TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik, Prof. f. Gebäudeenergietechnik u. Wärmeversorgung

Clemens Felsmann, Juliane Schmidt

Auswirkungen der verbrauchsabhängigen Abrechnung in Abhängigkeit von der energetischen Gebäudequalität

Abschlussbericht

Dresden, Januar 2013

Adresse
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Energietechnik
TU Dresden
01062 Dresden

Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann
Telefon: 0351/463-32145
Fax: 0351/463-37888
E-Mail: clemens.felsmann@tu-dresden.de
http://www.tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Juliane Schmidt
Telefon: 0351/463-34557

E-Mail: juliane.schmidt1@tu-dresden.de

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung **1**

2 Literatur- und Dokumentenanalyse **3**
2.1 Nutzerverhalten . . . 3
2.2 Gebäudetypen und Baualtersklassen . . . 6
2.3 Verwendete Verbrauchsdaten . . . 10
2.3.1 Vorstellung des dieser Studie zu Grunde liegenden Datenmaterials 10
2.3.2 Anteile von Heizung und Trinkwassererwärmung am Gesamtenergieverbrauch in Abhängigkeit der Baualtersklassen . . . 11
2.3.3 Häufigkeitsverteilung normierter Verbrauchsfaktoren . . . 12

3 Heizkostenverteilung und energetische Gebäudequalität **17**
3.1 Anliegen und Methodisches Vorgehen . . . 17
3.2 Gebäudemodelle . . . 18
3.3 Die energetische Qualität der Gebäudehülle . . . 22
3.4 Randbedingungen der Simulation . . . 26
3.5 Durchführung der Simulation . . . 27
3.5.1 Basisvariante . . . 27
3.5.2 Veränderliches Nutzerverhalten . . . 28
3.5.3 Die Auswahl der Simulationsergebnisse . . . 34
3.6 Validierung der Modelle . . . 37
3.7 Korrelationen zwischen Nutzerverhalten und Energieverbrauch innerhalb der Baualtersklasse . . . 40
3.8 Ableitung des relativen Verschwendungs- bzw. Einsparpotenzials . . . 42

4 Rentabilität und Wirtschaftlichkeit der Heizkostenverteilung **45**
4.1 Vorbemerkungen . . . 45
4.2 Randbedingungen und Eingangsgrößen der Rentabilitäts- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen . . . 46
4.2.1 Verbraucherpreise . . . 46
4.2.2 Entwicklung des für die verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung relevanten Wohnungsbestandes in Deutschland . . . 48
4.2.3 Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Wärme in Deutschland 48
4.2.4 Emissionsfaktoren . . . 51
4.3 Wirtschaftlichkeit . . . 53
4.4 CO_2-Vermeidungskosten . . . 55
4.4.1 Allgemeines . . . 55
4.4.2 Berechnung der CO_2e-Vermeidungskosten und Emissionseinsparungen an Hand eines Beispieljahres . . . 57
4.4.3 Voraussichtliche CO_2e-Vermeidungskosten und Emissionseinsparung bis 2030 . . . 59

5 Zusammenfassung **64**

Literatur **66**

A Studien zur Heizkostenabrechnung **69**

B Randbedingungen für Gebäudemodelle **70**
B.1 Wandaufbauten 70
B.1.1 Baualtersklasse 6 70
B.1.2 Baualtersklasse 8 71
B.1.3 Baualtersklasse 9 72
B.1.4 Baualtersklasse 10, EnEV02 73
B.1.5 Baualtersklasse 10, EnEV09 74

1 Kurzfassung

Die Energiebilanz von Wohngebäuden wird im Wesentlichen vom Energiebedarf für Raumheizung und Trinkwassererwärmung bestimmt. Im Hinblick auf die Quantifizierung möglicher Energieeinspareffekte stehen neben den bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäude (Energiebedarf) und den anlagenseitigen Betriebsbedingungen (Energieeffizienz) vor allem die Auswirkungen des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch im Mittelpunkt des Interesses. So ist beispielsweise der Heizwärmebedarf für die Raumheizung vor allem durch die Bauweise des Gebäudes festgelegt und kann - unter der Annahme einer Standardnutzung und Standardwitterungsbedingungen - mit gängigen Rechenverfahren (z.B. DIN V 18599) bestimmt werden. Dennoch stellen sich - vor allem auch aufgrund des Nutzerverhaltens - im tatsächlichen Gebäudebetrieb oftmals vom berechneten Bedarf stark abweichende Verbrauchswerte ein. Auch ist aus Feldmessungen bekannt, dass baugleiche Gebäude sich in ihrem Energieverbrauch selbst dann deutlich unterscheiden, wenn diese zwar grundsätzlich ähnlich genutzt aber unterschiedlich betrieben werden. Der Nutzer hat also nachweislich sowohl bei der Raumheizung als auch in der Trinkwassererwärmung einen sehr starken Einfluss auf den Wärmeverbrauch. Mit steigender energetischer Qualität von Gebäudehülle und Anlagentechnik nimmt dieser Einfluss sogar noch zu. Mit Hilfe der verursachergerechten Heizkostenverteilung steht erfahrungsgemäß eine sehr effektive Maßnahme zur Verfügung, die durch eine gezielte Beeinflussung des Nutzerverhaltens eine Minderung des Heizwärmeverbrauchs und eine entsprechende CO_2-Emissionsminderung bewirken kann. Die Nutzerbeeinflussung erfolgt maßgeblich über die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heizkosten und äußert sich z.B. in einem eingeschränkten aber bedarfsgerechten Heizverhalten (reduzierte Raumtemperaturen oder Teilbeheizung der Wohnung), in einem veränderten Lüftungsverhalten sowie in reduzierten Trinkwarmwasserzapfungen. Entscheidend ist, ob und inwieweit der Nutzer durch eine verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung zu einer veränderten Betriebs- und Nutzungsweise, d.h. insbesondere zu einem bewussten Umgang mit Energie, animiert werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde das Nutzerverhalten anhand von realen Energieverbrauchswerten abgeschätzt. Mit Hilfe der zu Grunde liegenden Daten konnten desweiteren die Auswirkungen dieses Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch der Gebäude in Abhängigkeit von ihren energetischen Eigenschaften analysiert werden.

