

## 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, Mai 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	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Vorwort	IX
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	1
<b>2 Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Deutscher Wohngebäudebestand . . . . .	2
2.2 Historische Entwicklung der Dämmstandards . . . . .	5
2.3 Sanierungsstand des deutschen Wohngebäudebestandes . . . . .	8
2.4 Optimierungsmodell . . . . .	9
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>10</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>11</b>
<b>A Tabellen</b>	<b>13</b>
A.1 U-Werte nach TABULA . . . . .	13
A.2 Anzahl, Anteil und $U_g$ -Werte gängiger Verglasungsarten . . . . .	14
<b>B Wichtiger Anhang</b>	<b>15</b>

# Nomenklatur

## Formelzeichen und Einheiten

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

### Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
$\psi$	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 [6] . . . . . 3

2.2 Anzahl an Wohneinheiten bei Einfamilienhäuser (SFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH)

    [7] . . . . . 4

2.3 tba . . . . . 8

2.4 [2] . . . . . 9

## Tabellenverzeichnis

A.1	Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile Dach, Außenwand, Fenster ( $U_w$ ) und Boden nach Gebäudeart und Baualtersklasse [in $W/(m^2 \cdot K)$ ] . . . . .	13
A.2	Bestand an Fenstern in Deutschland, 2015 [2] . . . . .	14

## Vorwort



# **1 Einleitung**

## **1.1 Motivation**

das ist die einleitung

## **1.2 Aufgabenstellung**

das ist die aufgabenstellung

## 2 Grundlagen

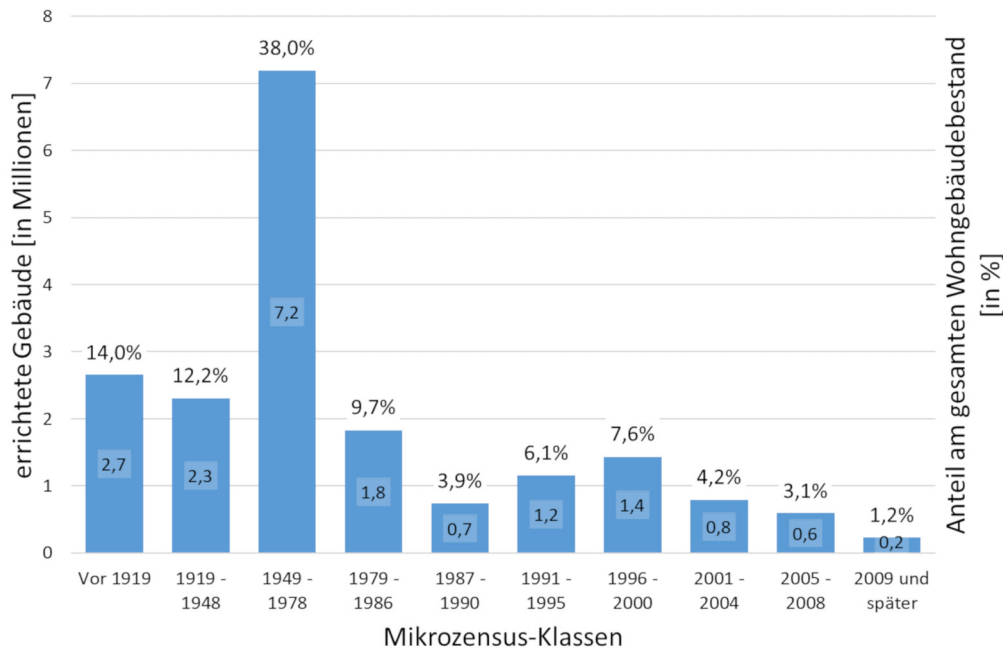
Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung optimierter Gebäudeenergiesysteme für den deutschen Wohngebäudebestand. Hierzu wurde in Kapitel 2.1 der Bestand analysiert, um auf dieser Untersuchung aufbauend die nationale Wohngebäudesituation in einigen wenigen, repräsentativen Klassen abzubilden. Des Weiteren wurde in 2.2 die historische Entwicklung der deutschen Dämmstandards betrachtet. Daraus wurden Zeiträume der Baualtersklassen mit ähnlichen Wärmeübergangskoeffizienten der Gebäudehülle zusammengefasst. Zuletzt stellt Kapitel 2.3 die Grundlagen der mathematischen Optimierung sowie das im Rahmen dieser Arbeit erweiterte Optimierungsprogramm vor.

