorzugt günstig gebaut und die damit verbunden erhöhten Heizkosten in Kauf genommen oder durch niedrige Raumtemperaturen kompensiert. Die im Jahr 1952 eingeführte DIN 4108 verkörperte zwar den ersten Ansatz Wärmeschutz normativ zu regulieren, jedoch konnte sie zu keiner Veränderung der energetischen Bauweise führen. Trotz deren Name „Wärmeschutz im Hochbau“ beinhaltet die Norm nur einen Mindestwärmeschutz zur Vermeidung bauphysikalischer Schäden durch Schimmelbildung. Als Standard dieser Jahre galt das 38 cm dicke Vollziegel-Mauerwerk, Böden und Dächer ohne Dämmung sowie die Einscheiben-Verglasung. [17]

In den folgenden Jahren von 1958 - 1968 sowie 1969 - 1978 kam es zu keinen normativen Änderungen des Wärmeschutzes. Dennoch kann durch einen Wandel der Baustoffwahl eine Verbesserung der U-Werte beobachtet werden. So verschwand der Vollziegel langsam vom Markt und wurde durch Hochlochziegeln oder Hohlblocksteinen substituiert. Weiter wurden vermehrt Trittschalldämmungen in Böden und Dächer installiert. Trotz deren primären Zweckes der Lärmvermeidung erzielten diese dünnen Dämmschichten von 1 - 4 cm Dämmstärke eine Verbesserung der Wärmedurchgangskoeffizienten der zuvor genannten Bauteile. Ab 1965 erreichten vorgefertigte Betonteile mit einem 3 - 6 cm dicken Dämmkern zudem einen besseren Wärmeschutz. Bezüglich der Fenster wurde in diesen Jahren keine Veränderung geschaffen, sodass weiterhin die Einscheiben-Verglasung die Konvention bildete. [17]

Nach der Ölkrise von 1974 rückte die Bedeutung des ressourcenschonenden Bauens beziehungsweise Betriebes von Gebäuden in den Vordergrund. Der Gesetzgeber verabschiedete am 11. August 1977 mit der 1. Wärmeschutzverordnung, im Folgenden mit WschV abgekürzt, erstmalig eine Verordnung, in der ein Standard zur Minimierung des Heizwärmebedarfs festgelegt wurde. In Folge der 1. WschV verbesserte sich die Dämmeigenschaften der Bauten mit Baujahr 1979 - 1983. So lässt sich bei den TABULA Einfamilienhäuser dieser Jahrgänge feststellen, dass sowohl das Dach

eine 8 cm als auch der Boden eine 4 cm dicke Dämmschicht besitzen. Dadurch konnten U-Werte von $0,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ für das Dach sowie $0,65 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ für den Boden erreicht werden (s. Tabelle A.2). Weiterhin wurde durch die Verordnung vorgeschrieben, dass „außenliegende Fenster und Fenstertüren von beheizten Räumen (...) mindestens mit Isolier- und Doppelverglasung auszuführen (sind)“ [7]. Somit ermöglichte die 1. WschV eine Verbesserung des energetischen Standards der Wohngebäuden. Allerdings stellten die ersten normativen Anforderungen an die Gebäudehülle aus heutiger Sicht nur einen Zwischenschritt hin zu einem energetisch sinnvollen Reglement dar. Als Beispiel hierfür ist die Anforderung an Fenster zu nennen. Für diese wurde in der 1. WschV festgelegt, dass ein U-Wert von $3,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ nicht überschritten werden darf [7]. Nach heutigem Standard der Energieeinsparverordnung 2016, die im Folgenden noch weiter erläutert wird, sind für die Fenster im Neubau U_w -Werte kleiner $1,3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ einzuhalten. Bei diesem Vergleich ist auch noch festzuhalten, dass es sich bei der Vorgabe zum U-Wert der 1. WschV um den U_g -Wert handelt, der nur den Wärmedurchgang durch die Verglasung beschreibt und somit im Gegensatz zu U_w weder den Wärmeübergang durch den Rahmen noch die Wärmebrückenbildung beachtet. Daher liegt der von TABULA ermittelte U_w -Wert für das Einfamilien-Typgebäudenfenster der Jahre 1979 - 1983 aufgrund dessen energetisch schlechten Metallrahmens mit $4,3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ höher als der U_g -Normwert der 1. WschV. [17]

Einen weiteren Schritt hin zu einem besseren Wärmeschutz des Gebäudebestandes markiert die 1982 beschlossene und 1984 in Kraft getretene 2. WschV, die sich auf den Wärmeschutz der Gebäude mit Baujahr 1984 - 1994 auswirkte. Nach Eicke-Henning kann sich „das Niveau von 1984 (...) mit 2-Scheiben-Isolierverglasung, 30 cm dicken porositäten Außenwänden (...), 8-9 cm Wärmedämmung im Dach und 4 cm Kellerdämmung beschreiben (lassen)“ [17]. Wie sich aus Tabelle A.2 lesen lässt, führten die Maßnahmen der 2. WschV zu einem durchgehend besseren Verhalten der Bauteile gegenüber Transmissionswärmeverlusten. Im Bezug auf die Anforderung der Fensterflächen ergab sich zwar eine Verbesserung im Vergleich zur 1. WschV auf $U_{g,max} = 3,1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, allerdings blieb die im vorangegangenen Abschnitt diskutierte Problematik des U_g -Wertes erhalten. Des Weiteren definierte die 2. WschV Anforderungen an „Bauliche Änderungen bestehender Gebäude“. Daraus folgte, dass bei Gebäudeerweiterungen oder Umbaumaßnahmen das betroffene Bauteil den geforderten energetischen Neubaustandard erfüllen musste.

Einen Paradigmenwechsel des Wärmeschutzes kennzeichnet die 3. Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden von 1995. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Verordnungen begrenzte die 3. WschV nicht nur die U-Werte der Bestandteile der Gebäudehülle, sondern beschränkte zudem den Jahres-Heizwärmebedarf. Als Folge der neuen Verordnung erhielten die Bauteile im Vergleich zur 2. WschV 4 - 6 cm mehr Dämmdicke. Außerdem wurde durch die erhöhten Anforderungen an die Verglasung die Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung der Neubaustandard. Aufgrund dieser Maßnahmen konnten die U-Werte der Gebäude mit Baujahr 1995 - 2001 signifikant gesenkt werden. Besonders die bessere Verglasung mit wärmetech-nisch besseren Rahmen erzielte eine Verbesserung des U_g -Wertes von $3 - 3,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ auf $1,9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Die zum 01. Februar 2002 in Kraft getretene Energieeinsparverordnung (EnEV) legte die zuvor genannte 3. WschV sowie die Heizungsanlagenverordnung zusammen. Somit wurden alle Anforderungen an den Energieverbrauch eines Gebäudes in einer Verordnung gebündelt. Anstelle der Begrenzung des Jahres-Heizwärmebedarfes, wie im Abschnitt zuvor, wurde der Jahres-Primärenergiebedarf sowie der flächenspezifische Transmissionswärmeverlust (H'_{t}) limitiert. Obwohl nicht explizit strengere Regulationen an die Gebäudehülle formuliert wurden, konnte durch die Restriktion von H'_{t} ein Absinken der Wärmedurchgangskoeffizienten aufgrund dickerer Dämmstärken erzielt werden. Nach Tabelle A.2 sank der U-Wert des Zeitraumes 2002 - 2009 für alle Komponenten der Gebäudehülle im Rahmen der EnEV 2002. Außerdem setzte die Verordnung striktere Anforderungen an den Altbaubestand. So mussten vor dem 01.10.1978 eingebaute Heizkessel mit flüssigem oder gasförmigen Brennstoff ersetzt werden, ungedämmte und zugängliche Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen nachgedämmt werden sowie nicht begehbar, zugängliche oberste Geschossdecken auf einen U-Wert von $0,3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ gedämmt werden.

Auf die EnEV 2002 folgten 2004 sowie 2007 Novellierungen. Diese stellten keine Verschärfung der energetischen Anforderungen nach EnEV 2002 dar, sondern galten der Beseitigung juristischer Problematiken sowie der Einführung des Energieausweises für Bestandsgebäude [48]. Eine solche Verschärfung wurde hingegen durch die EnEV 2009 vollzogen. Zum einen wurde die Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarfes umgestaltet. Das Berechnungsverfahren nach EnEV 2009 bestimmt einen flächenspezifischen Höchstwert des Jahres-Primärenergiebedarfes, welcher durch ein Referenzgebäude gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung kalkuliert wird. Die U-Werte der Referenzgebäudeberechnung wurden für die TABULA-Typgebäude der Baujahre 2010 - 2015 übernommen und sind in Tabelle A.2 zu finden. Zum anderen wurden die Grenzwerte $H'_{t,max}$ in weniger Kategorien im Vergleich zur EnEV 2002 unterteilt und verschärft.

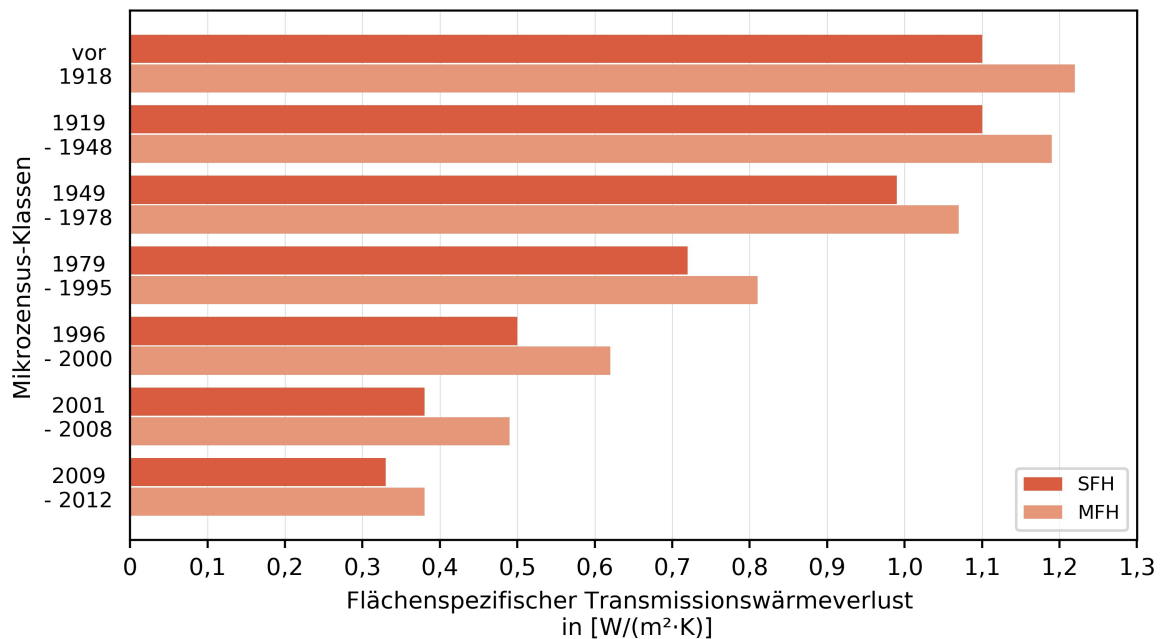


Abbildung 2.3: Flächenspezifischer Transmissionswärmeverlust H'_t nach Baujahr und Gebäudeart. [4]

Abbildung 2.3 zeigt den flächenspezifischen Transmissionswärmeverlust der Gebäudetypen Einfamilien- sowie Mehrfamilienhaus für verschiedene Baujahre. Zu erkennen ist zum einen, dass die Werte der größeren Gebäude immer über denen der Einfamilienhäuser liegen und zum anderen die kontinuierliche Verbesserung im Zuge der energetisch günstigeren Gestaltung der Wohngebäude. Weiterhin ist festzustellen, dass durch die Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnungen der letzten 40 Jahre die flächenspezifische Transmissionswärmeverluste der Neubauten im Vergleich zu einem Altbau um fast 75 % gesunken sind.

Zu Tabelle A.2 ist anzumerken, dass sich auf den Zustand der Bauteile im damaligen Neubau bezogen wird. Einzige Ausnahme hierbei bilden die Fenster der Zeiträume bis 1978. Für diese charakterisiert die Einscheiben-Verglasung den Einbau-Zustand. In Kapitel 2.4 wird der Rückgang dieser Fensterart näher erläutert.

2.3 Sanierungsstand des deutschen Wohngebäudebestandes

In dem vorangegangenen Abschnitt wird die Entwicklung der Gebäudehülle vorgestellt. Hierbei wird sich auf den Neubauzustand bei Fertigstellung des Gebäudes bezogen. Dieses Kapitel soll nun die Veränderung des Gebäudebestandes durch energetische Sanierung veranschaulichen.

Abbildung 2.4 zeigt den Anteil der durch nachträgliche Wärmedämmung sanierten Bauteilflächen

nach Bauteilen und Gebäudeart. Zu erkennen ist der große Anteil an sanierter Dachfläche beziehungsweise obere Geschossdeckenfläche. Dieser liegt für Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser annähernd gleich bei etwa 57 %. Folglich wurden mehr als die Hälfte der Dachflächen im Altbau nachträglich gedämmt. Einen leichten Unterschied zwischen den Gebäudearten ist bei den nachträglich sanierten Außenwänden zu beobachten. Bei diesem Bauteil wurden bei den größeren Gebäuden etwas mehr als 31 % mit einer besseren Dämmung versehen, wohingegen es bei den Einfamilienhäusern nur etwa ein Viertel waren. Deutlich weniger Relevanz bei der nachträglichen Dämmung erhielt die Isolierung der Grundplatte beziehungsweise der Kellerdecke. Für diese Bauteile wurden bei beiden Gebäudearten nur circa 10 % mit einem besseren Wärmeschutz versehen.

In Abbildung 2.4 fehlen die Angaben zum Sanierungsstand der Fenster. Hierfür ist die Datenlage der Sanierung schwierig, allerdings bietet das IWU eine Schätzung über den Bestand an Fenstern im Jahre 2015 [4]. Tabelle A.3 gibt verschiedene Verglasungsarten mit deren U_g -Werten sowie Anzahl und Anteil am gesamten Fensterbestand in Deutschland wieder. Wie in Gleichung 2.3 dargestellt, beschreibt der U_g -Wert den Wärmedurchgang durch die Verglasung ohne Berücksichtigung des Fensterrahmens oder der Wärmebrückenbildung.

Obwohl die Einfachverglasung für einen großen Teil des Altbaues den Neubaustandard darstellt, ist deren Anteil am Fensterbestand mit nur noch 3 % sehr gering. Der heutige Bestand der Fenster wird durch unbeschichtetes Isolierglas sowie dem Zweischeiben-Wärmedämmglas dominiert, welche mit 34 % und 47 % vertreten sind. Weiterhin ist zu erkennen, dass das Dreischeiben-Wärmeglas bereits 8 % des Fensterbestandes bereitstellt, obwohl dieses erst 10 Jahren vor Erhebung der Daten auf den Markt kam.

Nachträgliche Wärmedämmung im Bestand nach Bauteilen und Gebäudeart.