Zu diesem Zweck wurden die von verschiedenen Messdienstleistern erfassten Energieverbrauchsdaten von über 323.000 Gebäuden mit mehr als 3, 3 Mio. Wohnungen bzw. etwa 283 Mio. Quadratmetern Wohnfläche in anonymisierter Form zusammengefasst. Diese Fülle an Datenmaterial ist bisher einzigartig in Deutschland. Die gesammelten Daten wurden mit Hilfe ihrer Energieverbrauchsausweise ausgewertet und für die weitere Nutzung aufbereitet. Dies erfolgte getrennt nach Liegenschaftsgröße bzw. Anzahl der Nutzeinheiten und Baujahr bzw. energetischer Qualität der Gebäudehülle. Zusätzlich erfolgte eine Unterteilung in fernwärme- und kesselbeheizte Gebäude.

Zum Zweck einer systematischen Untersuchung der zu Grunde liegenden Zusammenhänge zwischen verbrauchsabhängiger Abrechnung und energetischer Gebäudequalität sowie im Hinblick auf mögliche Extrapolation der Ergebnisse wird die Gebäudesimulation als Untersuchungsmethode angewendet. Es wurden Gebäudemodelle mit einem Simulationsprogramm für thermische Gebäude- und Anlagensimulation erstellt. Bei der Erstellung der Modelle wurde ebenfalls nach Liegenschaftsgröße und Baualtersklasse

differenziert. Es entstanden vier verschiedene Gebäudegrößen die in jeweils fünf verschiedenen energetischen Standards ausgeführt wurden. Die Modelle konnten durch einen Abgleich mit den gesammelten Verbrauchsdaten validiert werden. Im Anschluss standen sie für die Abbildung des Nutzerverhaltens in Abhängigkeit der energetischen Qualität der Gebäudehülle zur Verfügung.

Aus den Simulationen lässt sich ableiten, dass mit verbessertem baulichen Wärmeschutz und damit sinkenden Energiebedarfskennwerten die Verschwendungsneigung der Nutzer steigt. Dies äußert sich darin, dass in energiesparenden Gebäuden mit mehreren Wohneinheiten bereits kleinere Abweichungen im Verhalten einzelner Nutzer (z.B. durch Wahl höherer Raumtemperaturen) einen deutlichen Einfluss auf die Verbrauchsspreizung zeigen. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heizkosten auch in Zukunft einen wichtigen Beitrag liefern wird, nicht nur im Sinne der Abrechnungsgerechtigkeit sondern auch im Hinblick auf die tatsächliche Umsetzung der mit dem energiesparenden Bauen beabsichtigten Energieeinsparpotenziale. Hilfreich sind hierbei die relativ niedrigen Investitionskosten für die Einrichtung einer verbrauchsabhängigen Abrechnung.

Aus den in zahlreichen Studien veröffentlichten Erfahrungen mit der verbrauchsabhängigen Heizkostenverteilung lassen sich Energieverbrauchsreduzierungen von durchschnittlich 20% infolge der Einführung und Umsetzung der Heizkostenverordnung ableiten. Diese Studie zeigt, dass bei neuen Gebäuden erheblich höhere Einsparung erreicht werden können. Auf dieser Grundlage konnten die seit Einführung der Heizkostenverordnung 1981 bis 2012 vermiedenen CO_2e-Emissionen mit bis zu 348 $\mathrm{Mt_{CO_2e}}$ beziffert werden.In Abhängigkeit von den zu Grunde gelegten Verbrauchseinsparungen durch die verursachergerechte Abrechnung können bis 2020 zusätzlich bis zu 95 $\mathrm{Mt_{CO_2e}}$ vermieden werden. Die CO_2-Vermeidungskosten[1] der verbrauchsabhängigen Abrechnung betragen beispielsweise 2010 -195 $\mathrm{EUR/t_{C0_2}}$. Damit stellen sie finanzielle Gewinne dar und sind im Vergleich zu anderen Energieeinsparmaßnahmen im Gebäudesektor als äußerst vorteilhaft zu bewerten.