### 2.1 Deutscher Wohngebäudebestand

Zunächst wurde der Wohngebäudebestand hinsichtlich Alter und Größe ausgewertet. Als Daten wurden die Statistiken des Zensus2011, einer nationalen statistischen Erhebung von privaten Haushalten, betrachtet. Besagte Statistiken wurden in verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen des Institut für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) ausgewertet und evaluiert. Weiterhin wurde für die gebäudetypischen Kennwerte die Typgebäude des europaweiten Projekts „Typology Approach for Building Stock Energy Assessment“ (TABULA) berücksichtigt. Diese Daten wurden wiederum vom 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 alleine macht 38 % der deutschen Wohngebäude aus. 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 wurde. 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.



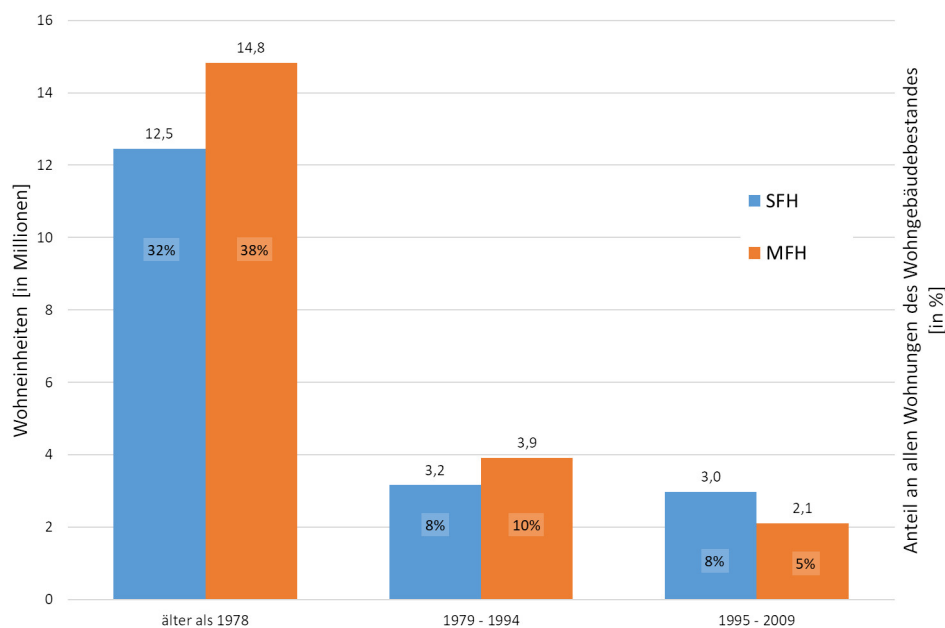
**Abbildung 2.1:** errichtete Wohngebäude nach Mikrozensus-Klassen [6]

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 und die Gebäudeklasse mit 3 - 6 Wohnungen ist mit 12 % vertreten. 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 eingehen. [7]

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 Gebäudebestandes dargestellt. In Anlehnung an den vorherigen Abschnitt werden Gebäude mit bis zu 2 Wohnungen als Einfamilienhäuser 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 Mehrfamilienhäuser 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) [7]

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.
- Ein- und Zweifamilienhäuser stellen mit 87 % den größten Anteil der Gebäude dar.
- 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 großen Anteil des Bestandes.