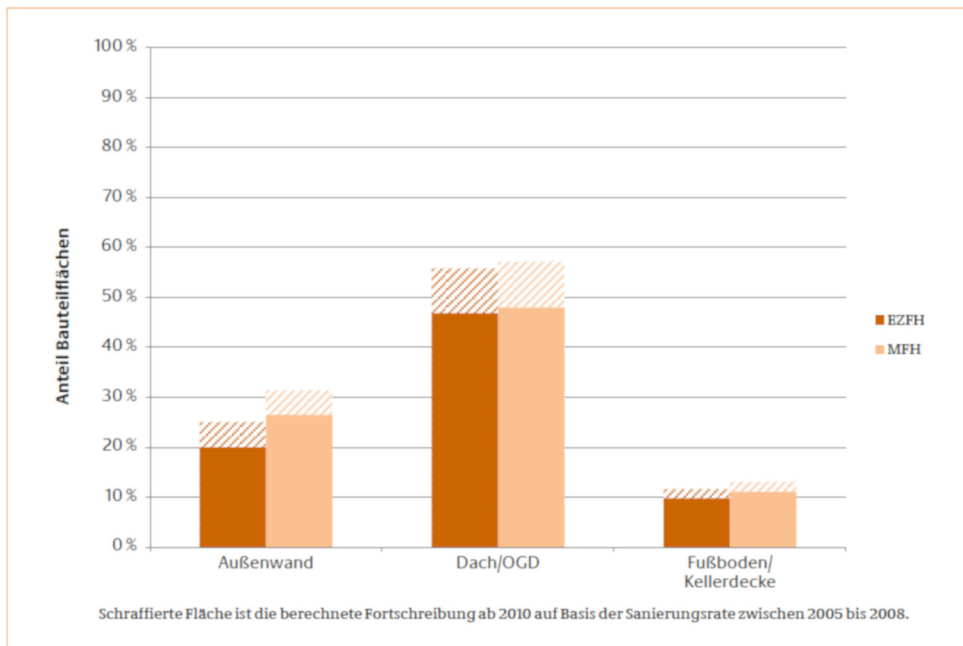


Abbildung 2.4: Anteil der Gebäudetypen Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Mehrfamilienhäuser mit nachträglicher Dämmung der Bauteile Außenwand, Dach/Obergeschossdecke und Fußboden/Kellerdecke [4]

2.4 Förderprogramme zur energetischen Sanierung

In Kapitel 2.2 werden diverse Verordnungen zum besseren Wärmeschutz des deutschen Gebäudebestandes beschrieben. Diese verkörpern Anforderungen an den Neubau oder an Einzelsanierungsmaßnahmen und nur wenige Forderungen richten sich an den Gebäudebestand. Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der energetischen Sanierungsmaßnahmen unterstützt die Bundesregierung Gebäudeeigentümer finanziell bei Maßnahmen zur Steigerung des Wärmeschutzes.

Als Beispiel eines erfolgreichen Anreizprogramms sei der flächendeckende Austausch der Einfachverglasung genannt. Im Rahmen des Energiespar-Förderprogrammes investierte die Bundesregierung ab 1977 4,35 Milliarden Deutsche Mark zur Erneuerung von Heizungen und Fenstern [18]. Dadurch konnte ein Anreiz zur energetischen Sanierung geschaffen werden. Dies stellt mitunter einen Grund dafür dar, dass der Anteil der Einfachverglasung in deutschen Wohngebäuden heute nur etwa 3 % beträgt (s. Tabelle A.3).

Es existieren verschiedene Fördermöglichkeiten, welche die Energieeffizienz der Heizungstechnik, den Einsatz erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung und die energetische Ertüchtigung der Gebäudehülle subventionieren. Die Auszahlung der öffentlichen Gelder erfolgt größtenteils durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und das Kreditinstitut für Wie-

deraufbau (KfW). Letztere hat im Jahr 2018 insgesamt 12 Milliarden Euro an Krediten und Zuschüssen im Bereich der Energiewende für circa 220.000 Anträge an Privatkunden vergeben [29]. Tabelle 2.1 listet einige Förder- und Anreizprogramme mit den zu fördernden Technologien beziehungsweise Maßnahmen auf.

Programmbezeichnung	Fördertyp	Geförderte Technologie/ Maßnahme
Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)	Einspeisevergütung	Photovoltaik
Kraft-Wärme-Kopplung-Gesetz (KWKG)	Einspeise-/Eigenverbrauch- vergütung	BHKWs
Mini-KWK-Zuschuss (durch BAFA)	Investitionszuschuss	BHKWs
Anreizprogramm Energieeffizienz (APEE)	Investitionszuschuss	Wärmepumpen Solarthermie Pelletkessel
KfW-Programm 430	Investitionszuschuss	Sanierung von einzelnen Bauteilen oder KfW-Effizienzhausstandard

Tabelle 2.1: Übersicht über verschiedene Förder- und Anreizprogramme zur energetischen Verbesserung von Wohngebäuden

3 Stand der Technik

3.1 Arten der Optimierung

Die vorliegende Arbeit zielt auf die Bestimmung von energetischen Sanierungsmaßnahmen ab, welche für den deutschen Wohngebäudebestand möglichst kosteneffizient die CO_2 -Emission reduziert. Hierbei werden neben verschiedenen Möglichkeiten der Energiebereitstellung auch die energetische Qualität verschiedener Komponenten der Gebäudehülle betrachtet. Dadurch ergibt sich eine hohe Anzahl an möglichen Kombinationsmöglichkeiten der Maßnahmen und Technologien. Um aus dieser Komplexität ein Optimum zu bestimmen, ist es sinnvoll, ein rechnergestütztes Optimierungsprogramm als Werkzeug zu nutzen.

Eine Optimierung wird immer durch ein Ziel charakterisiert. In einem mathematischen Sinne wird dieses als Zielfunktion beschrieben, welches es zu minimieren oder maximieren gilt. Durch Rahmenbedingungen, auch Nebenbedingungen oder Restriktionen genannt, wird die Menge der zulässigen Lösungen beschränkt. Dieser Lösungsraum wird durch Gleichungen oder Ungleichungen formuliert. Sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen werden durch Variablen abgebildet. Diese können anschaulich als Stellschrauben beschrieben werden.[41]

Zusammenfassend kann eine Optimierung als das Lösen einer Zielfunktion in einem von Restriktionen beschränkten Lösungsraum durch eine Kombination von Variablen umschrieben werden.

Im Folgenden stellt dieses Kapitel verschiedene Arten der Energiesystemoptimierung sowie diverse Beispiele an Optimierungsprogramme aus der Literatur vor, um letztlich das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Programm in 3.2 zu beschreiben.

Zur Einteilung von Optimierungsprogrammen existieren verschiedene Möglichkeiten. Bei der Betrachtung der zu Grunde liegenden Variablen erhält man eine Unterteilung. Hierbei werden die Programme in einer mathematischen Anschauung danach unterteilt, aus welchem Raum die Variablen entstammen. So wird zwischen diskreten und kontinuierlichen Variablen unterschieden. Die diskreten entstammen dem Raum der ganzen Zahlen \mathbb{Z} und umfassen unter anderem Binärvariablen. Letztere sind die Menge aus $[0; 1]$ und werden im Rahmen der Energiesystemoptimierung oft als Option der Kaufentscheidung von Energiesystemen oder Schaltzustände der Anlagentechnik genutzt. Dabei beschreibt 0 einen ausgeschalteten, beziehungsweise nicht gekauften Zustand und 1 den eingeschalteten/gekauften. Neben den diskreten Variablen werden auch kontinuierliche in Optimierungsprogrammen genutzt. Diese sind als reelle Zahlen \mathbb{R} definiert und beschreiben beispielsweise Kapazitäten, Heizbedarfe oder Wärmeverluste. Werden in einem Programm

diskrete und kontinuierliche Variablen gemischt, so spricht man von einer gemischt-ganzzahligen Optimierung. [41]

Neben den Variablen stellt die Art der Funktionen eine weitere Unterscheidung der Optimierungsprogramme dar. Bestehen die Restriktionen und die Zielfunktion eines Programmes einzig und allein aus linearen Zusammenhängen, so wird von einem linearen Programm (LP) gesprochen. Dem gegenüber werden solche Optimierungen, welche auch Nichtlinearitäten abbilden, als nicht-lineare Programme (NLP) bezeichnet. Oftmals findet man in der Realität nicht-lineare Zusammenhänge, welche mit NLP gut modelliert werden können. Als ein Beispiel aus der Gebäudeenergiesystemoptimierung sei hier das Teillastverhalten von Wärmeerzeugern genannt. Jedoch stellt das Lösen von nicht-linearen Gleichungen einen erhöhten Rechenaufwand dar, welcher mit einer deutlich längeren Rechendauer einhergeht. Somit kann durch die Linearisierung von nicht-linearen Zusammenhängen Rechenzeit zu Kosten von Genauigkeit eingespart werden. Die gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung wird aufgrund ihrer englischen Bezeichnung („Mixed Integer Linear Programing“) mit MILP abgekürzt, die nicht-lineare analog mit MINLP. [40]

In der Literatur werden verschiedene Ansätze und Modelle für die Optimierung von Energiesystemen verfolgt. Diese werden durch die betrachtete Gebäude- oder Quartiersebene, der Zielfunktion, den zu Grunde liegenden Energiesystemen und der Betrachtung von Auslegungs- oder Betriebsoptimierung des Systems charakterisiert

Iturriaga et al. [27] erarbeiten ein allgemeines Modell zur Auslegung von Energiesysteme auf Gebäudeebene. Dieses soll alle derzeit verfügbaren Technologien der Wärme-, Kälte- und Elektrizitätsbereitstellung abbilden können. Hierzu werden die Anlagen unterteilt in solche, welche hohe, mittlere und niedrige Temperaturen erzeugen, Kältemaschinen und elektrische Module. Thermische und elektrische Energie kann zwischen den jeweiligen Energiebereitstellungstechnologien ausgetauscht werden, um letztlich den Wärme-, Kälte- und Elektrizitätsbedarf des Gebäudes zu decken. Weiterhin berücksichtigt das Modell neben der Energieerzeugung auch Speicher und Interaktionen mit anderen Gebäuden durch Nah-, Fernwärme- sowie Stromnetze. Das Modell wird anhand eines Beispielgebäudes im nordspanischen Bilbao getestet. Hierbei werden 13 verschiedenen Technologien der Wärme- und Elektrizitätserzeugung in Betracht gezogen. Diese umfassen neben Organic-Rankine-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoren-Blockheizkraftwerke (BHKW) auch verschiedene solarthermische Anlagen (CPC, Vakuumröhrenkollektoren, Flachkollektoren), Biomasse-, Gas- und Brennwertkessel, Luft-Wasser-Wärmepumpen (WP) und diverse Photovoltaik-Anlagen (PV) (amorphe, mono- und polykristalline Solarmodule). Die stückweise Linearisierung des nicht-linearen Teillastverhaltens der Anlagen führt zu rein linearen Gleichungen und somit zu einem MILP Problem. Als Zielfunktion ist die Minimierung der annualisierten Kosten definiert. Diese setzen sich aus Investitionen, jährlichen variablen Kosten, Energiebezugskosten sowie Gewinnen aus dem Verkauf an überschüssiger Wärme, Kälte oder Elektrizität zusammen. Als Restriktionen der Optimierung sind technologische Nebenbedingungen der Anlagentechnik,

die Bedarfserfüllung des Gebäudes, gebäudespezifische Rahmenbedingungen sowie die möglichen Ausprägungen der Variablen aufgeführt.

In [38] wird ein Modell von Pinzon et al. zur Optimierung der jährlichen Elektrizitätskosten unter Berücksichtigung der Behaglichkeit der Bewohner vorgestellt. Die Berechnung dieser Kosten berücksichtigt den Strombedarf zu Heiz- oder Kühlzwecken, zur Beleuchtung sowie Ersparnisse aus PV. Weiter existiert die Option erzeugten Strom, Wärme oder Kälte in einem Energiespeicher (ES) zu lagern. Wie in Iturriaga et al. [27] werden nicht-lineare Gleichungen durch stückweise Linearisierung in lineare gewandelt. Dadurch handelt es sich bei dem Programm von Pinzon et al. um ein betriebsoptimierendes MILP Problem. Als Zielfunktion ist die Minimierung des Strombedarfes und somit der Stromkosten beschrieben. Der Bedarf setzt sich aus dem Verbrauch der zuvor genannten Komponenten zusammen. Als Nebenbedingungen werden die Nutzung der PV-Anlagen, des ES, des Klimageräts und der Beleuchtung sowie die Einhaltung des thermischen Komforts definiert. Bei letzterem werden auch die Wärmeträgheit des Luftvolumens im Raum, sowie der Wärmeverlust durch den Infiltrationsluftvolumenstrom, also durch Undichtheiten in der Gebäudehülle, berücksichtigt.

In Risbeck et al. [39] wird der optimale Betrieb von Lüftungssystemen zum Kühlen und Wärmen in kommerziellen Gebäuden, also Nichtwohngebäuden, untersucht. Hierzu werden diskrete Variablen zum Modellieren des An- und Abschaltens der Komponenten sowie kontinuierliche zur Abbildung der Lasten und Speicherstände genutzt. Als Zielfunktion werden minimale Betriebskosten bei Einhaltung des thermischen Komforts im Gebäude formuliert. Auch Risbeck et al. wandeln nicht-lineare Geräteverhalten durch stückweise Linearisierung in lineare um und modellieren somit ein MILP. Dadurch wird die Rechenzeit verkürzt und das Programm kann in Echtzeit auf Preisänderungen, Bedarfsschwankungen und Wetteränderungen eingehen. Als Nebenbedingungen der Optimierungsaufgabe werden neben der Temperierung verschiedener Gebäudezonen auch die optimale Nutzung der zur Verfügung stehenden Speicher beachtet.

Zhu et al. stellen in [50] eine multikriterielle Energiesystemoptimierung vor. Hierbei werden thermische und elektrische Speicher zur optimalen Kapazitätsauslegung untersucht und als übergeordnetes Modell definiert. Weiter wird hierfür der Betrieb der Energieerzeuger optimiert, was das untergeordnete Modell umschreibt. Zur Deckung des Wärme- und Elektrizitätsbedarfs werden eine Sole-WP, PV und Strombezug aus dem Netz modelliert. Die Energiespeicherung erfolgt durch einen sensiblen Wasserspeicher und eine Batterie. Ein Teil der nicht-linearen Gleichungen werden linearisiert. Da jedoch weiterhin nicht-lineare Zusammenhänge in dem Programm existieren, handelt es sich bei dem Modell um ein MINLP, welches Energiesysteme auf Gebäudeebene optimiert. Als Zielfunktion des übergeordneten Modells wird die Minimierung der jährlichen Gesamtkosten festgelegt, und als das der untergeordneten Optimierung die jährlichen Betriebskosten der Energieerzeuger.

Eine gleichzeitige Betrachtung von Anlagentechnik und Gebäudehülle ist in Asadi et al. zu finden

[2]. Hierbei handelt es sich zum einen um ein MINLP und zum anderen um eine multikriterielle Optimierung, bei welcher dem Programm mehrere Zielfunktionen übergeben werden. Das Modell betrachtet neben Dämmarten und -stärke der Außenwand und des Dachs auch den Fenstertyp sowie Solarkollektoren. Hierzu wird für jedes Bauteil zwischen unterschiedlichen Sanierungsszenarien unterschieden. Weiter wird der Energiebedarf des Gebäudes vereinfacht als Summe des Wärme-, Kälte- und Warmwasserbedarfes berechnet. Ziel des Programmes ist die Bestimmung des kosten- und emissionsoptimalen Energiesystems.

In [49] modellieren Wouters et al. Haushalte, die auf Quartiersebene thermische und elektrische Energie untereinander austauschen können. An Anlagentechnik stehen Brennwertkessel, BHKWs, ES, PV-Anlagen und kleine Windkraftanlagen (WKA) zur Verfügung. Als Zielfunktion ist die Minimierung der Annuität durch optimale Anlagenwahl, -auslegung und -betrieb definiert. Das Programm wird nur mit linearen Gleichungen modelliert, sodass es sich um ein MILP handelt. Weiter werden Einflüsse regulatorischer Maßnahmen untersucht und darauf aufbauend zwei Standorte mit ähnlichen klimatischen Bedingungen in Griechenland und Australien miteinander verglichen.

Das Optimierungsmodell von Harb et al. [23] bestimmt die optimale Anlagenauswahl zur Wärmeerzeugung von Einzelwohngebäuden oder Quartieren. Es werden Mikro-BHKWs, Wärmepumpen, Elektroheizstäbe, PV, thermische Speicher, Kessel sowie Nahwärmenetze in Betracht gezogen. Das MILP von Harb et al. benennt als Ziel die Minimierung der jährlichen Kosten, welche sich aus annualisierten Investitionen, Bedarfskosten sowie den variablen Kosten zusammensetzen. Das Modell von Harb et al. zeichnet aus, dass die Einspeisevergütung von PV-Strom sowie die Förderung von BHKW produzierter Elektrizität in die wirtschaftliche Betrachtung mit einfließen.

Eine simultane Betrachtung der Energieerzeuger und der Gebäudehülle liegt in Schütz et al. [44] vor. Hier werden sowohl der Betrieb als auch die Auslegung des Gebäudeenergiesystems optimiert. Das Programm berücksichtigt neben Energieerzeugern und -speichern wie Kessel, BHKW, Elektroheizstäbe (EHS), WP, Solarthermie, PV und ES auch energetische Ertüchtigungen der Außenwand, der Fenster, des Daches und der Bodenplatte. Als Optimierungsziel kann zwischen Jahreskosten- und Emissionsoptimierung gewählt werden. Weiter besteht die Möglichkeit einer Pareto-Optimierung, bei welcher die nicht gewählte Zielfunktion als Nebenbedingung das Modell beschränkt.