[1] „Zusätzliche Kosten (bzw. Ersparnisse), die sich durch den Einsatz einer Technologie mit geringer Treibhausgasintensität gegenüber dem jeweils vorherrschenden Stand der Technik ergeben [...]“ [11]

2 Literatur- und Dokumentenanalyse

2.1 Nutzerverhalten

Die Kosten der Versorgung mit Wärme und Warmwasser sind gemäß der geltenden Heizkostenverordnung [4] vom Gebäudeeigentümer auf der Grundlage der Verbrauchserfassung auf die einzelnen Nutzer zu verteilen. Die verbrauchsabhängige Heizkostenverteilung dient nicht nur einer verursachergerechten Aufteilung der Kosten sondern animiert die Nutzer auch zu einem bewussten Gebrauch der Energie. Nachweislich liegt die zu erwartende Reduzierung des Energieverbrauchs durch die Einführung der verbrauchsabhängigen Abrechnung der Heizkosten bei durchschnittlich etwa 20%, was sich durch eine Vielzahl an internationalen Studien belegen lässt. Der Anhang A.1 enthält eine entsprechende Übersicht. Es ist davon auszugehen, dass die beobachteten Energieeinsparungen nahezu ausschließlich auf ein verändertes Nutzerverhalten zurückzuführen sind, da sorgloser Umgang mit Energie und verschwenderisches Handeln, z.B. durch überdurchschnittlich hohe Raumtemperaturen oder Dauerlüften, Mehrkosten verursachen. Dies ist vorallem im Zusammenhang mit den ständig steigenden Energiepreisen zu sehen. Der Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Gebäuden wurde in [34] ausführlich analysiert. Es wurde gezeigt, dass die Erhöhung der Raumtemperatur um 1 K einen Heizwärmemehrbedarf von etwa $10-20\%$ verursacht. Der absolute Mehrverbrauch wird zwar mit zunehmender energetischer Gebäudequalität immer kleiner, der relative Einfluss des Nutzers sowie die Verschwendungsneigung nehmen dagegen deutlich zu. Hierbei ist außerdem zu berücksichtigen, dass der Anteil der für die Raumheizung aufzuwendenden Heizkosten im Vergleich zur Trinkwassererwärmung mit zunehmender energetischer Qualität der Gebäudehülle abnimmt.

Zu den in Wohngebäuden vorliegenden Raumtemperaturen sind eine Vielzahl unterschiedlicher, sich z.T. aber widersprechender Aussagen bekannt. Den Darstellungen aus [34] folgend sind wohnungsbezogene mittlere Temperaturen von 20 °C nicht untypisch wobei für zentral beheizte Wohnungen tendenziell eine Vergleichmäßigung der Temperaturen in den verschiedenen Räumen (z.B. Wohnzimmer und Schlafzimmer) zu beobachten ist. Diese Auffassung spiegelt sich letztlich auch in den für die energetische Bewertung im Rahmen der EnEV anzusetzenden Temperaturwerten [29] wieder. Leider beziehen sich die messtechnisch erfassten Raumtemperaturen vielfach auf die im Rahmen einzelner Forschungsprojekte speziell ausgestatteten Gebäude, sind insofern weder ohne Weiteres auf den Gebäudebestand zu übertragen noch haben sie den Anspruch repräsentativ zu sein. In der folgenden Abbildung 2.1 sind Häufigkeitsverteilungen von gemessenen Raumtemperaturen innerhalb von Gebäuden verschiedenen Baualters dargestellt.

Den Kurven der von 1900 bis 2001 errichteten Gebäude liegen entsprechend der Tabelle 2.1 wesentlich mehr Objekte zugrunde, dafür allerdings weniger Messungen pro Gebäude. Im Gegensatz dazu ist die Kurve der neueren Gebäude ab 2002 deutlich schmaler und höher. Hier wurden die Temperaturen von nur wenigen Nutzeinheiten aufgenommen, aber im einzelnen Gebäude wesentlich mehr Messungen durchgeführt. Trotz der unterschiedlichen Datengrundlagen ist in der Abbildung 2.1 zumindest ersichtlich, dass sich mit zunehmender energetischer Qualität des Gebäudes eine Zunahme der mittleren Raumtemperaturen beobachten lässt. Die entsprechenden Mittelwerte gemessener

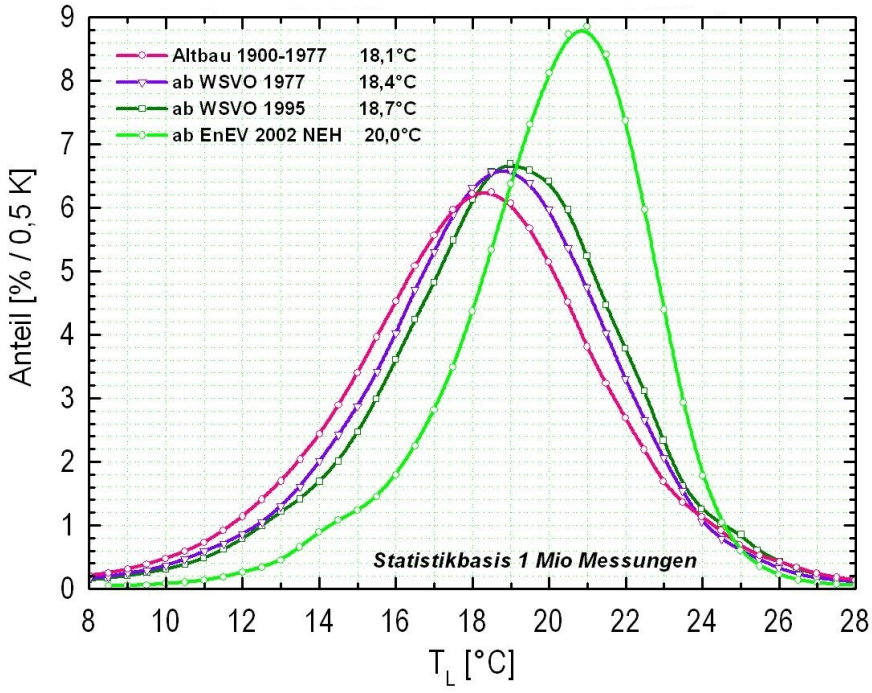


Abbildung 2.1: Häufigkeitsverteilungen von Raumtemperaturen aus Feldmessungen während der Heizperiode [36]

Lufttemperaturen sind den einzelnen Verteilungen in der Legende zugeordnet. So steigt die Raumtemperatur im Mittel von 18, 1 °C im Altbau vor 1977 auf 20 °C im Neubau ab 2002.