## 2.2 Historische Entwicklung der Dämmstandards

Nachdem im vorherigen Kapitel der Gebäudebestand nach Alter und Größe beschrieben wurde, werden nun die zu den jeweiligen Gebäudealtern und -größen zugehörigen Dämmstandards vorgestellt. Hierzu wird zwischen der Isolierung verschiedener Gebäudebauteilen unterschieden. Neben Möglichkeiten zur Dämmung des Daches beziehungsweise der obersten Geschossdecke und der Außenwand werden zudem die Dämmung des Bodens sowie die Fenster betrachtet.

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 m<sup>2</sup> Bauteilfläche bei 1 Kelvin Temperaturdifferenz beschreibt. Berechnet wird dieser als Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstand  $R_T$ . Der U-Wert ist definiert als

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

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  $\lambda_i$  des Baustoffes der Schicht  $i$  beschrieben wird.

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

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

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  $\psi$ -Wertes mit der Gesamtumfangsfläche der Verglasung  $l_g$  berücksichtigt. [5]

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.1 lässt sich erkennen, dass sich die Wärmeübergangskoeffizienten der Gebäudetypen SFH und MFH in diesen

Jahren stark ähneln. Dies ergibt sich auch aus der Darstellung der Geschichte des Dämmstandards von Eicke-Henning. Hier wurde 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. Die im Jahr 1952 eingeführte DIN 4108 verkörperte zwar den ersten Ansatz Wärmeschutz normativ zu regulieren, jedoch konnte sie auch zu keiner Veränderung der energetischen Bauweise führen. Trotz deren Name „Wärmeschutz im Hochbau“ beinhaltete 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. [4]

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 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. [4]

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 SFH-Typgebäude 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  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  für das Dach sowie  $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  für den Boden erreicht werden (s. Tabelle A.1). Weiterhin wurde durch die Verordnung vorgeschrieben, dass „außenliegende Fenster und Fenstertüren von beheizten Räumen (...) mindestens mit Isolier- und Doppelverglasung auszuführen (sind)“ [3]. Somit ermöglichte die 1. WschV eine Verbesserung des energetischen Standards der Wohngebäude. 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  $3,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  nicht überschritten werden darf [3]. Nach heutigem Standard der Energieeinsparverordnung 2009, die im folgenden noch weiter erläutert wird, sind für die Fenster im Neubau  $U_w$ -Werte kleiner  $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  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 SFH-Typgebäudenfenster der Jahre 1979 - 1983 aufgrund dessen energetisch schlechten Metallrahmen mit  $4,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  höher als der  $U_g$ -Normwert der 1. WschV. [4]

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 porosierte Außenwänden (...), 8-9 cm Wärmedämmung im Dach und 4 cm Kellerdämmung beschreiben (lassen)“ [4]. Wie sich aus Tabelle A.1 lesen lässt, führten die Maßnahmen der 2. WschV zu einem durchgehend besseren Verhalten der Bauteile gegenüber Transmissionswärmeverluste. Im Bezug auf die Anforderung der Fensterflächen ergab sich zwar eine Verbesserung im Vergleich zur 1. WschV auf  $U_{g,max} = 3,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 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 kennzeichnete 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 wärmetechnisch besseren Rahmen erzielte eine Verbesserung des  $U_g$ -Wertes von  $3 - 3,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  auf  $1,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

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 limitiert. Obwohl nicht explizit strengere Regulationen an die Gebäudehülle formuliert wurden, konnte durch die Restriktion des Jahres-Primärenergiebedarfs ein Absinken der Wärmedurchgangskoeffizienten aufgrund dickerer Dämmschichten erzielt werden. Nach Tabelle A.1 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  $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  gedämmt werden.