In Tabelle 3.1 sind die zuvor vorgestellten Programme der Energiesystemoptimierung mitsamt ihren charakteristischen Eigenschaften aufgeführt.

Autor	Art der Optimierung	Ebene/ Betrachtung	Energiesysteme	Zielfunktion (Minimierung von...)
Iturriaga et al.	MILP	Gebäude Auslegung	XXXX	Jährliche Kosten
Pinzon et al.	MILP	Gebäude Betrieb	PV, ES, Klimageräte	Jährliche Elektri- zitätskosten
Risbeck et al.	MILP	Gebäude Betrieb	Lüftungssysteme	Jährliche Betriebs- kosten
Zhu et al.	MINLP	Gebäude Auslegung und Betrieb	PV, WP, ES	Jährliche Betriebs- kosten
Asadi et al.	MINLP	Gebäude Auslegung	Sanierung von Wand, Dach, Fenster/ Solarkollektoren	Kosten und Emissionen
Wouters et al.	MILP	Quartier Auslegung und Betrieb	Kessel, BHKW, ES, PV, WKA	Jährliche Kosten
Harb et al.	MILP	Gebäude/ Quartier Auslegung	Mikro-BHKW, WP, EHS, PV, thermische ES, Kessel, Nahwärmenetz	Jährliche Kosten
Schütz et al.	MILP	Gebäude Auslegung und Betrieb	Kessel, BHKW, EHS, WP, Solarthermie, PV, ES/ Sanierung von Wand, Dach, Fenster, Boden	Kosten und/ oder Emissionen

Tabelle 3.1: Übersicht diverser Ansätze der Energiesystemoptimierung in der Literatur

3.2 Referenzmodell als Grundlage dieser Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Programm zur Kosten- oder Emissionsoptimierung von Gebäudeenergiesystemen erweitert. Neben einer Auswahl an Anlagentechniken zur Energiebereitstellung stehen Maßnahmen zur energetischen Ertüchtigung der Gebäudehülle zur Verfügung. Hierbei werden ähnlich wie bei Asadi et al. [2] und Schütz et al. [44] Außenwände, Fenster und Dächer sowie zusätzlich die Grundplatte betrachtet. Die dem Programm zu Grunde liegende Anlagentechnik ist in Tabelle 3.4 aufgeführt. Die Entscheidung für verschiedene Anlagen oder Maßnahmen an der Hülle erfolgt durch diskrete Binärvariablen, wohingegen die Auslegung und

der Betrieb durch kontinuierliche Variablen modelliert wird. Wie in Iturriaga et al. [27], Pinzon et al. [38] und Risbeck et al. [39] erfolgt eine Linearisierung der nicht-linearen Gleichungen, sodass es sich um ein MILP handelt. Die Zielfunktion der Optimierung kann entweder zur Minimierung der annualisierten Kosten oder CO₂-Emissionen gesetzt werden. Des weiteren besteht die Möglichkeit eine Pareto-Optimierung durchzuführen, bei welcher ein Gebäudeenergiesystem unter Berücksichtigung der Kosten- und Emissionsoptimierung ermittelt wird.

Das zu berechnende Gebäude wird eingangs anhand verschiedener Parameter durch den Nutzer beschrieben. Hierzu zählen unter anderem das Baujahr, die Gebäudegröße und der Standort. Anhand dieser Eingabewert greift das Programm auf hinterlegte Daten zu, um weitere Parameter in das Programm mit aufzunehmen. Weiter werden die 365 Tage eines Jahres in einigen wenigen, repräsentativen Typtagen zusammengefasst, um somit die Komplexität des Problems zu reduzieren. Bei dem eigentlichen Optimierungsprozess wird ein Gleichungssystem basierend auf den zuvor gewählten und eingelesenen Parametern zur Minimierung der Zielfunktion gelöst. Nach der Optimierung gibt das Programm Daten zu dem gewählten Energiesystem, den Kosten und den Emission aus, die dann vom Nutzer ausgewertet werden. In Abbildung 3.1 ist der Programmablauf schematisch skizziert.

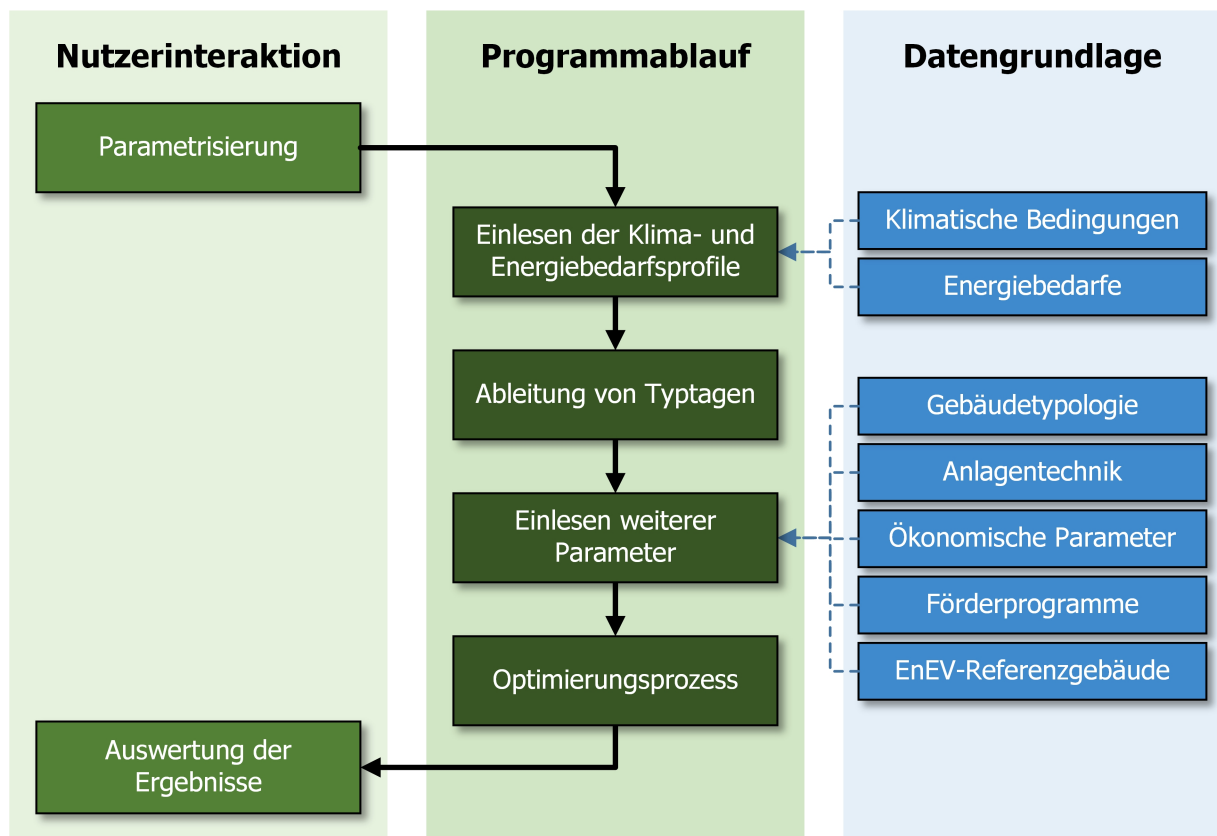


Abbildung 3.1: Schematischer Ablauf des Optimierungsprogrammes

Zunächst erfolgt die Parametrisierung des Gebäudes durch den Nutzer. Hier werden Gebäudetyp, -alter und -lage sowie Wohnungsanzahl, Wohnfläche je Wohnung, Haushaltsgröße und qualitative Angaben zum Strom- und Trinkwarmwasserbedarfs definiert. In Bezug auf den Gebäudetyp stehen die TABULA-Klassen Einfamilien-, Reihen-, Mehrfamilienhaus und Apartment-Block zur Wahl. Auch die Baualtersklassen basieren auf TABULA-Unterteilungen und gliedern sich in 12 Klassen im Zeitraum von 1860 bis 2010. Bei der Gebäudelage stehen dem Nutzer 15 verschiedene Standorte aus verschiedenen Klimaregionen Deutschlands zur Auswahl. Eine Übersicht über die möglichen Ausprägungen der Inputparameter Gebäudealter und -lage ist Tabelle A.5 zu entnehmen. [31]

Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, startet in einem nächsten Schritt der Programmablauf mit dem Einlesen der Klima- und Energiebedarfsprofile. Auf Basis der übergebenen Angaben wird auf eine Datengrundlage zurückgegriffen. So werden anhand des Gebäudestandortes entsprechend jährliche Klimaprofile genutzt. Diese entsprechen dem Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes, welches für den Betrachtungszeitraum von 1981 bis 2010 einen repräsentativen Witterungsverlauf beschreibt [12]. Neben einem Umgebungstemperaturverlauf liefern die Profile solare Einstrahlungen und sind stündlich, also in 8760 Zeitpunkte, aufgeteilt. Weiter werden Strom- und Trinkwarmwasserbedarfsprofile sowie Profile der internen Gewinne eingelesen. Im Falle der Einfamilien- und Reihenhäuser hängen diese von der Haushaltsgröße ab und bei den Mehrfamilienhäusern sowie Apartment-Blocks von der Wohnungsanzahl. Außerdem bedingen die Angaben zur Höhe des Strom- und Trinkwarmwasserbedarfes die Auswahl der Profile. Die eingelesenen Verläufe basieren auf stochastischen erzeugten Profilen des deutschen Stromspiegels und bilden Grundlasten sowie Lastspitzen ab [11]. Wie bei den Klimaprofilen sind auch diese als stündliche Werte über ein Jahr aufgetragen.

Da eine Optimierung über jede Stunde eines Jahres mit einem großen Rechenaufwand einhergeht, erfolgt anhand der eingelesenen Profile eine Ableitung von Typtagen. An Tagen mit vergleichbaren Witterungsverläufen ähneln sich die Energiebedarfsprofile, sodass diese im Rahmen des Programmes mit Hilfe eines Clusteringvorgangs zusammengefasst werden [16]. Um einerseits saisonale Effekte abzubilden und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten und andererseits die Rechenzeit des Programmes zu verkürzen, werden die 8760 Stunden eines Jahres in 8 Typtagen mit 192 Zeitpunkten zusammengefasst. Diese besitzen wiederum Gewichtungen, welche in Summe 365 Tage und somit ein Jahr ergeben.

Neben den bereits erläuterten Klima- und Energiebedarfsprofilen wird als nächster Vorgang des Programmablaufes weitere Parameter eingelesen. So werden für die Bauteile der Gebäudehülle U-Werte für drei Sanierungsszenarien in das Modell mit aufgenommen. Bei diesen handelt es sich um den Standard-Zustand des parametrisierten Gebäudes im Bestand („standard“), einer Aufrüstung auf den Standard nach EnEV 2014 („retrofit“) und einer energetischen Nachrüstung nach heutigem Passivhaus-Standard („advanced retrofit“) [1]. Zudem werden Faktoren zur Dimensio-

nierung der Fenster-, Dach-, Boden- und Außenwandfläche eingelesen.

Schließlich werden auch ökonomische Faktoren zur Bestimmung des Preises einer Sanierungsmaßnahme in das Programm mit aufgenommen. Hierbei werden die Investitionen der Gebäudehüllenbestandteile als lineare Funktion ausgedrückt. Außer bei den Fenstern berechnen sich diese Kosten anhand der zusätzlichen Dämmdicke im Zuge des Sanierungsszenario. Im Falle der Verglasung wird die lineare Funktion anstelle der Dämmstärke in Abhängigkeit der Verbesserung des U-Wertes aufgestellt. Die Werte für den y-Achsenabschnitt und die Steigung der linearen Funktionen für die einzelnen Bauteile basieren auf Berechnungen des IWU [24] und sind in Tabelle A.6 aufgeführt. Zusätzlich sind in dieser Tabelle Angaben zu der Nutzungsdauer der Komponenten zu finden, welche aus derselben Quelle entstammen. Diese werden für die Berechnung der annualisierten Kosten benötigt.

Mit den bisher beschriebenen Daten lassen sich die Bedarfe des Gebäudes bestimmen. Zur Deckung dieser werden verschiedene Energieerzeuger und -speicher zu dem Modell hinzugefügt. Die Dimensionierung der jeweiligen Technologien erfolgt kontinuierlich. Um die Investition der Anlagen zu berechnen, existieren Installationskosten mit einer Unterscheidung zwischen Einfamilien- oder Mehrfamilienhaus. Zudem werden die Steigung und der y-Achsenabschnitt einer linearen Funktion zur Preiskalkulation an das Programm übergeben oder anhand von empirischen Herstellerangaben generiert. Tabelle 3.4 führt die verschiedenen Technologien, welche im Modell Beachtung finden, auf.

Weiter werden betriebswirtschaftliche Parameter eingelesen. Hierbei werden neben allgemeinen Faktoren wie dem Betrachtungszeitraum, der Mehrwertsteuer, dem internen Zinssatz und der Inflationsrate auch energieträgerspezifische Kennwerte übergeben. Bei letzteren handelt es sich zum einen um Preisänderungsfaktoren, welche zukünftige Preisänderungen der Energieträger abbilden und zum anderen um Einspeisevergütung von PV- oder BHKW-Strom und um die Energiesteuer. In Tabelle A.8 sind die Parameter mit ihren jeweiligen Werten aufgeführt.

Außerdem werden Daten zur Modellierung von Förderprogrammen, welche die Verbesserung des Gebäudeenergiesystems subventionieren, mitaufgenommen. Die Fördergelder beeinflussen die Wirtschaftlichkeit verschiedener Technologien und energetischen Sanierungsmaßnahmen. Daher werden die leistungsabhängigen Förderhöhen mit in das Modell aufgenommen. Ferner gibt es für alle Programme Bedingungen, welche für eine Auszahlung erfüllt sein müssen und monetäre Grenzen, in denen sich die Fördersumme minimal und maximal bewegt. Einen Überblick über die Förderkonditionen und -grenzen werden in Tabelle XXXX dargelegt.

Um die Förderungen im Rahmen des KfW-Effizienzhaus-Programms zu erhalten, wird die Sanierungsmaßnahme mit einem EnEV-Referenzgebäude verglichen. Das Referenzgebäude wird mit derselben Geometrie wie die des parametrisierten Gebäudes ausgeführt, die Gebäudehülle besitzt allerdings eine energetische Qualität nach EnEV-Vorgaben. Die U-Werte der jeweiligen Bauteile nach EnEV sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Bauteil	U-Werte [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]
Außenwand	0,28
Boden	0,35
Dach	0,20
Fenster	1,30

Tabelle 3.2: U-Werte der Gebäudehülle für ein EnEV-Referenzgebäude nach EnEV 2009.

Wie aus dem schematischen Ablauf in Abbildung 3.1 zu erkennen ist, folgt nach dem Einlesen aller zuvor erläuterten Parameter der eigentliche Optimierungsprozess. Als Zielfunktion des Optimierungsprogrammes kann zwischen der Minimierung der annualisierten Kosten oder der CO₂-Emissionen ausgewählt werden. Die Kosten setzen sich zusammen aus Investitionen durch die Anschaffung der Anlagentechnik und Ertüchtigung der Gebäudehülle (C_{Inv}), den Wartungs- und Instandhaltungskosten der Anlagen (C_{Var}), den Kosten aus dem Bedarf an Elektrizität und Brennstoffen (C_{Bedarf}), den Fixkosten durch Strom- und Gasbezug (C_{Fix}) sowie den Gewinnen aus dem Verkauf von Strom ($R_{Erlös}$) und die Zuschüsse aus Förderprogrammen (R_{Subv}).

$$C_{total} = \sum C_{Inv} + \sum C_{Var} + \sum C_{Bedarf} + \sum C_{Fix} - \sum R_{Erlös} - \sum R_{Subv} \quad (3.1)$$

Die Berechnung der Investitionen unterscheidet sich leicht zwischen Energieerzeugern und Hüllensanierung. Es sei zu erwähnen, dass das Standard-Szenario den Bestandszustand beschreibt und somit nicht mit Kosten verbunden ist. Letztlich wird in allen Fällen eine totale Investitionssumme berechnet und unter Beachtung der jeweiligen Nutzungsdauer, dem internen Zinssatz und der Inflationsrate annualisiert. Wie in Tabelle 3.4 zu sehen, unterscheiden sich die Nutzungsdauern der Technologien und der Sanierungsszenarien der Gebäudehülle. Übersteigt die Nutzungsdauer der Komponente den Betrachtungszeitraum der Kalkulation, wird ein Restwert gebildet und dieser annualisiert. Im Falle einer geringeren Nutzungsdauer als dem Betrachtungszeitraum berechnet das Programm eine Ersatzinvestition. Somit ergeben sich auf Basis der unterschiedlichen Nutzungsdauern für keine Technologie oder Sanierungsmaßnahme einen Vorteil gegenüber einer Alternativen.