Tabelle 2.1: Datengrundlage der Raumtemperaturmessungen Abbildung 2.1

Baujahr	gemessene Objekte
Altbau 1900 - 1977	21000
ab WSchVO 1977	5400
ab WSchVO 1995	6300
ab EnEV 2002	70

Eine detaillierte Analyse von Raumtemperaturen in Mehrfamilienhäusern findet sich in [35]. Demnach ließen sich in zwei Drittel aller vermessenen Wohnräume Raumtemperaturen deutlich unter dem theoretischen Sollwert von 20 °C beobachten, wobei die Hälfte aller statistisch erfassten Temperaturwerte unterhalb einer Temperatur von 18...19 °C lag. Das typische Nutzerverhalten im Bezug auf die Raumtemperaturen scheint damit wesentlich energiebewusster zu sein, als in den Standardrandbedingungen der DIN V 18599 [29] angenommen. Dieselbe Quelle weist daraufhin, dass reale Energiekennwerte von Altbauten im statistischen Mittel deutlich niedriger ausfallen, als die energetische Bewertung nach EnEV vermuten lässt. Damit werden die allgemein zu erwartenden Einsparpotenziale durch:

- Komforteinschränkung infolge niedrigerer Wohnraumtemperaturen und
- Sanierungsmaßnahmen im baulichen und anlagentechnischen Bereich

tendenziell überschätzt, wenn ihnen eine Bedarfsanalyse nach EnEV zugrunde gelegt wird. Eine angemessene Einschätzung der oben gelisteten Einsparpotenziale kann infolge dessen vor allem im Altbaubereich nur nach Einzelfallprüfung der tatsächlichen Verbrauchssituation erfolgen. Diese Aussage wird auch durch die Energiekennzahluntersuchungen in [25] unterstützt. Weitere ausführliche Darstellungen zur Verteilung der Energiekennzahlen finden sich in [22] , [23], [37] und [38].

In einer weiteren Untersuchung [39] wurden Verbrauchsergebnisse von neu gebauten Niedrigenergiehauswohnanlagen mit geplanten Bedarfswerten verglichen. Grund dafür waren die Beschwerden der Bewohner über zu hohe Heizwärmeverbräuche, die auch für die planenden Ingenieure zunächst unerklärlich hoch erschienen. Im Verlauf der Untersuchung stellte sich heraus, dass im Wesentlichen das Nutzerverhalten für die zu hohen Verbräuche verantwortlich war. Unter den identifizierten Verhaltensweisen waren trotz eingehender Information der Bewohner zum effektiven Heiz- und Lüftungsverhalten ursächlich:

- Kipplüftung über mehrere Stunden und damit
- Transmissionswärmeverluste aus Nachbarräumen sowie ausgekühltes Mauerwerk,
- und falscher Umgang mit eingebauten mechanischen Lüftungssystemen

für den erhöhten Verbrauch von Heizwärme verantwortlich. Erst hohe Nachzahlungen konnten zu einem energiebewussteren Umgang innerhalb der Gebäude führen. Dies unterstreicht die These, dass vor allem in neugebauten Gebäuden mit niedrigem Energiebedarf die Verschwendungsneigung der Nutzer steigt.

In [25] wurden für Deutschland Energieverbräuche für Raumheizung und Trinkwassererwärmung in Wohnungen sowie die daraus entstehenden Kosten über einen Zeitraum von über 30 Jahren in anonymisierter Weise dokumentiert und ausgewertet. Diese Verbrauchsstatistik zeigt insgesamt eine Abnahme des Wärmeverbrauchs in deutschen Wohnungen über den betrachteten Zeitraum. Dafür werden vor allem:

- die bisher umgesetzten Energiesparmaßnahmen,
- eine verbesserte energetische Qualität der Gebäudehülle und
- eine erhöhte Sensibilität der Nutzer für den Energieverbrauch

verantwortlich gemacht. Mögliche Gründe für das Umdenken der Nutzer scheinen die in den vergangenen Jahren deutlich ansteigenden Rohstoffpreise zu sein, die trotz der sinkenden Verbräuche zu einem Kostenanstieg für Raumheizung und Trinkwassererwärmung geführt haben.

2.2 Gebäudetypen und Baualtersklassen

In Deutschland existiert ein Bestand an 18,03 Mio. Wohngebäuden mit 39,4 Mio. Wohnungen. Die Zahl der Wohnungen insgesamt, d.h. in Wohn- und Nichtwohngebäuden beträgt 40,2 Mio. (alle Angaben Stand 2009, [18]). Hinsichtlich der Zuordnung der Gebäude/Wohnungen zu Altersklassen gelten die aus [19] bekannten Zusammenhänge. Die Abbildungen 2.2 und 2.3 zeigen die entsprechenden Zuordnungen.