Novellierungen 2004 + 2007 + 2009 (+2014, 2016?) Stand EnEV 2009 erklären

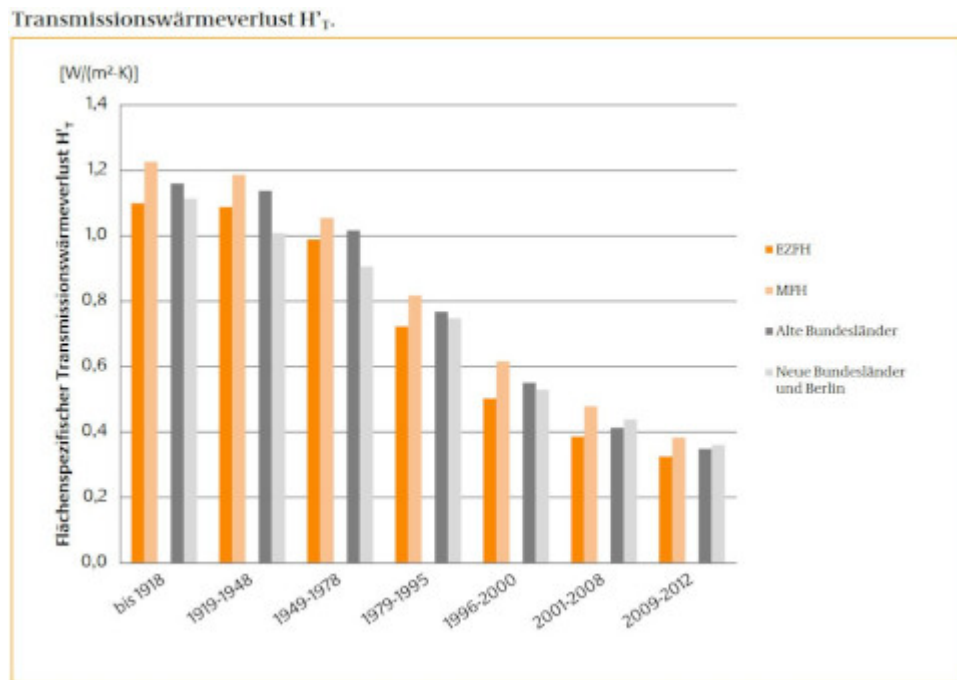


Abbildung 2.3: tba

Zu Tabelle A.1 ist anzumerken, dass sie sich auf den Zustand der Bauteile im damaligen Neubau bezieht. Einzige Ausnahme hierbei bilden die Fenster der Zeiträume bis 1978. Für diese charakterisierte die Einscheiben-Verglasung den

### 2.3 Sanierungsstand des deutschen Wohngebäudebestandes

In dem vorangegangenen Abschnitt wurde die Entwicklung des Dämmstandards vorgestellt. Hierbei wurde sich ausschließlich auf den Neubauzustand bei Fertigstellung des Gebäudes bezogen. Dieses Kapitel soll nun die Veränderung des Gebäudebestandes aus energetischer Sicht durch Sanierung veranschaulichen.

Abbildung 2.4 zeigt den Anteil der durch nachträgliche Wärmedämmung sanierten Bauteilfläche nach Bauteilen und Gebäudeart. Zu erkennen ist der große Anteil an sanierter Dachfläche beziehungsweise obere Geschossdeckenfläche. Dieser liegt für SFH und MFH annähernd gleich bei etwa 57 %. Folglich wurde 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 MFH etwas mehr als 31 % mit einer besseren Dämmung versehen, wohingegen es bei den SFH nur etwa ein Viertel waren. Deutlich weniger Relevanz bei der nachträglichen Dämmung erhielt die Isolierung des Fußbodens beziehungsweise der Kellerdecke. Für diese Bauteile wurden bei beiden Gebäudearten nur circa 10 % mit einem besseren Wärmeschutz versehen.