Die betriebsgebundenen Kosten für Wartung und Instandhaltung werden anteilig aus den Investitionen bestimmt und mit einem Faktor zur Inflationsbereinigung multipliziert.

Zur Bestimmung der bedarfsspezifischen Kosten wird die Summe aus verschiedenen Energiequellen gebildet. Jeder Summand besteht hierfür aus dem Bedarf des Energieträgers multipliziert mit den leistungsspezifischen Kosten, dem Preisänderungsfaktor der Bezugsgröße und dem Faktor zur Annualisierung der Kosten. Eine Ausnahme bilden die BHKWs, da bei diesen der Gaspreis um die Energiesteuer reduziert wird. Dies ist eine Folge der Förderung durch das KWK-Gesetz.

Im Falle der Fixkosten liest das Programm Grundpreise für die Nutzung von Gas und Strom ein. Für Erdgas betragen diese 138 $\frac{\text{€}}{\text{a}}$ und für den Strombezug 73 $\frac{\text{€}}{\text{a}}$.

Technologie Sanierungsmaßnahme	Nutzungsdauer in Jahren	Technologie Sanierungsmaßnahme	Nutzungsdauer in Jahren
Brennwertkessel	20	Solarthermie	20
Luft-Wärmepumpe	18	PV	20
Sole-Wärmepumpe	20	Thermischer Speicher	20
Pelletkessel	20	Batteriespeicher	15
BHKW	15	Elektroheizstab	20
Außenwand	50	Dach	50
Fenster	50	Bodenplatte	50

Tabelle 3.3: Anlagentechnik und Maßnahmen der energetischen Ertüchtigung der Gebäudehülle sowie deren Nutzungsdauer im Optimierungsmodell

Die Emission kann als Summe der CO₂-Freisetzung beschrieben werden, die durch den Bedarf an Brennstoffen entstehen. Somit setzt sich die Berechnung der Emission aus der Verbrennung von Holz-Pellets (E_{Pellet}), Gas (E_{Gas}) und dem Emissionswert des Stromes aus Netzbezug (E_{Netz}) zusammen.

$$E_{total} = E_{Pellet} + E_{Gas} + E_{Netz} \quad (3.2)$$

Die jeweiligen Summanden ergeben sich als Produkt aus dem Bedarf der Bezugsgröße und der leistungsspezifischen Emission der Emissionsquelle. In Tabelle 3.4 sind die Werte für die Energiequellen Holz-Pellets, Gas und Strom aufgeführt.

Energiequelle	CO ₂ -Emission in [$\frac{kg_{CO_2}}{kWh}$]
Holz-Pellets	0,025
Gas	0,25
Strom	0,566

Tabelle 3.4: Leistungsspezifische Emission der Energieträger [26]

Die Kombinationsmöglichkeiten zur Erfüllung der Zielfunktionen wird durch den Lösungsraum, welcher durch Restriktionen definiert wird, beschränkt. So wird beispielsweise die Anzahl der PV-Module durch die zur Verfügung stehende Dachfläche limitiert. Eine zentrale Nebenbedingung stellt die Berechnung der Heizlast dar. Diese beschreibt die Wärmemenge, welche durch die Anlagentechnik bereitgestellt werden muss, um das Gebäude auf die Innentemperatur in Höhe von 20 °C zu heizen. Als Berechnungsgrundlage dient die DIN V 4108. Diese definiert den Jahres-Heizenergiebedarf (Q) als Summe des Jahres-Heizwärmebedarfs (Q_h), des Jahreswärmebedarfs zur

Warmwasseraufbereitung (Q_W und den Wärmeverlusten der Anlagentechnik zur Wärme- und Warmwasserbereitstellung (Q_t abzüglich der Energiemenge, welche aus regenerativen Quellen gewonnen wird (Q_r).

$$Q = Q_h + Q_W + Q_t - Q_r \quad (3.3)$$

Diese definiert die Norm-Heizlast $\Phi_{HL,build}$ als Summe der Transmissionswärmeverlusten Φ_T , Lüftungswärmeverlusten $\Phi_{V,build}$, der Aufheizleistung Φ_{hu} und abzüglich der internen Gewinne Φ_{gain} .

$$\Phi_{HL,build} = \Phi_T + \Phi_{V,build} + \Phi_{hu} - \Phi_{gain} \quad (3.4)$$

Die internen Gewinne werden aufgeteilt in solare Gewinne aus Sonneneinstrahlung und internen Wärmequellen wie beispielsweise Küchengeräte oder anwesenden Personen. Diese werden durch eingeleseene Profile bestimmt und sind somit für das parametrisierte Gebäude für einen Zeitabschnitt konstant. Da das Modell keine Gebäudemasse abbildet, kann die Aufheizleistung nicht berechnet werden. Laut Norm ist Φ_{hu} optional und wird somit vernachlässigt.

Die Transmissionswärmeverluste Φ_T beschreiben Wärmeverluste aufgrund des Wärmeüberganges an der Gebäudehülle und lassen sich als Produkt der Temperaturdifferenz zwischen der Innen- ($\theta_{int,i}$) und Außentemperatur (θ_e) mit dem Transmissionswärmetransferkoeffizienten (H_t) bestimmen und sind in Gleichung 3.5 wiedergegeben. Zur Berechnung von H_t werden die Bauteilfläche (A_k), der U-Wert (U_k) und der Temperaturkorrekturfaktor ($f_{U,k}$) für jedes Bauteil k multipliziert und die Summe der Produkte gebildet. Außerdem werden Wärmebrücken mit dem zusätzlichen Wärmedurchgangskoeffizient (ΔU_{TB}) berücksichtigt. Die Formel zur Berechnung von H_t ist in 3.6 zu finden.

$$\Phi_T = H_t \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) \quad (3.5)$$

$$H_t = \sum_k A_k \cdot (U_k + \Delta U_{TB}) \cdot f_{U,k} \quad \text{mit } k \in \{\text{Außenwand, Boden, Fenster, Dach}\} \quad (3.6)$$

Hierbei wird ΔU_{TB} laut Norm vereinfacht mit $0,05 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ angenommen. Der Temperaturkorrekturfaktor berücksichtigt einen Unterschied zwischen Innentemperatur und Außentemperatur. Da in dem Programm keine Unterscheidung der Raumnutzung erfolgt, gibt es nur im Falle des Bodens aufgrund des Kontakts mit dem Erdreich einen solchen Unterschied. Daher wird $f_{U,Boden}$ nach Norm mit 0,6 bestimmt. Die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten der Sanierungsszenarien werden durch Multiplikation mit einer binären Entscheidungsvariablen ($x_{k,i}$) in das Programm mit aufgenommen, wobei $k \in \{\text{Außenwand, Boden, Dach, Fenster}\}$ und $i \in \{\text{standard, retrofit, advanced retrofit}\}$.

$$H_t = \sum_k \sum_i A_k \cdot (U_k + \Delta U_{TB}) \cdot f_{U,k} \cdot x_{k,i} \quad (3.7)$$

Im Falle $x_{k,i} = 1$, wird das Szenario gekauft und die Transmissionswärmeverluste werden gesenkt. Analog hierzu entspricht $x_{k,i} = 0$ einer Ablehnung für das Bauteil k das Szenario i zu kaufen. Logischerweise können je Gebäudehüllenkomponente nicht mehr als eine Sanierungsmaßnahme

vorgenommen werden, sodass das Modell durch die Nebenbedingung

$$\sum_i x_{k,i} = 1 \quad \text{mit } i \in \{\text{standard, retrofit, advanced retrofit}\} \quad (3.8)$$

beschränkt wird.

Schließlich wird die Heizlast auch durch die Lüftungswärmeverluste beeinflusst. Eine wichtige Kenngröße der Lüftungswärmeverluste stellt die Luftwechselrate (n) dar. Diese beschreibt, wie oft pro Stunde das Volumen einer Zone durch Frischluft ausgetauscht wird. Die Luftwechselrate ist definiert als

$$n = \frac{\dot{V}_{Luft}}{V_Z} \cdot 3600 \quad , \quad (3.9)$$

wobei \dot{V}_{Luft} den eintretenden Luftvolumenstrom und V_Z das Volumen der Zone beschreibt.

Die Lüftungswärmeverluste werden in dem Optimierungsprogramm durch das Heizperiodenverfahren in DIN V 4108-6 [13] modelliert. Hierzu wird laut Norm von einer Luftwechselrate für ein nicht-luftdichtheitsgeprüftes Gebäude von $n = 0,7 \text{ h}^{-1}$ ausgegangen. Des Weiteren wird das Nettovolumen (V) in der Norm als 0,76-fachen des Brutto-Volumens (V_e) bestimmt. Somit ergibt sich mit der Wärmekapazität der Luft ($c_{p,Luft}$) und der Luftdichte (ρ_{Luft}) die spezifische Lüftungswärmeverluste (H_V) zu

$$H_V = 0,76 \cdot V_e \cdot \rho_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot n \quad . \quad (3.10)$$

Zuletzt wird durch Berücksichtigung des Korrekturfaktor aufgrund von Nachtabschaltung der Heizung (f_{NA}) und des Gradtagzahlfaktor (G_t) die jährlichen Lüftungswärmeverluste zu

$$\Phi_{V,build} = H_V \cdot G_t \cdot f_{NA} \cdot 0,024 \quad (3.11)$$

berechnet. Hierbei ist 0,024 der Umrechnungsfaktor von Tag zu Stunde und Kilowatt zu Watt.

Diese jährliche Energiemenge der Lüftungswärmeverluste wird gleichmäßig auf die 8760 betrachteten Zeitpunkte des Jahres aufgeteilt.

$$Q_l = \frac{\Phi_{V,build}}{8760} \quad (3.12)$$

Somit sind diese Verluste in dem Modell für jeden betrachteten Zeitpunkt konstant und werden als statisch angesehen.

3.3 Lüftungswärmeverluste in Wohngebäuden

Lüftungswärmeverluste entstehen durch den Austausch von warmer Raumluft mit kälterer Außenluft. Man unterscheidet hierbei zwischen maschineller und natürlicher Lüftung [33]. Bei der natürlichen kann weiterhin zwischen Infiltration und Fensterlüftung unterschieden werden. Somit sind die Verluste vom Nutzerverhalten, der Dichtheit der Gebäudehülle und dem Lüftungskonzept abhängig. Je nach Ausprägung dieser Faktoren stellen die Lüftungswärmeverluste zwischen 20 bis 70 % der Gesamtwärmeverluste eines Gebäudes. Den niedrigen Wert findet man im Altbau. Durch die schlechte energetische Qualität der Hülle weicht hier zwar viel Luft durch Fugen und kleine Öffnungen, wodurch der Infiltrationsluftvolumenstrom hoch ist, allerdings dominieren die Transmissionswärmeverluste aufgrund der schlechten Dämmeigenschaften der Hüllenteile. Analog hierzu liegt der relative Anteil der Lüftungs- an den Gesamtwärmeverlusten in solchen Gebäuden höher, welche durch gute Isolationseigenschaften der Gebäudehülle geringe Transmissionswärmeverluste besitzen. In diesen Fällen steigt der Anteil der Lüftungswärmeverlusten an den Gesamtwärmeverlusten des Gebäudes auf 50 bis 70 % [35]. So beispielsweise in Niedrigenergiehäusern oder Altbauten mit energetisch ertüchtigter Gebäudehülle. [6]

XXXX Grafik: Lüftung im Wohngebäude XXXX

Den Lüftungswärmeverlusten stehen hygienische Aspekte und die Luftqualität gegenüber. Einerseits muss in einem Gebäude ein Luftaustausch geschehen um Luftfeuchtigkeit und Kohlenstoffdioxid aus den Räumen abzutransportieren. Andererseits steigen mit zunehmendem Luftaustausch die Wärmeverluste, wodurch ökologisch und ökonomisch nachteilig mehr geheizt werden muss.

Einen Ansatz zur Bestimmung der Lüftungswärmeverluste bietet die DIN EN 12831 [14]. Hier werden diese Verluste des Gebäudes ($\Phi_{V,build}$) in z Zonen aufgeteilt.

$$\Phi_{V,build} = \sum_z \langle \Phi_{V,z} \rangle \quad (3.13)$$

Die Zonen umfassen jeweils beheizte Räume (i), womit sich die Lüftungswärmeverluste der Zone (z) zu

$$\Phi_{V,z} = \rho_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot \sum_i \langle f_{i-z} \cdot q_{v,min,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) \rangle \quad (3.14)$$

berechnen lassen. Hier fließen neben der Luftdichte (ρ_{Luft}), der spezifischen Wärmekapazität der Luft ($c_{p,Luft}$) und der Temperaturdifferenz zwischen Innen- ($\theta_{int,i}$) und Außentemperatur (θ_e) auch der Mindest-Luftvolumenstrom des Raums i ($q_{v,min,i}$) und das Verhältnis zwischen dem Mindestwert des Luftvolumenstroms und des sich ergebenden Luftvolumenstroms ($f_i - z$) ein. Das Produkt aus $q_{v,min,i}$ und $f_i - z$ ergibt somit den eintretenden Luftvolumenstrom. Wird das Gebäude als eine Zone modelliert, erhält man mit q_V als Produkt von $q_{v,min,i}$ und $f_i - z$

$$\Phi_V = \rho_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot q_V \cdot (\theta_{int} - \theta_e) \quad . \quad (3.15)$$

Dies entspricht einer Energiebilanz um die Gebäudehülle, bei welcher der eintretende Volumenstrom dem austretenden entspricht.

Zur Berechnung des eintretenden Luftvolumenstroms q_V wird dieser in Fensterluftvolumenstrom ($q_{V,Fenster}$), Infiltrationsluftvolumenstrom ($q_{V,Inf}$) und maschineller Lüftungsvolumenstrom ($q_{V,Maschinell}$) aufgeteilt. Somit ergibt sich q_V zu

$$q_V = q_{V,Fenster} + q_{V,Inf} + q_{V,Maschinell} \quad (3.16)$$

Im Folgenden werden die jeweiligen Komponenten mitsamt ihrer Berechnungsansätzen in der Literatur vorgestellt.

3.3.1 Fensterlüftung

Durch das Öffnen eines Fensters kann ein Bewohner direkt Einfluss auf die Qualität der Raumluft ausüben. Somit stellt das Nutzerverhalten einen wichtigen Faktor bezüglich der Lüftungswärmeverluste durch die Fenster dar. Gründe für das Fensteröffnen sind in Fabi et al. [19] wiedergegeben. Hier erfolgt eine Unterscheidung der ausschlaggebenden Faktoren in die Kategorien „Physische Umweltfaktoren“, „Kontextabhängige Faktoren“, „Psychologische Faktoren“, „Physiologische Faktoren“ und „Soziale Faktoren“. Beispiele für die einzelnen Faktoren sind in Tabelle 3.5 dargestellt.