Abbildung 2.2: Baualtersverteilung der Wohngebäude (linke Balken) bzw. der Wohnungen in Wohngebäuden (rechte Balken) in Deutschland [19]

Die Abbildung 2.2 gibt einen Überblick über die Verteilung des Wohngebäudebestandes in Deutschland auf die entsprechenden Baualtersklassen. Die Balkenreihen stellen Häufigkeitsverteilungen von Gebäuden und Wohnungen dar und addieren sich jeweils zu 100 %. Im Allgemeinen scheint es keine großen Abweichungen zwischen den Gebäude- und Wohnungsverteilungen zu geben. Besonders in den Jahren 1949 bis 1978 ist der prozentuale Anteil der Wohnungen groß im Vergleich zu den Gebäuden. In diesen Baujahren ist die mittlere Anzahl der Wohnungen pro Gebäude höher als in den restlichen.

In der Abbildung 2.3 wird die Altersklassenverteilung der Wohnungen aus der Stichprobe aus [19] mit den Ergebnissen des Mikrozensus[2] von 2006 verglichen. Im Gegensatz zur vorhergehenden Abbildung beinhaltet Abbildung 2.3 auch Wohnungen in Nichtwohngebäuden. Während der Mikrozensus eine Haushaltserhebung ist, in der unter anderem Wohnungseigenschaften abgefragt werden, wurden innerhalb der Stichprobe aus [19] Gebäudeeigenschaften untersucht und Gebäudeeigentümer befragt. Zur

[2]Der Mikrozensus ist eine amtliche Repräsentativstatistik über mehrere Themen rund um Bevölkerung und Arbeitsmarkt. Sie wird seit 1957 (neue Bundesländer 1991) alljährlich durch die Befragung von 1 % der Privathaushalte erstellt und ist seit 1996 gesetzlich vorgeschrieben (Mikrozensusgesetz [7], [10]). Für die Personen, die in den per Zufallsstichprobe gewählten Haushalten leben, besteht Auskunftspflicht. Die Vorbereitung, Durchführung und Aufbereitung erfolgt durch das statistische Bundesamt bzw. die statistischen Landesämter. Der Mikrozensus dient als Hochrechnungs-, Adjustierungs- und Kontrollinstrument. Seine Ergebnisse werden in verschiedenen Publikationen des statistischen Bundesamtes veröffentlicht.

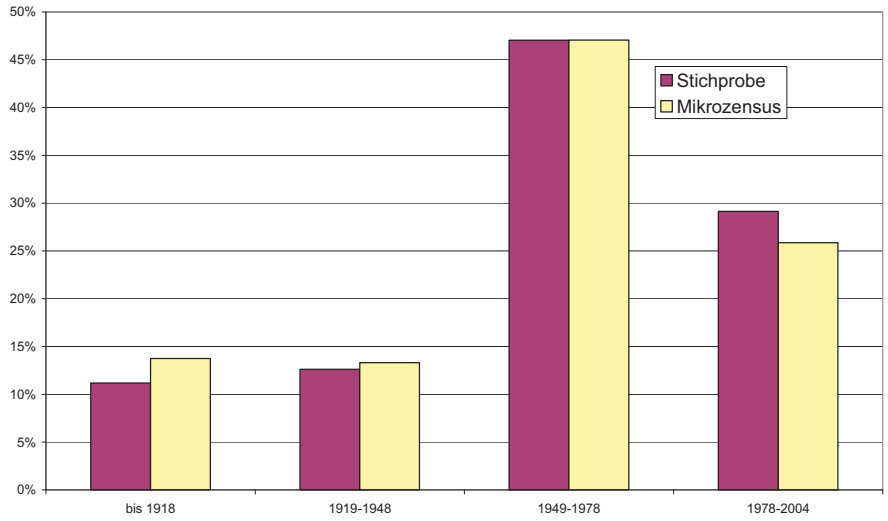


Abbildung 2.3: Baualtersverteilung der Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden mit Baujahr bis 2004 [19]

Erstellung der Grafik fand also eine Hochrechnung der Wohnungsanzahl an Hand der geprüften Gebäude statt. Deshalb müssen Stichprobe und Mikrozensus nicht 100 %ig übereinstimmen. Trotzdem decken sich die Ergebnisse beider Erhebungen recht gut, so dass sie insbesondere für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in Kapitel 4 weiter verwendet werden sollen.

Tabelle 2.2 enthält eine zusammenfassende Darstellung der den obigen Abbildungen zu Grunde gelegten Zahlenwerte zum gesamten Wohnungsbestand in Deutschland. Im Mittel ergibt sich eine Anzahl von 2, 2 Wohnungen je Gebäude. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die bisherigen Statistiken zum Bestand alle Wohngebäude einschließen. Allerdings sind Einfamilienhäuser (EFH) für die verbrauchsabhängige Heiz- und Wasserkostenverteilung nicht relevant. Es handelt sich hierbei um 11, 37 Mio. Gebäude mit nur einer Wohneinheit [18]. Außerdem bleiben die nicht zentral beheizten Mehrfamilienhäuser (MFH) von der Heizkostenverordnung [4] unberührt. Ebenso fällt von den ca. 7 Mio. Wohnungen in Zweifamilienhäusern (ZFH) nur der Anteil unter die Heizkostenverordnung, bei dem beide Wohnungen durch Nichteigentümer genutzt werden. Auf diese beiden Gruppen (nicht zentral beheizte MFH und nicht fremdbewohnte ZFH) entfallen in etwa 8 Mio. Nutzeinheiten. Für die späteren Analysen und Betrachtungen zu Energieeinsparpotenzialen und Wirtschaftlichkeit werden die in Tabelle 2.2 angegebenen Zahlenwerte für den gesamten Gebäude- bzw. Wohnungsbestand um jeweils 19, 37 Mio. vermindert. Dies führt zu einem für die Heizkostenabrechnung relevanten Marktpotenzial von rund 20 Mio. Wohnungen, wobei das Marktvolumen, also die tatsächlich abgerechneten Nutzeinheiten, sich momentan auf ca. 18 Mio. beläuft (Auskunft: Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung).