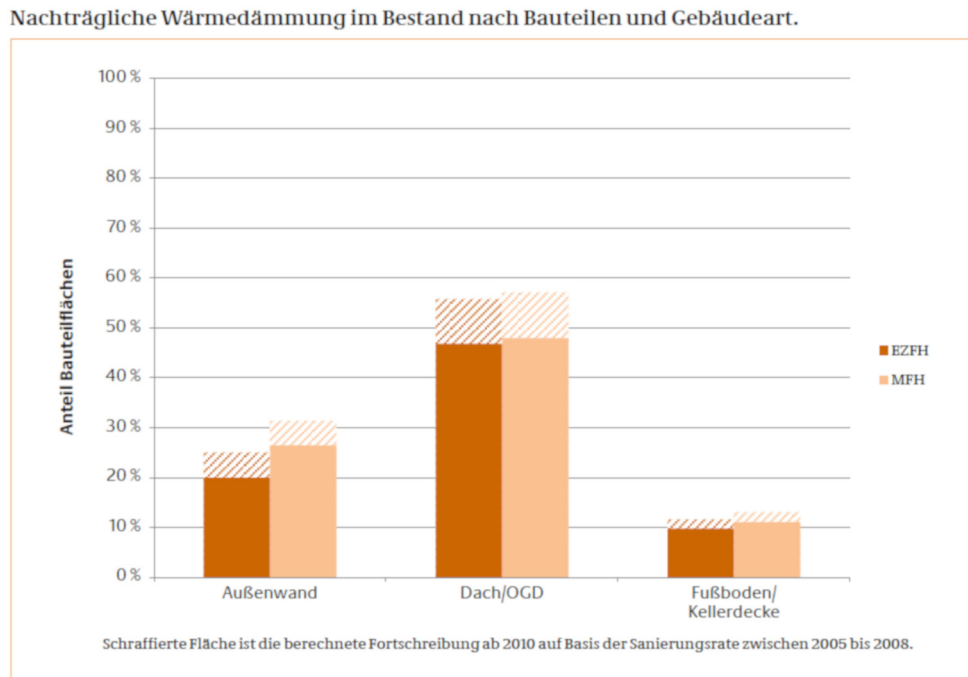


Abbildung 2.4: [2]

In Abbildung 2.4 fehlen die Angaben zum Sanierungsstandes der Fenster. Hierfür ist die Datenglage der Sanierung schwierig, allerdings bietet [2] eine Schätzung über den Bestand an Fenstern im Jahre 2015. Tabelle A.2 gibt verschiedene Verglasungsarten mit deren  $U_g$ -Werten sowie Anzahl und Anteil am gesamten Fensterbestand in Deutschland wieder. Wie in Gleichung 2.3 dargelegt, 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 darstellte, 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 stellt, obwohl dieses erst 10 Jahren vor Erhebung der Daten auf den Markt kam.

## 2.4 Optimierungsmodell

### **3 Stand der Technik**

## 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] 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](http://www.dena.de)
- [3] BUNDESREGIERUNG: 1. Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden: 1. WschVo. <https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeschutzverordnung>. Version: 1977
- [4] EICKE-HENNING, Werner: Kleine Geschichte der Dämmstoffe: "Erster Teil". In: *wksb* 2011 (2011), Nr. 65, S. 6–27
- [5] 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
- [6] 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](https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,GWZ_10_2,m,table). Version: 2014
- [7] 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](https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,GWZ_10_8,m,table). Version: 2014



# Anhang

## A Tabellen

### A.1 U-Werte nach TABULA

Baualtersklasse	SFH				MFH			
	Dach	Außenwand	Fenster	Boden	Dach	Außenwand	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	0,51	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.1:** Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile Dach, Außenwand, Fenster ( $U_w$ ) und Boden nach Gebäudeart und Baualtersklasse [in  $W/(m^2 \cdot K)$ ]

## A.2 Anzahl, Anteil und $U_g$ -Werte gängiger Verglasungsarten

Verglasungstyp	Anzahl [in Millionen]	Anteil am Bestand [in %]	$U_g$ -Wert [in $W/(m^2 \cdot K)$ ]
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.2:** Bestand an Fenstern in Deutschland, 2015 [2]

## **B Wichtiger Anhang**

## **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 16. Mai 2019

Jonas Baumgärtner