Einflussfaktoren	Beispiele
Physische Umweltfaktoren	Temperatur
	Luftfeuchte
	Lärm
Kontextabhängige Faktoren	Dämmstärke der Gebäudehülle
	Fassadenorientierung
	Heizsystem
Psychologische Faktoren	Thermischer Komfort
	Sicherheit
	Ökologisches und ökonomisches Bewusstsein
Physiologische Faktoren	Alter
	Geschlecht
	Gesundheit
Soziale Faktoren	Interaktionen zwischen Bewohnern
	Kollektive Präferenzen

Tabelle 3.5: Kategorien der Einflussfaktoren zum Fensteröffnen/-schließen [19]

Eine weitere Untersuchung des Nutzerverhaltens im Bezug auf das Öffnen und Schließen von Fenstern ist in Cali et al. [10] beschrieben. Der Unterschied zwischen berechnetem Energiebedarf und gemessenem Energieverbrauch wird unter anderem dem Einfluss der Bewohner auf die Lüftungswärmeverluste zugeschrieben. Die genannte Diskrepanz zwischen Verbrauch und Bedarf wird als Rebound-Effekt bezeichnet und in [21] sowie in [9] näher erläutert. Zur Bewertung von Faktoren, welche das Fensteröffnen oder -schließen durch die Bewohner bestimmen, werden auf umfangreiche Daten eines Forschungsprojekts an drei Mehrfamilienhäusern in Karlsruhe-Rintheim zurückgegriffen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Gebäude und des Daten-Monitorings wird in [8] vorgestellt. Auf Basis der erhobenen Werte aus diesem Projekt bestimmen Cali et al. Triebkräfte, welche dazu führen den Fensterzustand zu ändern. In Tabelle 3.7 sind die Einflussfaktoren für das Schließen und Öffnen eines Fensters aufgeführt. Hierbei sind die Gründe nach Wichtigkeit geordnet und beginnen mit dem am häufigst anzutreffenden.

Triebkraft zum Fensteröffnen	Triebkraft zum Fensterschließen
Tageszeit	Außentemperatur
CO ₂ -Konzentration im Raum	Tageszeit
Raumtemperatur	CO ₂ -Konzentration im Raum
Luftfeuchte im Raum	Raumtemperatur
Außentemperatur	Luftfeuchtigkeit Außen

Tabelle 3.6: Triebkräfte zum Öffnen und Schließen eines Fensters [10]

Aufgrund der zuvor erläuterten Faktoren entscheidet ein Bewohner ein Fenster zu öffnen beziehungsweise zu schließen. Dadurch lässt sich eine Öffnungsdauer ableiten. Weiter wird der einströmende Volumenstrom durch den Öffnungswinkel und die Fenstergeometrie beeinflusst. Aus diesen beiden Faktoren wird die Fensterfläche berechnet, welche effektiv an dem Luftaustausch beteiligt ist.[22]

Außerdem zählen neben dem Nutzereinfluss und der Fenstergeometrie auch die Triebkräfte der Luftbewegung zu wichtigen Faktoren der Fensterlüftung. Zu diesen gehören zum einen die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außen und zum anderen die Windgeschwindigkeit [43]. Durch den Wind entsteht ein Druckgefälle zwischen Innerem des Gebäudes und Umgebung. Aufgrund des Ausgleichs dieses Gefälles kommt es zum Luftaustausch zwischen dem Gebäude und der Umgebung. Analog induziert die Temperaturdifferenz eine Luftbewegung zum Ausgleich des thermischen Unterschiedes. [33]

Oftmals kommt es zu einer Überlagerung dieser beiden Kräfte. Zudem existiert eine Wechselwirkung zwischen den Triebkräften und dem Nutzerverhalten. So besteht beispielsweise bei winterlichen Außentemperaturen eine große Temperaturdifferenz, wodurch der eintretende Volumenstrom größer wird. Gleichzeitig reagiert ein Nutzer mit kurzen Fensteröffnungszeiten aufgrund

der thermischen Unbehaglichkeit.

Zur Bestimmung des Volumenstromes durch ein Fenster existieren verschiedene Ansätze in der Literatur.

Modell nach Maas

Auf Basis von experimentellen Untersuchungen unter realen meteorologischen Bedingungen ermittelt Maas [32] eine Formel zur Berechnung des Luftvolumenstroms durch ein Fenster. Hierbei werden neben der Windgeschwindigkeit (u) und der Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen ($\Delta\theta$) auch die effektive Fensteröffnungsfläche (A_{eff}) beachtet. Letzteres ist abhängig von der Öffnungsweite des Fensters und bildet Turbulenzeffekte ab. Somit ergibt sich nach Maas der Volumenstrom zu

$$q_{V,Fenster} = 3600 \cdot \frac{A_{eff}}{2} \cdot \sqrt{(C_1 \cdot u^2 + C_2 \cdot H \cdot \Delta\theta + C_3)} \quad . \quad (3.17)$$

Hierbei wird A_{eff} halbiert, da sich bei einem geöffneten Fenster der ein- und ausströmender Volumenstrom die Öffnungsfläche des Fensters teilen. Der Faktor 3600 wird zum Umrechnen des sekundlichen Volumenstroms in einen stündlichen genutzt. Die Koeffizienten C_1 , C_2 und C_3 werden experimentell bestimmt und stellen Fitkoeffizienten dar. Ihre numerischen Ausprägungen sind Tabelle 3.7 zu entnehmen.

Größe	Bedeutung	Numerischer Wert	Einheit
C_1	Geschwindigkeitskoeffizient	0,0056	—
C_2	Temperaturkoeffizient	0,0037	$\frac{m}{s^2 \cdot K}$
C_3	Turbulenzkoeffizient	0,012	$\frac{m^2}{s^2}$

Tabelle 3.7: Numerische Werte der Fitkoeffizienten nach Maas [32]

Modell nach Hall

Einen weiteren Ansatz zur Modellierung des Luftvolumenstroms durch ein Fenster liefert Hall [22]. Hierbei werden die Einflüsse des Windes vernachlässigt und nur die Temperaturabhängigkeit des Luftwechsels betrachtet. Zwar bildet der durch Wind induzierte Luftvolumenstrom durch ein Fenster den größeren Anteil des Gesamtvolumenstroms ab, allerdings wird gezielt ein minimaler Volumenstrom ermittelt, der aus bauphysikalischer und hygienischer Sicht sichergestellt werden muss, um Schäden der Bausubstanz zu vermeiden. Zudem wird laut Hall ein Fenster bei zunehmendem Wind schnell geschlossen und es kann weiterhin in der Realität zu Windstille kommen, sodass das Modell keinen unwahrscheinlichen Fall abbildet.

Weiter werden sich auf Kippfenster bezogen und verschiedene Kippwinkel untersucht. Die effektive Fensteröffnungsfläche (A_{eff}) ergibt sich in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der Laibung als die Summe zweier Dreiecke und eines Rechtecks. Das Rechteck beschreibt hierbei die Fläche oberhalb des geöffneten Fensters und die Dreiecke die Seiten.

Ein weiterer Parameter beschreibt die neutrale Höhe (h_n). Diese ist als der Abstand vom Fußpunkt des Fensters zu der Linie, in welcher von einströmender zu ausströmender Luft gewechselt wird, definiert. Das Verhältnis zwischen h_n und Fensterhöhe (H) wird mit Z bezeichnet.

Außerdem berücksichtigt Hall Reibungsverluste mit dem Koeffizienten C_d , welcher durch Messungen bestimmt wird und die Art der Strömung mit dem Strömungsexponenten (n). Letzterer kann Werte zwischen 0,5 und 1 annehmen, wobei 0,5 eine turbulente und 1 eine laminare Strömung beschreibt. Mit der Erdbeschleunigung (g) ergibt sich der einströmende Luftvolumenstrom zu

$$q_{V,Fenster} = C_d \cdot A_{eff} \cdot \left(2 \cdot g \cdot H \cdot Z \cdot \frac{\Delta\theta}{\theta_i} \right)^n . \quad (3.18)$$

Modell nach DIN EN 12831

Ein weiterer Berechnungsansatz zur Bestimmung des Luftvolumenstroms durch ein geöffnetes Fenster bietet die DIN EN 12831 [14]. Hierbei wird nach ein- oder zweiseitiger Lüftung und der Fassadenausrichtung des Fensters unterschieden. Bei zweiseitiger Lüftung wird von zwei sich gegenüber befindenden Fenstern ausgegangen. Unter Vernachlässigung der Fassadenausrichtung ergibt sich der Volumenstrom bei einseitiger Lüftung zu

$$q_{V,open} = \sqrt{q_{V,open,th}^2 + q_{V,open,w}^2} , \quad (3.19)$$

wobei mit Index th der thermisch induzierte und mit Index w der durch Wind verursachte Luftvolumenstrom berücksichtigt wird. Zur Berechnung des thermisch induzierten Anteils wird ein dimensionsloser Durchflusskoeffizient (C_D) zu 0,61 festgelegt. Mit diesem lässt sich $q_{V,open,th}$ durch

$$q_{V,open,th} = \frac{1}{3} \cdot C_D \cdot A_{eff} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot h_m \cdot \Delta\theta}{\theta_e}} \cdot 3600 . \quad (3.20)$$

ausdrücken. Außer dem Faktor h_m , welcher die mittlere Höhe der Fensteröffnung beschreibt, sind alle anderen Parameter bereits bekannt. Für die Gleichung des durch Wind verursachten Volumenstroms wird die Windgeschwindigkeit in Fassadenhöhe (v_{fac}) benötigt. Mit der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe (v_{meteo}), der mittleren Höhe (H_g) und dem Rauheitsparameter (z_0) lässt sich v_{fac} mit

$$v_{fac} = 1,36 \cdot v_{meteo} \cdot \frac{\ln \left\langle \frac{H_g}{z_0} \right\rangle}{\ln \left\langle \frac{80}{z_0} \right\rangle} \quad (3.21)$$

berechnen und somit

$$q_{V,open,w} = 0,05 \cdot A_{eff} \cdot v_{fac} \cdot 3600 \quad . \quad (3.22)$$

Werden Gleichung 3.22 und 3.20 in 3.19 zusammengefasst, wird der einströmende Luftvolumenstrom nach DIN EN 12831 ausgedrückt als

$$q_{V,open} = A_{eff} \cdot 3600 \cdot \sqrt{\frac{C_D^2 \cdot g \cdot h_m \cdot \Delta\theta}{9 \cdot \theta_e} + 0,0025 \cdot v_{fac}^2} \quad . \quad (3.23)$$

Die vorgestellten Berechnungsansätze von Maas, Hall und der DIN EN 12831 sind in Tabelle 3.8 zu finden.

Autor	Formel für $q_{V,open}$	Besonderheit
Maas	$3600 \cdot \frac{A_{eff}}{2} \cdot \sqrt{(C_1 \cdot u^2 + C_2 \cdot H \cdot \Delta\theta + C_3)}$	Ergebnis experimenteller Untersuchungen
Hall	$C_d \cdot A_{eff} \cdot \left(2 \cdot g \cdot H \cdot Z \cdot \frac{\Delta\theta}{\theta_i}\right)^n$	Nur thermisch induzierter Volumenstrom
DIN EN 12831	$A_{eff} \cdot 3600 \cdot \sqrt{\frac{C_D^2 \cdot g \cdot h_m \cdot \Delta\theta}{9 \cdot \theta_e} + 0,0025 \cdot v_{fac}^2}$	Berücksichtigt Temperatur- und Windeinfluss

Tabelle 3.8: Berechnungsansätze zur Bestimmung des Luftvolumenstroms durch ein geöffnetes Fenster

3.3.2 Infiltration

Der unkontrollierte Luftaustausch durch Undichtheiten in der Gebäudehülle wird Infiltration genannt. Die Raumluft kann durch kleine Öffnungen, welche beispielsweise über einen schlecht abgedichteten Fensterrahmen oder über die Verbindung zwischen Dach und Außenwand entstehen, vom Gebäudeinneren an die Umgebung entweichen. Neben den Wärmeverlusten können bei einem hohen Infiltrationsluftwechsel auch Zugerscheinungen und somit Unbehaglichkeiten für die Bewohner auftreten. Weiterhin kann es durch das Auskondensieren der Luftfeuchte beim Übergang durch die Gebäudehülle zu bauphysikalischen Schäden kommen. [42]

Wie bei der Fensterlüftung sind die Triebkräfte der Infiltration durch die Temperaturdifferenz zwischen Gebäudeinnerem und Umgebung sowie durch das von Wind verursachte Druckgefälle charakterisiert. Allerdings kann in diesem Fall keine absolute Öffnungsfläche identifiziert werden, welche an der Infiltration beteiligt ist. Einzig bei großen Undichtheiten können die Fugen vermessen werden. Zur Bestimmung des Infiltrationsluftvolumen wird daher ein *Blower-Door-Test* durchgeführt. Hierbei wird dem zu vermessenden Gebäude durch ein Ventilator Frischluft zugeführt, sodass sich ein Überdruck in dem Gebäude bildet. Alternativ wird auch die Richtung des Ventilators gewechselt, wodurch sich anstatt eines Überdrucks im Gebäude ein Unterdruck bildet

Anhand des zugeführten Volumenstroms kann auf die durch Undichtheiten entweichende Luft Rückschlüsse gezogen werden. Somit wird eine Luftwechselrate bei 50 Pa Über- oder Unterdruck (n_{50}) bestimmt. [42]

Dieser Kennwert gibt Aufschluss über die Dichtheit des Gebäudes und wird durch die DIN 4108-7 [14] von einem wärmeschutztechnischen Blickpunkt aus für Neubauten und energetisch sanierte Altbauten reglementiert. Hierbei wird zwischen Gebäuden mit und ohne installierter raumlufttechnischer Anlage (RLT) unterschieden. Tabelle A.8 gibt die maximalen Norm-Werte $n_{50,max}$ wieder.

Dem Wärmeschutz stehen hygienische und bauphysikalische Anforderungen gegenüber. Nach DIN 1946-6 muss in einem energetisch sanierten Wohngebäude ein nutzerunabhängiger Luftwechsel zum Bautenschutz gewährleistet sein. Diese Norm trifft auf lüftungstechnisch relevante Ertüchtigungen zu. Als solche sind Maßnahmen an den Fenstern und dem Dach definiert. Die minimalen Norm-Werte $n_{50,min}$ sind für verschiedene Gebäudeausführungen in Tabelle A.8 aufgeführt.

Im Gegensatz zu der Lüftung durch Fenster kann aufgrund der schwierigen numerischen Parametrierung der Dichtheit eines Bestandsgebäudes keine analytische Lösung zur Bestimmung des Infiltrationsluftvolumenstroms herangezogen werden. Ebenso sind in der Literatur keine analytischen Lösungsansätze zu finden. Allerdings schlägt Maas [33] einen Richtwerte des durchschnittlich auftretenden Luftwechsels durch Infiltration (n_{Inf}) in Höhe von 0,07 bis 0,7 h^{-1} vor.

Eine Abschätzung des Luftvolumenstroms durch Infiltration für Bestandsgebäude liefert DIN V 4108-6. Hier wird zwischen den Gebäudeklassen der Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie zwischen den drei Dichtheitsklassen *wenig dicht*, *mittel dicht* und *sehr dicht* unterteilt und Angaben zu den n_{50} -Werten gemacht. Die numerischen Ausprägungen sind in Tabelle 3.9 aufgeführt.

Luftdichtheit des Gebäudes	Mehrfamilienhaus	Einfamilienhaus
	n_{50} [h^{-1}]	n_{50} [h^{-1}]
sehr dicht	0,5 bis 2,0	1,0 bis 3,0
mittel dicht	2,0 bis 4,0	3,0 bis 8,0
wenig dicht	4,0 bis 10,0	8,0 bis 20,0

Tabelle 3.9: Richtwerte für Luftdichtheit von Gebäuden bei einer Druckprüfung mit 50 Pa Druckdifferenz nach DIN V 4108-6

Zur Umwandlung des unter Über- oder Unterdruck gemessenen n_{50} -Wertes zur Infiltrationsluftwechselrate wird diese nach DIN 1946-6 mit einem Volumenstromkoeffizienten (e_Z) verrechnet.

Somit ergibt sich der Infiltrationsluftvolumenstrom zu

$$q_{V,Inf} = e_Z \cdot V_{NE} \cdot n_{50} \quad , \quad (3.24)$$

wobei mit V_{NE} das Volumen der Nutzungseinheit bezeichnet wird.