Der hier durchgeführten Analyse liegen die Verbrauchsdaten von etwa 0, 3 Mio. Gebäuden bzw. 2, 95 Mio. Nutzeinheiten mit Heiz- und Wasserkostenabrechnung und 0, 38 Mio. Nutzeinheiten mit Heizkostenabrechnung zugrunde. Der Jahreswärmeverbrauch dieser insgesamt rund 3, 34 Mio. Nutzeinheiten beträgt etwa 147, 7 PJ bzw. 41 TWh. Unter Berücksichtigung der Informationen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi [15]) zum Energieverbrauch der Haushalte entspricht

Tabelle 2.2: Baualtersverteilung des Wohnungsbestands (in Anlehnung an [18] und [19])

Baualter	prozentualer Anteil			Anzahl absolut (in Mio)	
	Gebäude	Wohnungen [19]	Wohnungen [20]	Gebäude	Wohnungen
bis 1918	12,1%	10,7%	12,5%	2,18	4,20
1919-1948	14,2%	12,3%	13,4%	2,56	4,83
1949-1957	10,1%	11,1%	46,7%	1,82	4,35
1958-1968	15,9%	18,2%		2,86	7,18
1969-1978	13,9%	16,9%		2,50	6,67
1979-1983	7,5%	7,5%	27,4%	1,35	2,94
1984-1994	10,1%	10,6%		1,82	4,16
1995-2001	9,9%	8,6%		1,78	3,37
2002-2004	3,1%	2,0%		0,56	0,78
ab 2005	3,3%	2,3%	-	0,59	0,90
Gesamt	100,0%	100,0%	100,0%	18,03	39,39

dies etwa 7% der insgesamt im Sektor Haushalt verbrauchten Wärme[3]. Bei Annahme einer linearen Extrapolation der bisher berücksichtigten 3,34 Mio. Nutzeinheiten auf das für die Heizkostenerfassung derzeit relevante Marktpotenzial von 20 Mio. Nutzeinheiten ergäbe sich ein theoretischer Wärmeverbrauch von etwa 884 PJ, was wiederum rund 43% der insgesamt im Sektor Haushalt verbrauchten Wärme entsprechen würde.

Bestehende Gebäude werden anhand:

- ihrer baulichen Konstruktion bzw. energetischen Kennwerte und
- der politischen sowie sozial- und kulturhistorischen Rahmenbedingungen ihrer Entstehungszeit

in Baualtersklassen (BAK) zusammengefasst. Da es in Deutschland keine einheitliche Definition oder genormte Festlegung der Baualtersklassen gibt, findet man in der Literatur unterschiedliche zeitliche Einteilungen. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an der in Tabelle 2.3 dargestellten Unterteilung in 10 Baualtersklassen. Sie ist [2] entnommen und entstammt einem Forschungsprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU [1]) aus dem Jahr 2005.

Um die für die jeweilige Zeit typischen Wandaufbauten nachzubilden, wurden verschiedene Gebäudetypologien Deutschlands verglichen. Die Dortmunder Gebäudetypologie [20] enthält 43 Hausdatenblätter. Diese enthalten neben den energetischen Kennwerten auch Angaben zu Baustoffen und Schichtdicken der Außenbauteile von Gebäuden im unsanierten Zustand. Der Gebäudebestand wird hier wieder in 10 Baualtersklassen unterteilt, die allerdings nicht genau denen der DBU entsprechen und sich teilweise überschneiden:

- A: Fachwerk und Mauerwerk bis 1870 (DBU: BAK 1 und 2)

[3] Endenergieverbrauch für Wärme in deutschen Privathaushalten für das Jahr 2010: 2075 PJ [15]

Tabelle 2.3: Einteilung der Baualtersklassen nach DBU [2]

Baualtersklasse	Periode	Anmerkungen, historische Einordnung
BAK 1	vor 1835	Bauweise stark handwerklich geprägt, Fachwerkgebäude
BAK 2	1835 - 1870	Industrialisierung, Mauerwerksbau in Wohngebäuden
BAK 3	1871 - 1918	Verstädterung/ Gründerzeit, Repräsentative Wohngebäude des Bürgertums und Durchsetzen des Eisenbetonbaus in Städten
BAK 4	1919 - 1933	Kriegs- und Nachkriegsjahre, Materialmangel (Kohle, Stahl), sparsame Konstruktionen, einfache Putz- und Ziegelfassaden, „Goldene Zwanziger“, Flachdach im Wohnungsbau
BAK 5	1934 - 1949	Vorkriegs- und Kriegsjahre, Industrialisierungsansätze weichen wieder der handwerklichen Fertigung
BAK 6	1950 - 1964	Materialmangel in Nachkriegsjahren, später Wiederaufbau, Rationalisierung im Bauwesen, mindere Bauqualität von großen Wohnquartieren, Stahlbetondecken, „Bauhaus“-Stil
BAK 7	1965 - 1976	Wirtschaftswunder, Einscheibenisolierglasfenster, Plattenbauweise aus Beton (DDR), minimale Anforderungen an Wärme- und Schallschutz
BAK 8	1977 - 1994	**WSchVO 77** und **82**, Anforderungen an den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenbauteilen, verstärkter Einsatz von Dämmstoffen, erste Modernisierungswelle (Entstehung erheblicher bauphysikalischer Probleme), erste Baustoffskandale, erste Ökosiedlungen
BAK 9	1995 - 2001	**WSchVO 95**, Anforderungen an den Jahresheizwärmebedarf
BAK 10	2002 - heute	**EnEV 02/04/07/09**, Anforderungen an den Jahresprimärenergiebedarf