3.3.3 Maschinelle Lüftung

Als maschinelle Lüftung wird ein erzwungener Luftaustausch mit Hilfe eines Ventilator bezeichnet. Diese wird in zentrale und dezentrale Systeme unterteilt. Bei den zentralen wird die Außenluft durch einen Ventilator angesaugt und über Luftschächte in der Wohnung verteilt. Die thermische Behandlung sowie die Luftaufbereitung anhand von Filtern erfolgt über eine einzelne Einheit, durch welche der gesamte Luftvolumenstrom in das Gebäude ein- oder ausströmt. Dahingegen handelt es sich bei den deutlich kleineren dezentralen Anlagen, auch Einzelraum-Lüftungsgerät genannt, um Geräte, die für einen kleinen Bereich des Gebäudes, meist einzelne Räume, die Frischluft zur Verfügung stellt. Oftmals werden daher mehrere Einheiten mit jeweils einer Ausstattung zur Luftbehandlung in ein Gebäude verbaut, um die Frischluftversorgung sicher zu stellen. [24] [5]

Im Gegensatz zu zentralen Anlagen wird für die dezentralen kein Luftleitsystem benötigt, da die Geräte direkt in der Außenwand verbaut sind. Daher eignen sich die Einzelraum-Lüftungsgeräte zur Nachrüstung in Bestandsgebäuden, da auf die kostspielige Baumaßnahme zur Leitungsverlegung verzichtet werden kann [34]. Dies vereinfacht weiterhin die Dauer der Sanierungsmaßnahme und die Raumplanung. Ein Vorteil der zentralen Ausführung ist der geringere Wartungsaufwand, da jede Komponente dieses maschinellen Lüftungskonzepts nur einfach vorliegt und nicht mehrfach wie bei den dezentralen [25].

Im Bezug auf die Betriebsweise der Lüftungsanlage lassen sich kontinuierlich arbeitende von bedarfsgeregelten unterscheiden. Bei letzterem werden verschiedene hygienische Daten der Luft anhand von kontinuierlichen Messungen im Gebäude evaluiert und daraus abgeleitet ein Volumenstrom eingestellt. Dadurch verbessern diese maschinellen Lüftungsanlagen die Raumluftqualität und eignen sich für Haushalte mit Allergikern [20]. Weiter wird der CO_2 -Gehalt in der Luft durch maschinelle Lüftung im Vergleich zur freien Fensterlüftung besser geregelt und kontinuierlich unter dem empfohlenen Höchstwert von 1000 ppm gehalten [47]. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich energetische Vorteile der maschinellen Lüftung betrachtet und hygienische Qualitätsmerkmale im Weiteren nicht näher berücksichtigt.

Zur Minimierung der Lüftungswärmeverluste und zur besseren Nutzung der in der Abluft enthaltene Wärme werden in maschinelle Lüftungsanlagen Wärmetauscher zur Wärmerückgewinnung eingesetzt. Es wird zwischen rekuperativen und regenerativen Verfahren sowie Kombinationen

mit Wärmepumpen unterschieden [28]. Ein wichtiger Kennwert zur Bewertung der Wärmetauscher stellt die Rückwärmezahl (Φ) dar. Diese ist definiert als das Verhältnis der Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Abluft vor und nach dem Wärmetausch. Die Rückwärmezahl wird durch

$$\Phi = \frac{\theta_{12} - \theta_{11}}{\theta_{21} - \theta_{11}} \quad (3.25)$$

beschrieben, wobei mit dem Index *11* die Umgebungstemperatur, mit *21* die Temperatur der Abluft vor dem Wärmetauscher und mit *12* die Zulufttemperatur nach der thermischen Behandlung beschrieben wird [37]. Als Einflussfaktoren der Rückwärmezahl gelten die geförderte Volumenströmung, die Witterungsbedingungen des Standorts sowie die Ausführung des Wärmetauschers [28]. In der Literatur bewegen sich die Angaben zu Φ zwischen 77 und 90 %. In Tabelle 3.10 ist eine Übersicht der Werte für die Rückwärmezahl in verschiedenen Quellen gegeben.

Autor	Rückwärmezahl
Kamendere et al. [28]	minimal: 71 % maximal: 86 % Durchschnitt: 77 %
Milles [35]	75 bis 90 %
Asdrubali et al. [3]	90 %
Bohne [5]	75 bis 90 % für Rotationswärmetauscher

Tabelle 3.10: Literaturwerte der Rückwärmezahl in Wärmetauschern

Wird ein maschinelles Lüftungskonzept in ein Gebäude installiert, muss nach Vorgabe der EnEV der Nutzer eine Möglichkeit zur Beeinflussung des Luftvolumenstroms besitzen. Zudem kann es zu einer Überlagerung der Fensterlüftung mit der maschinellen kommen. Somit kann der Gesamtvolumenstrom, welcher durch die Lüftungsanlage und die Fenster gefördert wird, nur bedingt berechnet werden und es existieren wenig Angaben in der Literatur, welche das Zusammenwirken von natürlicher und maschineller Lüftung charakterisieren. In [36] stellt Osterhage keine Änderung des Nutzerverhaltens nach Einbau einer maschinellen Lüftungsanlage bezüglich der Fensterlüftung im Rahmen des zugrunde liegenden Forschungsprojekts fest. Dies wird mit geringer Akzeptanz und fehlender Sensibilisierung der Bewohner begründet. Dahingegen wird nach Milles [35] in Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen aufgrund der besseren Luftqualität weniger Fenster geöffnet.

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit einer maschinellen Lüftungsanlage wird zwischen der Installation in einem Einfamilienhaus mit einer solchen in einem Mehrfamilienhaus unterschieden. Bei einer Betrachtung der flächenspezifischen Kosten einer Lüftungsanlage kommt den Mehrfamilienhäusern wegen deren kompakten Bauweise ein Nachteil zu Gute. Außerdem sind die dezentralen

tralen Geräte im Vergleich zu den zentralen zwischen 40 un 50 % günstiger. [24]

4 Parameterbeschaffung

Zur Bestimmung einer besonders effizienter Strategie, um den deutschen Wohngebäudebestand emissionsärmer zu gestalten, wird das in Kapitel 3.2 vorgestellte Optimierungsmodell erweitert. Hierbei werden in 4.1 die Gebäudeklassen des Bestandes möglichst repräsentativ zusammengefasst. Weiterhin wird die Berechnung der Lüftungswärmeverluste des Programms in einen dynamischen Ansatz überführt, um diese somit genauer abzubilden. Hierfür werden in 4.2 die Generierung weiterer Daten, welche zur dynamischen Modellierung der Wärmeverluste durch Lüftung benötigt werden, beschrieben.

4.1 Kategorisierung des Gebäudebestandes

Nach TABULA wird der deutsche Wohngebäudebestand in 43 Klassen unterteilt. Diese unterscheiden sich nach Baujahr und Gebäudeart. Wie in Tabelle A.1 zu sehen ist, existieren nicht für alle Gebäudetypen und Zeiträume Daten zur Wohneinheitenanzahl. Außerdem unterscheiden sich die Anteile der einzelnen Gruppen am gesamten Wohneinheitenbestand. So bilden beispielsweise die Klasse der Hochhäuser in den alten Bundesländer nur 1 % des Bestandes ab, wohingegen der Anteil bei den Mehrfamilienhäusern zu 38 % beträgt. Mit dieser Datenlage werden bei der Optimierung viele Ergebnisse erzeugt, was die Auswertung komplex gestaltet.

Um aus dieser inhomogenen Verteilung eine vereinfachte Kategorisierung zu gewinnen, mit welcher sich Gebäudeenergiesysteme für weniger Klassen optimieren lassen, werden die Anzahl der Wohneinheiten der jeweiligen Gebäudetypen betrachtet. Neben diesem Kriterium fließt weiterhin die energetische Qualität der Bestandteile der Gebäudehülle mit in die Betrachtung ein. Da als Ziel dieser Arbeit das Aufweisen von Einsparpotentialen definiert ist, werden Baualtersklassen zusammengefasst, in welchen sich die U-Wert der Gebäudehülle für die Gebäudetypen ähneln.

Zunächst werden Gebäudetypen des deutschen Wohngebäudebestandes zusammengefasst. Dafür werden die Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand, der Fenster, des Bodens und des Dachs betrachtet. Gleichen sich die U-Werte der Bauteile für zwei Gebäudetypen, werden diese in einer neuen Gruppe zusammengefasst.

Der Gebäudetyp der Einfamilienhäuser bildet mit 42 % den größten Anteil des Wohneinheitenbestandes ab und wird deshalb als Referenz definiert. W

Wird der deutsche Wohngebäudebestand nach der Einteilung von TABULA betrachtet, lassen sich insgesamt 43 Klassen erkennen. Diese unterscheiden sich nach Baujahr und Gebäudeart. Wie in

Tabelle A.1 zu sehen ist, existieren nicht für alle Klassen Daten zur Wohneinheitenanzahl bei verschiedenen Baujahren. Außerdem unterscheiden sich die Anteile der einzelnen Gruppen am gesamten Wohneinheitenbestand. So bilden beispielsweise die Klasse der Hochhäuser in den alten Bundesländer nur 1 % des Bestandes ab, wohingegen sich der Anteil bei den Mehrfamilienhäusern zu 38 % ergibt.

Um aus dieser inhomogenen Verteilung eine vereinfachte Kategorisierung zu generieren, mit welcher sich Gebäudeenergiesysteme für wenige Klassen bestimmen lassen, wird eine ABC-Analyse des Bestandes durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein betriebswirtschaftlichen Analyseverfahren zur Bewertung von Objekten einer Menge. Es stehen die drei Kategorien A, B und C zur Auswahl, welche nach absteigender Reihenfolge den Objekten eine Wertung zuteilen.

Im Falle des Gebäudebestandes werden die TABULA-Klassen danach untersucht, inwieweit diese den Bestand repräsentieren und Potenzial für eine energetische Verbesserung besitzen. Betrachtet wird daher die Wohneinheitenanzahl, beziehungsweise der Anteil am Bestand, sowie die U-Werte als Kriterium des energetischen Einsparpotenzials. Weiter werden anhand des Wärmedurchgangskoeffizient ähnliche Klassen zusammengefasst. Da die Analyse darauf abzielt eine Entscheidung zu treffen, ob die Klasse zur Repräsentation des Bestandes relevant ist, wird auf eine Bewertung mit B verzichtet. Eine A-Wertung bedeutet schließlich, dass die Klasse repräsentativ wichtig für den Bestand ist. Analog dazu werden C-gewertete Typen nicht weiter untersucht.

Aus der Analyse des deutschen Wohngebäudebestandes in Kapitel 2.1 geht hervor, dass der größte Anteil der Gebäude vor 1978 errichtet wurde. XXXX

Zunächst werden die Hochhäuser in neuen und alten Bundesländern betrachtet. Deren Anteil am gesamten Wohnungsbestand ist mit unter 2 % gering. Zudem weicht die Geometrie der Gebäude stark von anderen Klassen ab, sodass ein Zusammenfassen der Hochhäuser mit einem anderen Gebäudetypen Schwierigkeit bereitet. Somit erhalten die Hochhäuser eine C-Wertung.

Weiterhin werden für die Gebäudetypen der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser die Baualterklassen der Gebäuden vor 1856 angeschaut. Hier ist auffällig, dass die U-Werte für alle Bauteile deutlich von denen der nächsten Baualterklasse abweichen. So verbessern sich beispielsweise die Dächer in dem Zeitraum vor 1856 im Vergleich zu den Baujahren von 1857 bis 1919 von 2,60 auf $1,30 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Außerdem handelt es sich bei diesen oftmals um denkmalgeschützte Bauten, bei denen nicht jede energetische Sanierung aufgrund des Denkmalschutz zulässig ist. Daher erhalten auch die Klassen der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser vor 1856 eine C-Wertung.

Bei den Baujahren nach 1994 weicht die energetische Qualität der Hülle im Vergleich zu denen der Baujahre zuvor ebenfalls ab. Im Zuge der 3. WschV wurden die Anforderungen an die Gebäudehülle verschärft. Daher lässt sich eine sprunghafte Verbesserung der U-Werte beobachten. Zwar handelt es sich bei dieser Klasse um Gebäude, welche mitunter 20 Jahre oder älter sind und somit Sanierungsbedarf aufweisen, allerdings ist deren energetisches Einsparpotenzial nicht sehr hoch, weswegen Gebäude mit Baujahr jünger als 1994 ebenfalls eine C-Wertung erhalten.

Somit verbleiben die Gebäudetypen der Einfamilien-, Reihen-, Mehrfamilien- und großen Mehrfamilienhäuser der Jahrgänge von 1856 bis 1994, welche eine A-Wertung erhalten.

Bei einem Vergleich der Einfamilien- und Reihenhäuser fällt auf, dass alle U-Werte außer dem des Daches nahezu identisch sind. Da auch die Größe und Dimensionierung der beiden Gebäudetypen Ähnlichkeiten aufweisen, werden diese zusammengefasst und im Weiteren als *Cluster A* bezeichnet.

Ebenso lassen sich vergleichbare Wärmedurchgangskoeffizienten bei den Mehrfamilien- und großen Mehrfamilienhäusern erkennen. Sogar bei einem Vergleich der alten und neuen Bundesländer weichen U-Werte der TABULA-Typgebäuden nur leicht voneinander ab. So besitzen beispielsweise die Fenster der Mehrfamilienhäuser von 1919 bis 1994 einen U_g -Wert von $3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ und die der großen Mehrfamilienhäuser von 1969 bis 1983 aufgrund des vorteilhafteren Holzrahmens $2,7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Daher werden diese Gebäudetypen unter der Bezeichnung *Cluster B* zusammengefasst.

Im Bezug auf die Baujahre lassen sich ebenfalls Jahrgänge mit ähnlichen energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle erkennen. Nach Eicke-Henning [17] und Tabelle A.1 weisen die U-Werte der Bauteile mit Jahrgang 1856 bis 1957 aufgrund ähnlicher Baustoffe und Bauweisen Ähnlichkeiten auf. Nach 1957 verbessern sich diese bis zur 1. WschV 1978 aufgrund der Wahl anderer Baustoffe und dem Fortschritt im Hochbau. Im Zuge der 1. und 2. WschV lassen sich Verbesserungen der energetischen Qualität der Hülle im Zeitraum von 1978 bis 1994 erkennen. Somit werden die Jahrgänge von 1856 bis 1994 in drei Epochen unterteilt. Die Älteste umfasst alle Baujahre inklusive der Nachkriegszeit und daher 1856 - 1957. Die nächste beschreibt die Jahrgänge von 1958 bis 1978 und beinhaltet somit den Zeitraum nach der Nachkriegszeit, in der ohne Regulation durch den Gesetzgeber die Gebäudehülle verbessert wurde. Zuletzt charakterisieren die dritte Epoche von 1979 bis 1994 Bauten mit Baustandard der 1. und 2. WschV. Zur Bestimmung der U-Werte der neu generierten Klassen werden die Wärmedurchgangskoeffizienten der ursprünglichen Gebäudetypen anhand ihrer Anzahl linear interpoliert. In Tabelle 4.1 sind die neuen Klassen mitsamt der jeweiligen U-Werte der Hüllenbestandteile aufgeführt.

Gebäudetyp	Bauteil	Baualtersklasse		
		1856 -1957	1957 -1978	1979 -1994
Cluster A	Dach	1,29	0,64	0,43
	Außenwand	1,59	1,1	0,61
	Fenster	2,8	2,8	2,8
	Boden	0,82	0,93	0,56
Cluster B	Dach	1,24	0,51	0,39
	Außenwand	1,61	1,11	0,68
	Fenster	3	3	3
	Boden	1,03	0,93	0,56

Tabelle 4.1: U-Werte der neuen Gebäudeklassen Cluster A und Cluster B in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

4.2 Parameter zur Modellierung von Lüftungswärmeverlusten

Aus der Darstellung der Lüftungswärmeverluste in Kapitel 3.3 geht hervor, dass diese zum einen vom Lüftungsverhalten der Bewohner und zum anderen durch thermische und Wind abhängige Triebkräfte charakterisiert werden. Diese Faktoren werden in dem zu Grunde liegenden Optimierungsprogramm nicht abgebildet, weshalb das Programm um diese Einflussfaktoren erweitert wird. Zur besseren Abbildung des Nutzereinflusses werden zunächst Fensteröffnungsprofile erstellt.

Um das Nutzerverhalten bezüglich der Fensterlüftung zu modellieren, werden Parameter, welche den Bewohner animieren ein Fenster zu öffnen oder zu schließen, festgelegt. Nach Calí et al. beeinflussen den Nutzer die Tageszeit, die CO₂-Konzentration im Raum, die Innen- und Außentemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit im Inneren des Gebäudes und der Umgebung (s. Tabelle 3.7). Da im Rahmen dieses Optimierungsprogramms weder Kohlenstoffdioxid noch Luftfeuchtigkeit modelliert werden, können diese Einflussfaktoren nicht abgebildet werden. Weiterhin wird eine konstant bleibende Innentemperatur von 20°C angenommen, weswegen die Raumtemperatur auch als Einflussfaktor keine Berücksichtigung findet. Somit verbleiben die Tageszeit und die Außentemperatur als relevante Faktoren, welche den Nutzereinfluss auf die Lüftungswärmeverluste beschreiben.