- B: Mauerwerk, 1850 bis 1918 (DBU: BAK 2 und 3)
- C: 1919 bis 1948 (DBU: BAK 4 und 5)
- D: 1949 bis 1957 (DBU: BAK 6)
- E: 1958 bis 1968 (DBU: BAK 6 und 7)
- F: 1969 bis 1978 (DBU: BAK 7 und 8)
- G: 1979 bis 1983 (DBU: BAK 8)
- H: 1984 bis 1995 (DBU: BAK 8)
- I: 1996 bis 2001 (DBU: BAK 9)
- J: ab 2002 (DBU: BAK 10)

Innerhalb dieser Baualtersklassen sind Hausdatenblätter für typische Vertreter der:

- Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH),
- Einfamilien-Reihenhäuser (RH) sowie der
- kleinen (MFH) und
- großen Mehrfamilienhäuser (GFH)

mit ihren Baujahren und wichtigsten konstruktiven sowie energetischen Merkmalen aufgeführt. Dazu gehören die Aufbauten der Bauteile der Systemgrenze zwischen beheiztem Innenraum und Außenluft bzw. unbeheizten Räumen (Außenwände, Kellerdecken, Dachschrägen, Oberste Geschossdecken und Fenster). Ihre jeweils vorherrschendsten Baustoffe und Schichtdicken sowie die sich daraus ergebenden Wärmedurchgangskoeffizienten werden aufgelistet. Die Tabelle 2.4 zeigt die zugehörigen spezifischen Energiekennwerte (Nutzenergie für Heizung) bezogen auf die Wohnfläche der Gebäude. Allerdings gibt die Dortmunder Gebäudetypologie [20] nur Daten für die bis 1983 erbauten Gebäude an.

Tabelle 2.4: Energiekennwerte (Nutzenergie) typischer Gebäude in Dortmund im historischen Zustand in $\mathrm{kWh}/(\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{a})$ nach Dortmunder Gebäudetypologie [20]

Gebäudetyp	A	B	C	D	E	F	G
Baujahr	-1870	1850-1918	1919-48	1949-57	1958-68	1969-78	1979-83
EFH	272	250	282	203	197	142	105
RH	254	251	201	203	147	112	74
MFH	248	178	224	169	186	135	106
GFH	248	169	170	149	161	130	93

2.3 Verwendete Verbrauchsdaten

2.3.1 Vorstellung des dieser Studie zu Grunde liegenden Datenmaterials

Die hier durchführten Untersuchungen und Betrachtungen zur verbrauchsabhängigen Abrechnung in Abhängigkeit von der energetischen Gebäudequalität beruhen auf zahlreichen aus realen Messdaten empirisch gewonnenen Erkenntnissen. Die Mehrheit der in der Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung vertretenen Messdienstunternehmen hat Messdatensätze zum Energieverbrauch für Raumheizung und Trinkwassererwärmung in komprimierter und anonymisierter Form zur Verfügung gestellt. Aus diesen umfangreichen Datensammlungen wurde im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen ein einheitlicher und systematisierter Datenpool erstellt. Diese Sammlung beinhaltet Verbrauchsmessungen von insgesamt $2,95$ Mio. abgerechneten Nutzeinheiten in ganz Deutschland. Zusätzlich stehen Daten von Liegenschaften zur Verfügung, in denen nur der Heizwärmeverbrauch jedoch keine Trinkwassererwärmung erfasst wurde. Dieser Datensatz umfasst $0,38$ Mio. Nutzeinheiten. Im Bereich der Verbräuche für die Heizung können also insgesamt $3,34$ Mio. Daten ausgewertet werden. Von den abgerechneten Nutzeinheiten sind rund $25,1\,\%$ fernwärme- und die restlichen $74,9\,\%$ kesselbeheizt.

Die verwendeten Energiekennzahlen sind den auf Grundlage des Energieverbrauchs erstellten Energieausweisen der Gebäude entnommen. Aus den Angaben im Energieausweis ist weiterhin ersichtlich, ob Sanierungsmaßnahmen am Gebäude erfolgt sind. Gebäude mit Voll- oder Teilsanierung wurden aussortiert, da diese im Hinblick auf den Energieverbrauch nicht mehr eindeutig einer Baualtersklasse zugeordnet werden können. Das eigentliche Baujahr ist dann zwar immer noch dasselbe, aber der Verbrauch ist z.B. bei einem Austausch der Fenster deutlich reduziert gegenüber den Originalgebäuden dieser Klasse. Im Wesentlichen sollen Gebäude der Baujahre vor 1994 ausgeschlossen werden, deren spezifische Energiekennwerte sich durch Sanierung modernen Gebäuden ab 1995 substantiell annähern, um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Baualtersklassen dem tatsächlichen Baualter der Gebäude entsprechen.

Der entstandene Datensatz ist in seiner bisherigen Zusammenstellung und statistischen Stärke einzigartig, und wird erstmalig in dieser Form veröffentlicht.