Als Grundlage der Fensteröffnungsprofile dienen die Monitoring-Daten eines Forschungsprojekts an drei Mehrfamilienhäusern in Karlsruhe-Rintheim. Bei diesem Projekt wurden die Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen und unterschiedlicher Anlagentechnik auf den Energieverbrauch analysiert. Die drei Häuser sind in jeweils drei Riegel unterteilt, in welchen sich jeweils 10 Wohnungen mit je 72 m² befinden. Die vorgenommenen Sanierungsmaßnahmen und die genutzte

Anlagentechnik inklusive der Lüftungskonzepte sind Tabelle AXXXX zu entnehmen. Da nach Osterhage [36] kein signifikanter Unterschied des Nutzerverhaltens in den Wohnungen mit maschinellen Lüftungsanlagen im Vergleich zu denen mit freier Lüftung besteht, werden die Daten aller Wohnungen in Betracht gezogen.

An zwei der drei Untersuchungsobjekte wurden Daten des Fensterzustandes und der Außentemperatur erhoben. Bei diesen handelt es sich um minütlich aufgezeichnete Binärvariablen, welche pro Fenster und Wohnung angeben, ob das Fenster zu dem Zeitpunkt offen (1) oder geschlossen (0) ist. Als Ziel der Fensteröffnungsprofile werden Tagesprofile des Fensteröffnungsverhaltens der Bewohner mit einer Temperatur- und Tageszeitabhängigkeit definiert.

Aufgrund der deutlich höheren Rechendauer einer minütlichen Betrachtung, werden zunächst die Werte in stündliche umgewandelt. Hierfür wird je Fenster das arithmetische Mittel einer Stunde gebildet. Die Variable wird hierbei nicht weiter als Binärvariable angenommen, sondern als Dauer betrachtet. Hierbei bedeutet eine 1, dass das Fenster eine Minute lang geöffnet ist. Das Ergebnis dieses Rechenschritts ist keine Binärvariable, sondern eine reelle Zahl zwischen 0 und 1, welche die Öffnungsdauer des Fensters zu jedem stündlichen Zeitpunkt des Jahres beschreibt. Beispielsweise wird durch den Wert 0,5 beschrieben, dass das Fenster in der betrachteten Stunde 30 Minuten geöffnet ist.

Im nächsten Schritt werden die Fenster der Wohnung zusammengefasst. Wie in [36] beschrieben, werden die Räume je nach Nutzung unterschiedlich belüftet. Da in dem Referenzmodell jedoch keine Unterteilung in Räume geschieht, werden die Fensteröffnungszeiten auf Wohnungsebene betrachtet. Hierzu werden die Öffnungsdauern aller Fenster einer Wohnung je Stunde aufsummiert. Die daraus erhaltene Größe ist rein hypothetisch und kann als Dauer einer unbekannten Menge an geöffneten Fenstern interpretiert werden. Als Beispiel sagt der Wert 1 aus, dass ein Fenster die ganze Stunde geöffnet ist oder aber zwei Fenster jeweils eine halbe Stunde. Da von Fenstern mit gleicher Geometrie und nur einem möglichen Öffnungswinkel ausgegangen wird, gibt es zwischen den zwei Beispielfällen keinen Unterschied im Bezug auf die Lüftungswärmeverluste. Das Ergebnis dieser Rechenschritte beschreibt stundenweise Fensteröffnungsprofile einer Wohnung, die über ein Jahr aufgetragen sind.

Die stündlichen Werte werden über alle Wohnungen des Datensatzes gemittelt. Somit wird aus den 60 Wohnungen des Forschungsprojekts ein Jahresprofil erzeugt, welches die Öffnungsdauer einer unbekannten Menge an Fenstern je Stunde des Jahres beschreibt. Um sowohl die Außentemperatur als auch die Tageszeit in den Fensteröffnungsprofilen zu berücksichtigen, werden Temperaturintervalle mit ähnlichem Nutzerverhalten gebildet. XXXX Tanjas Aussage zu Klassen XXXX Für Tage, an welchen sich die durchschnittliche Tagestemperatur in demselben Temperaturintervall befindet, werden die hypothetischen Fensteröffnungsdauern je Tageszeitpunkt gemittelt. Somit werden Tagesprofile der Fensteröffnungszeiten für unterschiedliche Temperaturintervalle einer Wohnung erzeugt.

Neben dem geöffneten oder geschlossenen Zustand eines Fensters beeinflussen die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur sowie die Windgeschwindigkeit den durch ein Fenster einströmenden Luftvolumenstrom. Die Temperaturdifferenz kann durch Temperaturprofile gebildet werden, welche bereits in das Optimierungsprogramm eingelesen werden. Zur Bestimmung von Profilen der Windgeschwindigkeit werden die Daten des Deutschen Wetterdienstes für das Testreferenzjahr genutzt [12]. Diese umfassen unter anderem die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe für 15 verschiedene Klimaregionen in Deutschland. Diese Klimaregionen werden durch eine Repräsentanzstation vertreten, welche den möglichen Gebäudelagen des Optimierungsprogramms entsprechen (s. Tabelle A.6. Somit werden für die jeweiligen Standorte Profile des Windes in 10 m Höhe für 8760 Zeitpunkte eines Jahres generiert.

5 Modellerweiterung und Parameterwahl

Aus Basis der im vorherigen Kapitel beschriebenen Parametern wird das Optimierungsprogramm um einen dynamischen Modellierungsansatz der Lüftungswärmeverluste erweitert. Weiterhin werden Annahmen für Inputparameter getroffen und diese näher erläutert.

5.1 Modellierung dynamischer Lüftungswärmeverluste

In Kapitel 3.2 wird die Berechnung der Lüftungswärmeverlust in dem Optimierungsprogramm vorgestellt. Aus Gleichung 3.12 geht hervor, dass diese Verluste statisch modelliert werden. Um den in Kapitel XXXX erläuterten Rebound-Effekt zu verringern, wird die Berechnung der Lüftungswärmeverluste hin zu einem dynamischen Ansatz angepasst. Dafür werden die Lüftungswärmeverluste in die Anteile der Fensterlüftung, der Infiltration und der maschinellen Lüftung zerlegt.

Luftvolumenstrom aus Fensterlüftung

Zunächst werden die Lüftungswärmeverluste aufgrund eines Luftvolumenstroms durch ein geöffnetes Fenster betrachtet. Hierfür stehen die in Tabelle 3.8 dargestellten Berechnungsansätze zur Verfügung.

Die Formel von Hall berücksichtigt keinen Einfluss des Windes und wird zur Berechnung des thermisch induzierten Luftvolumenstromes durch ein Fenster genutzt. Dadurch wird ein minimaler Volumenstrom berechnet, welcher von einem hygienischen und bauphysikalischen Blickpunkt aus sichergestellt werden muss. Da in dem Optimierungsmodell dieser Aspekt keine Rolle spielt und nur die Wärmeverluste von Bedeutung sind, wird auf eine Modellierung des Fensterluftvolumenstroms nach Hall verzichtet.

In dem Ansatz von Maas werden die Einflüsse der Temperatur und des Windes berücksichtigt. Allerdings werden Fitkoeffizienten benutzt, welche experimentell bestimmt werden und somit vom Anwendungsfall abhängen. Dies ist schwer in dem Optimierungsprogramm zu modellieren, weshalb der Berechnungsansatz des Fensterluftvolumenstroms nach Maas keine Berücksichtigung findet.

Folglich verbleibt der Berechnungsansatz der DIN EN 12831 zur Bestimmung des Luftvolumenstroms durch ein geöffnetes Fenster. Nach Gleichung 3.23 und 3.21 werden hierzu mehrere Parameter benötigt. Ausgehend von einem Fenster mit Breite 1 m und Höhe 1,2 m ergibt sich die

effektive Fensteröffnungsfläche (A_{eff}) bei einem Öffnungswinkel von 10° zu etwa $0,15 \text{ m}^2$. Die meteorologischen Parameter der Temperaturdifferenz ($\Delta\theta$) und der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe (v_{meteo}) werden über die standortabhängigen Klimaprofile eingelesen. Für den Rauheitsparameter z_0 wird eine mittlere Abschirmung angenommen, womit sich der Wert zu 0,25 ergibt. Mit den bisher erläuterten Parametern wird der Luftvolumenstrom durch ein geöffnetes Fenster ohne Beachtung der Fassadenausrichtung berechnet. Durch Multiplikation mit der in Kapitel 4.2 beschriebenen Fensteröffnungsprofilen wird der gesamte Volumenstrom der Luft durch alle Fenster des Gebäudes berechnet. Wird die Anzahl der geöffneten Fenster des Zeitpunkts t mit $F(t)$ parametrisiert, ergibt sich der Luftvolumenstrom durch alle Fenster eines Gebäudes zu

$$q_{V,open}(t) = F(t) \cdot A_{eff} \cdot 3600 \cdot \sqrt{\frac{C_D^2 \cdot g \cdot h_m \cdot (\theta_{int} - \theta_e(t))}{9 \cdot \theta_e(t)}} + 0,0025 \cdot v_{fac}^2(t) \quad . \quad (5.1)$$

Luftvolumenstrom aus Infiltration

Wie in Kapitel 3.3.2 dargelegt, hängt die Infiltration von der Umgebungstemperatur, der Windgeschwindigkeit sowie der Dichtheit des Gebäudes ab. In der Literatur konnte kein Ansatz gefunden werden, welcher mit den Eingabeparametern des Optimierungsprogramms einen Infiltrationsluftvolumenstrom mit diesen Einflussfaktoren bestimmt. Daher erfolgt die Berechnung des Luftvolumenstroms durch Infiltration mit Hilfe der Luftwechselrate bei 50 Pa Differenzdruck.

Als Grundlage dienen die Werte nach DIN V 4108-6, welche in Tabelle 3.9 zu finden sind. Hier wird die Luftdichtheit in die drei Klassen *wenig dicht*, *mittel dicht* und *sehr dicht* eingeteilt. Nach DIN 1946-6 hängt die Luftdichtheit des Gebäudes hauptsächlich von den Fenstern und dem Dach ab. Daher wird die Annahme getroffen, dass sich die Luftdichtheitsklassen in Abhängigkeit des gewählten Sanierungsszenarios der Fenster und des Daches darstellen lassen. Hierbei entspricht die Klasse *wenig dicht* dem Standard-Zustand der Bauteile im Bestand. Wird mindestens eines der beiden Bauteile auf einen Standard nach EnEV 2014 saniert, wird die Dichtheitsklasse *mittel dicht* angenommen. Darüber hinaus wird die Luftdichtheit zu *sehr dicht* bestimmt, wenn sowohl Dach als auch Fenster energetisch ertüchtigt werden und mindestens eines der beiden Bauteile die Vorgaben eines Passivhaus-Standard erfüllt.

Innerhalb der jeweiligen Dichtheitsklassen gibt die DIN V 4108-6 ein Intervall der n_{50} -Werte an. Um den Einfluss der Gebäudedichtheit verschiedener Baujahre besser abzubilden, werden für die älteren Jahrgänge von 1860 bis 1957 die obere Grenze des Intervalls angenommen und für die jüngeren Baujahre von 1969 bis 1994 die untere Grenze. Der n_{50} -Wert der Gebäudealtersgruppe von 1958 bis 1968 wird mit dem Median des Intervalls abgeschätzt. Außerdem fließen die Vorgaben der DIN 1946-6 und DIN V 4108-7 bezüglich des maximalen und minimalen Infiltrationsluftwechsel in die Annahmen des n_{50} -Wertes mit ein. Nach Gleichung ?? wird zur Umrechnung zwischen dem Volumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz und dem bei Normaldruck der Volumenstromkoeffizient e_Z benötigt. Nach DIN 1946-6 nimmt dieser in Abhängigkeit der Geschosshöhe des Gebäudes und

der Windstärke des Windgebiets Werte zwischen 0,04 und 0,09 an. Vereinfacht wird e_Z im Rahmen des Optimierungsprogramms mit 0,05 angenommen.

Luftvolumenstrom aus maschineller Lüftung

Da das Optimierungsprogramm die Sanierung von Altbauten betrachtet, werden die dafür vorteilhafteren dezentralen Anlagen berücksichtigt. Weiterhin konnte in der Literatur keine Berechnung einer Kombination von natürlicher und maschineller Lüftung gefunden werden. Eine Implementierung einer mit Kosten verbundenen maschinellen Lüftungsanlage in das Optimierungsprogramm bei gleichzeitiger Beibehaltung der Verluste aus Fensterlüftung und Infiltration ist nicht sinnvoll. Daher wird eine bedarfsgeführte Anlage angenommen, bei welcher der Frischluftbedarf als der Luftvolumenstrom der Fensterlüftung abgeschätzt wird. Die in Tabelle 3.10 angegebenen Werte zur Rückwärmezahl werden hierbei konservativ abgeschätzt und weiterhin um 10 % gemindert, sodass die Rückwärmezahl mit $\Phi = 60\%$ abgeschätzt wird. Da davon auszugehen ist, dass die Nutzung einer maschinellen Lüftungsanlage die Fensterlüftung nicht ausschließt, soll durch die Abschätzung der Rückwärmezahl die Wärmerückgewinnung unter Gleichzeitiger Beachtung der Fensterlüftung abbilden.

Literaturverzeichnis

- [1] *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Neue Ausg. Darmstadt : Wohnen und Umwelt, 2015. – ISBN 978–3–941140–47–9
- [2] ASADI, Ehsan ; DA SILVA, Manuel G. ; ANTUNES, Carlos H. ; DIAS, Luis: Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. In: *Energy and Buildings* 44 (2012), S. 81–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.016>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2011.10.016. – ISSN 03787788
- [3] ASDRUBALI, Francesco ; BALDINELLI, Giorgio ; BIANCHI, Francesco ; CORNICCHIA, Matteo: Experimental Performance Analyses of a Heat Recovery System for Mechanical Ventilation in Buildings. In: *Energy Procedia* 82 (2015), S. 465–471. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.845>. – DOI 10.1016/j.egypro.2015.11.845. – ISSN 18766102
- [4] BIGALKE, Uwe ; ARMBRUSTER, Aline ; LUKAS, Franziska ; KRIEGER, Oliver ; SCHUCH, Cornelia ; KUNDE, Jan ; DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH (Hrsg.): *dena-Gebäudereport 2016: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. www.dena.de
- [5] BOHNE, Dirk: Raumlufttechnik. In: BOHNE, Dirk (Hrsg.): *Technischer Ausbau von Gebäuden: Und nachhaltige Gebäudetechnik*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2019. – ISBN 978–3–658–21436–4, S. 337–431
- [6] BORSCH-LAAKS, Robert ; HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (Hrsg.): *Lüftung im Wohngebäude: Wissenswertes über den Luftwechsel und moderne Lüftungsmethoden*. http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/espi/espi8.pdf
- [7] BUNDESREGIERUNG: 1. Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden: 1. WschV. <https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeschutzverordnung>. Version: 1977
- [8] CALI, D. ; STREBLOW, R. ; MÜLLER, D. ; OSTERHAGE, T.: Holistic Renovation and Monitoring of Residential Buildings: Contribution to a conference proceedings. In: *Rethink, renew, restart: ECEEE 2013 summer study* Bd. 2
- [9] CALI, Davide: *E.On Energy Research Center*. Bd. Band 38 : EBC, Energy efficient buildings and indoor climate: *Occupants' behavior and its impact upon the energy performance of buildings*:

- = *Auswirkung des Nutzerverhaltens auf die Energieeffizienz von Gebäuden*. 1. Auflage. Aachen : E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, 2016. – ISBN 3942789361
- [10] CALÌ, Davide ; ANDERSEN, Rune K. ; MÜLLER, Dirk ; OLESEN, Bjarne W.: Analysis of occupants' behavior related to the use of windows in German households. In: *Building and Environment* 103 (2016), S. 54–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.024>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2016.03.024. – ISSN 03601323
- [11] <https://www.stromspiegel.de/>
- [12] DEUTSCHER WETTERDIENST: *Testreferenzjahr von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse*. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-handbuch.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Thermal protection and energy economy in buildings Part 6: Calculation of annual heat and annual energy use*. Juni 2003
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 12831-1 Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*. September 2017
- [15] DIEFENBACH, Nikolaus ; BORN, Rolf ; INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH (Hrsg.): *Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU*
- [16] DUBIELZIG, Guido: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6, Energietechnik*. Bd. 560: *Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen*. Düsseldorf : VDI-Verl., 2007. – ISBN 978–3–18–356006–6
- [17] EICKE-HENNING, Werner: Kleine Geschichte der Dämmstoffe: "Erster Teil". In: *wksb* 2011 (2011), Nr. 65, S. 6–27
- [18] EICKE-HENNING, Werner: Kleine Geschichte der Dämmstoffe: "Zweiter Teil". In: *wksb* 2011 (2011), Nr. 66, S. 6–34
- [19] FABI, Valentina ; ANDERSEN, Rune V. ; CORGNATI, Stefano ; OLESEN, Bjarne W.: Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. In: *Building and Environment* 58 (2012), S. 188–198. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.009>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2012.07.009. – ISSN 03601323
- [20] FECHNER, Johannes ; SCHÖBERL, Helmut ; HOFER, Richard ; LEITZINGER, Wolfgang ; BERGER, Daniel: Hochwertige Lüftungsanlagen für Wohngebäude. In: *Europäischer Fonds für regionale Entwicklung, Niederösterreich* (2014)
- [21] HAAS, Reinhard ; BIERMAYR, Peter: The rebound effect for space heating Empirical evidence from Austria. In: *Energy Policy* 28 (2000), Nr. 6-7, S. 403–410. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00023-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00023-9). – DOI 10.1016/S0301-4215(00)00023-9. – ISSN 03014215

- [22] HALL, Monika: *Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechsellpotential von Kippfenstern*. Kassel : Universität Kassel, 2004
- [23] HARB, Hassan ; REINHARDT, Jan ; STREBLOW, Rita ; MÜLLER, Dirk: MIP approach for designing heating systems in residential buildings and neighbourhoods. In: *Journal of Building Performance Simulation* 9 (2016), Nr. 3, S. 316–330. <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2015.1051113>. – DOI 10.1080/19401493.2015.1051113. – ISSN 1940–1493
- [24] HINZ, Eberhard: *Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten: Endbericht*. 1. Auflage. Darmstadt : Institut Wohnen und Umwelt, 10.08.2015. – ISBN 978–3–941140–50–9
- [25] HÖRNER, Berndt (Hrsg.) ; SCHMIDT, Manfred (Hrsg.): *Handbuch der Klimatechnik*. 6., überarb. Aufl. Berlin : VDE-Verl., 2014. – ISBN 9783800735549
- [26] INSTITUT FÜR TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG DRESDEN ; BDEW BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.): *BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2017*. https://www.bdew.de/media/documents/Heizkostenvergleich_Altbau.pdf. Version: 3
- [27] ITURRIAGA, E. ; ALDASORO, U. ; CAMPOS-CELADOR, A. ; SALA, J. M.: A general model for the optimization of energy supply systems of buildings. In: *Energy* 138 (2017), S. 954–966. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.094>. – DOI 10.1016/j.energy.2017.07.094. – ISSN 03605442
- [28] KAMENDERE, Edite ; ZOGLA, Gatis ; KAMENDERS, Agris ; IKAUNIEKS, Janis ; ROCHAS, Claudio: Analysis of Mechanical Ventilation System with Heat Recovery in Renovated Apartment Buildings. In: *Energy Procedia* 72 (2015), S. 27–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.005>. – DOI 10.1016/j.egypro.2015.06.005. – ISSN 18766102
- [29] KFW BANKENGRUPPE: *Förderreport 2018*. https://www.kfw.de/PDF/Unternehmen/Zahlen-und-Fakten/KfW-auf-einen-Blick/F%C3%B6rderreport/KfW-F%C3%B6rderreport_2018.pdf
- [30] LAASCH, Thomas (Hrsg.) ; LAASCH, Erhard (Hrsg.): *Haustechnik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9900-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9900-2>. – ISBN 978–3–8348–1260–5
- [31] LOGA, Tobias ; DIEFENBACH, Nikolaus ; STEIN, Britta ; INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH (Hrsg.): *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project: Final Project Report: Appendix Volume*
- [32] MAAS, Anton: *Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels von Fensterlüftung*. Kassel : Universität Gesamthochschule Kassel, 1995

- [33] MAAS, Anton: Lüftung. Version: 2017. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-16074-6_4. In: HÄUPL, Peter (Hrsg.) ; HÖFKER, Gerrit (Hrsg.) ; HOMANN, Martin (Hrsg.) ; KÖLZOW, Christian (Hrsg.) ; MAAS, Anton (Hrsg.) ; NOCKE, Christian (Hrsg.) ; RIESE, Olaf (Hrsg.) ; WILLEMS, Wolfgang M. (Hrsg.): *Lehrbuch der Bauphysik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. – DOI 10.1007/978-3-658-16074-6_4. – ISBN 978-3-658-16073-9, S. 51–60
- [34] MANZ, H. ; HUBER, H. ; SCHÄLIN, A. ; WEBER, A. ; FERRAZZINI, M. ; STUDER, M.: Performance of single room ventilation units with recuperative or regenerative heat recovery. In: *Energy and Buildings* 31/32 (2000), Nr. 1, S. 37–47. – ISSN 03787788
- [35] MILLES, Uwe: *Lüften und Energiesparen*. 2011
- [36] OSTERHAGE, T.: *Messdatengestützte Analyse und Interpretation sanierungsbedingter Effizienzsteigerungen im Wohnungsbau*. Aachen : E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, 2018. – ISBN 978-3-942789-57-8
- [37] PECH, Anton ; JENS, Klaus: Wärmerückgewinnung. In: PECH, Anton (Hrsg.) ; JENS, Klaus (Hrsg.): *Lüftung und Sanitär*. Vienna : Springer-Verlag/Wien, 2006 (Baukonstruktionen). – ISBN 978-3-211-38042-0
- [38] PINZON, Jerson A. ; VERGARA, Pedro P. ; DA SILVA, Luiz C. P. ; RIDER, Marcos J.: An MILP model for optimal management of energy consumption and comfort in smart buildings. In: *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, IEEE, 23.04.2017 - 26.04.2017. – ISBN 978-1-5386-2890-4, S. 1–5
- [39] RISBECK, Michael J. ; MARAVELIAS, Christos T. ; RAWLINGS, James B. ; TURNEY, Robert D.: A mixed-integer linear programming model for real-time cost optimization of building heating, ventilation, and air conditioning equipment. In: *Energy and Buildings* 142 (2017), S. 220–235. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.053>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2017.02.053. – ISSN 03787788
- [40] SAMSATLI, Sheila ; SAMSATLI, Nouri J.: A general mixed integer linear programming model for the design and operation of integrated urban energy systems. In: *Journal of Cleaner Production* 191 (2018), S. 458–479. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.198>. – DOI 10.1016/j.jclepro.2018.04.198. – ISSN 09596526
- [41] SCHELLONG, Wolfgang: *Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49463-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49463-9>. – ISBN 978-3-662-48527-9
- [42] SCHILD, Kai ; WILLEMS, Wolfgang M.: Lüftung und Luftdichtheit. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02571-7_8. In: SCHILD, Kai (Hrsg.) ; WILLEMS,

- Wolfgang M. (Hrsg.): *Wärmeschutz*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. – DOI 10.1007/978-3-658-02571-7_8. – ISBN 978-3-658-02570-0, S. 253–291
- [43] SCHILD, Kai (Hrsg.) ; WILLEMS, Wolfgang M. (Hrsg.): *Wärmeschutz*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02571-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02571-7>. – ISBN 978-3-658-02570-0
- [44] SCHÜTZ, Thomas ; SCHIFFER, Lutz ; HARB, Hassan ; FUCHS, Marcus ; MÜLLER, Dirk: Optimal design of energy conversion units and envelopes for residential building retrofits using a comprehensive MILP model. In: *Applied Energy* 185 (2017), S. 1–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.049>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2016.10.049. – ISSN 03062619
- [45] STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER: *Gebäude mit Wohnraum nach Art des Gebäudes und Baujahr (Mikrozensus-Klassen)*. https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,GWZ_10_2,m,table. Version: 2014
- [46] STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER: *Gebäude mit Wohnraum nach Art des Gebäudes, Zahl der Wohnungen und Baujahr (Mikrozensus-Klassen)*. https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,GWZ_10_8,m,table. Version: 2014
- [47] SUSZANOWICZ, Dariusz: Optimisation of Heat Loss through Ventilation for Residential Buildings. In: *Atmosphere* 9 (2018), Nr. 3, S. 95. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos9030095>. – DOI 10.3390/atmos9030095
- [48] WILD, Uwe: EnEV und Energetische Sanierung. Version: 2015. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-07456-2_{_}3. In: STAHR, Michael (Hrsg.): *Bausanierung*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. – DOI 10.1007/978-3-658-07456-2_3. – ISBN 978-3-658-07455-5, S. 85–109
- [49] WOUTERS, Carmen ; FRAGA, Eric S. ; JAMES, Adrian M. ; POLYKARPOU, Eleftheria M.: Mixed-integer optimisation based approach for design and operation of distributed energy systems. In: ABU-SIADA, A. (Hrsg.): *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2014*. Piscataway, NJ : IEEE, 2014. – ISBN 978-0-6469-2375-8, S. 1–6
- [50] ZHU, Qianwen ; LI, Qiqiang ; ZHANG, Bingying ; WANG, Luhao ; LI, Guanguan ; WANG, Rui: Capacity Optimization for Electrical and Thermal Energy Storage in Multi-energy Building Energy System. In: *Energy Procedia* 158 (2019), S. 6425–6430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.183>. – DOI 10.1016/j.egypro.2019.01.183. – ISSN 18766102

Anhang

A Tabellen

A.1 Anzahl an Wohneinheiten nach Alter und Gebäudetyp (IWU Berechnungen)

Gebäude- typ	Baualtersklasse									Σ
	-1859	1860 -1918	1919 -1948	1949 -1957	1958 -1968	1969 -1978	1979 -1983	1984 -1994	1995 -2006	
EFH	916	1707	2010	1915	2274	1867	936	2055	2665	16345
RH	–	145	326	231	348	517	202	281	368	2418
MFH	462	1501	2034	1912	2210	1677	821	1712	2536	14865
GMH	–	448	169	703	784	697	–	–	–	2801
HH	–	–	–	–	198	198	–	–	–	396
MFH NBL	–	–	–	329	408	–	–	–	–	737
GMH NBL	–	–	–	–	–	390	336	305	–	1031
HH NBL	–	–	–	–	–	310	67	–	–	377
Σ	1378	3801	4539	5090	6222	5656	2362	4353	5569	38970

Tabelle A.1: Anzahl an Wohneinheiten [in Tausend] nach Baualtersklasse und Gebäudetyp. [15]

EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhaushaus, MFH = Mehrfamilienhaus, GMH = großes Mehrfamilienhaus, HH = Hochhaus, NBL = neue Bundesländer

A.2 U-Werte nach TABULA

Baualter- klassen	EFH				MFH			
	Dach	Außen- wand	Fenster	Boden	Dach	Außen- wand	Fenster	Boden
vor 1918	1,3	1,7	2,8	0,88	1,3	2,2	2,7	0,88
1919 -1948	1,4	1,7	2,8	0,77	1,4	1,7	3	0,77
1949 -1957	1,4	1,4	2,8	0,78	1,08	1,2	3	1,33
1958 -1968	0,8	1,2	2,8	1,08	0,51	1,2	3	1,08
1969 -1978	0,5	1	2,8	0,77	0,51	1	3	0,77
1979 -1983	0,5	0,8	4,3	0,65	0,43	0,8	3	0,65
1984 -1994	0,4	0,5	3,2	0,52	0,36	0,6	3	0,51
1995 -2001	0,35	0,3	1,9	0,4	0,32	0,4	1,9	0,4
2002 -2009	0,25	0,3	1,4	0,28	0,2	0,25	1,4	0,32
2010 -2015	0,2	0,28	1,3	0,35	0,2	0,28	1,3	0,35

Tabelle A.2: Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile Dach, Außenwand, Fenster (U_w) und Boden nach Gebäudeart und Baualterklasse [in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$]

A.3 Anzahl, Anteil und U_g -Werte gängiger Verglasungsarten

Verglasungstyp	Anzahl [in Millionen]	Anteil am Bestand [in %]	U_g -Wert in [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]
Einfachverglasung	19,6	3	5,8
Verbund- und Kastenfenster	44,8	7	2,8
Dreischeiben-Wärmedämmglas	48,9	8	0,7
Unbeschichtetes Isolierglas	207,3	34	2,8
Zweischeiben-Wärmedämmglas	284,2	47	1,4 - 1,1

Tabelle A.3: Bestand an Fenstern in Deutschland im Jahr 2015. [4]

Parameter	Wert	Einheit
Betrachtungszeitraum	15	Jahre
Mehrwertsteuer	19	%
Interner Zinssatz	2	%
Inflationsrate	1,4	%
Preisänderungsfaktor Elektrizität	1,0388	—
Preisänderungsfaktor Gas	1,001	—
Preisänderungsfaktor Holz-Pellets	1,0158	—
Preisänderungsfaktor EEX-Kompensierung	1,0268	—
Einspeisevergütung BHKW-Strom	0,03307	$\frac{€}{kWh}$
Energiesteuer	0,0055	$\frac{€}{kWh}$

Tabelle A.4:

A.4 Inputparameter Gebäudealter und -lage

Gebäudealter		Gebäuelage		
bis 1859	1979 - 1983	Bad Marienberg	Garmisch	Potsdam
1860 - 1918	1984 - 1994	Braunlage	Hamburg	Rostock
1919 - 1948	1995 - 2001	Bremerhaven	Hof	Stötten
1949 - 1957	2002 - 2009	Chemnitz	Kassel	
1958 - 1968	2010 - 2015	Essen	Mannheim	
1969 - 1978	ab 2016	Fichtelberg	Mühlendorf	

Tabelle A.5: Ausprägungen der Inputparameter Gebäudealter und -lage

A.5 Kostenkennlinie und Nutzungsdauer der Gebäudehüllenkomponenten

Komponente	Kostenkennlinie $K = a \cdot x + b$ mit x als Dämmstärke [cm }		Nutzungsdauer in Jahren
	a $[\frac{€}{m^2 \cdot cm}]$	b $[\frac{€}{m^2}]$	
Außenwand	2,81	96,88	40
Boden	1,55	54,25	50
Dach	2,37	33,44	50
	mit x als U-Wert $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$		in Jahren
	a $[\frac{€}{\frac{W}{m^2 \cdot K}}]$	b [€]	
Fenster	-242	785	30

Tabelle A.6: y-Achsenabschnitt und Steigung der Kostenkennlinie sowie Nutzungsdauer der Bauteile Außenwand, Boden, Dach und Fenster [24]

A.6 Nutzungskosten und Betriebskosten der Anlagentechnik

Technologie	Nutzungsdauer in Jahren	Betriebskosten in % der Anfangsinvestition
Gas-Brennwertkessel	20	2,5
Pellet-Kessel	15	5,0
BHKW	15	1,25
Luft-Wärmepumpe	18	2,5
Sole-Wärmepumpe	20	2,5
Elektroheizstab	20	3,0
Photovoltaik	20	1,0
Solarthermie	20	1,5
Thermischer Speicher	20	2,0
Batteriespeicher	15	1,0

Tabelle A.7: Nutzungsdauer und Betriebskosten verschiedener Technologien

Feuchteschutz nach DIN 1946-6		Wärmeschutz nach DIN 4108-7	
Gebäudeausführung	$n_{50,min}$ [h ⁻¹]	Gebäudeausführung	$n_{50,max}$ [h ⁻¹]
Ventilatorgestützte Lüftung in Ein- und Mehrfamilienhäusern	1,0	ohne RLT	3,0
Freie Lüftung in modernisierten Mehrfamilienhäusern	1,5	mit RLT	1,5
Freie Lüftung in modernisierten Einfamilienhäusern	2,0		

Tabelle A.8: Mindest- und Maximalluftwechsel durch Infiltration nach DIN 1946-6 und DIN 4108-7

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die vorliegende Arbeit in der Lehrstuhlbibliothek und Datenbank aufbewahrt und für den internen Gebrauch kopiert werden darf.

Aachen, den 21. Juni 2019

Jonas Baumgärtner