Mit Hilfe der auf die Wohnfläche bezogenen, flächenspezifischen Verbrauchskennzahlen wird später das zu erstellende Gebäudemodell validiert. Da sie den typischen Energiekonsum der unterschiedlichen Gebäudeklassen abbilden, dienen die Verbrauchsdaten als Vergleichsmaßstab für die aus dem Modell gewonnenen Verbräuche.

2.3.2 Anteile von Heizung und Trinkwassererwärmung am Gesamtenergieverbrauch in Abhängigkeit der Baualtersklassen

Mit höherem baulichen Wärmeschutz sinkt der Gesamtwärmeverbrauch des Gebäudes. Das ist vor allem auf den niedrigeren Heizwärmebedarf von hochwärmegedämmten Gebäuden zurückzuführen. Der Wärmeverbrauch für die Erwärmung des Trinkwassers liegt jedoch unabhängig von der Gebäudequalität bei rund 26 $\mathrm{kWh/(m^2 \cdot a)}$ [4]. Daraus folgt, dass der relative Anteil der Trinkwassererwärmung am Gesamtenergieverbrauch mit zunehmender energetischer Qualität der Gebäudehülle steigt. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 2.4 zu sehen, die mit Hilfe der Datensammlung der Messdienstunternehmen erstellt wurde. Sie zeigt die prozentualen Anteile der Warmwasserbereitung am Gesamtwärmeverbrauch von Gebäuden in Abhängigkeit von Baujahr und Anzahl der Nutzeinheiten. Während der relative Anteil der Trinkwassererwärmung am Gesamtwärmeverbrauch innerhalb der Baualtersklassen nicht von der Anzahl der Wohnungen abhängig zu sein scheint, stellt sich eine deutliche Korrelation zum Baualter der Gebäude dar. Zur Orientierung sind die Mittelwerte der Baualtersklassen angegeben. So macht die Warmwasserbereitung im Altbau vor 1977 durchschnittlich $16,6\,\%$ des Heizwärmeverbrauchs aus und in Gebäuden mit Dämmstandard EnEV 2002 immerhin $27,9\,\%$. In Einzelfällen kann der Anteil der Trinkwassererwärmung im Neubau auf bis zu $50\,\%$ steigen. Demzufolge kommt den durch die Trinkwassererwärmung entstehenden Kosten zukünftig eine immer größere Bedeutung zu. Die Ergebnisse aus [25] untermauern diese Feststellung. Dort wird darauf hingewiesen, dass für eine zukünftige verursachergerechte Warmwasserabtrennung die Installation von Wärmezählern erforderlich sein wird.

[4] Dieser Wert entstammt der Datensammlung der Messdienstunternehmen. Es handelt sich um einen nach Wohnflächen und Nutzeinheiten gewichten Mittelwert.

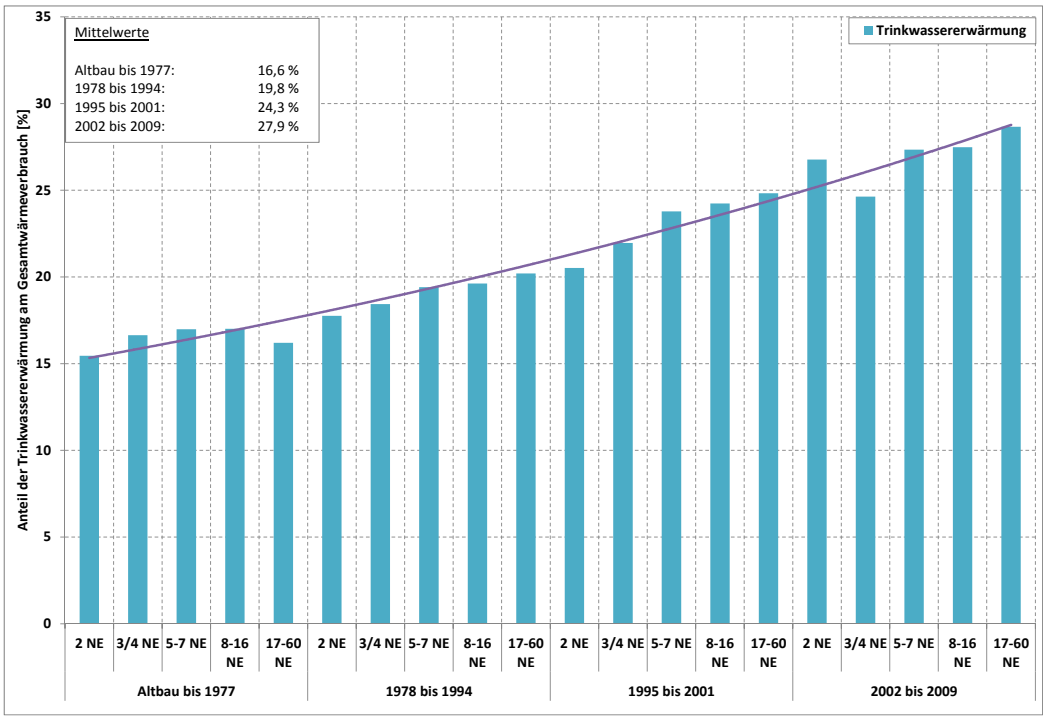


Abbildung 2.4: Anteil der Trinkwassererwärmung am Gesamtenergiebedarf nach Baualtersklassen und Gebäudegröße aus dem Datenmaterial der Messdienstunternehmen

2.3.3 Häufigkeitsverteilung normierter Verbrauchsfaktoren

Abgesehen von den unterschiedlichen Energieverbräuchen, die aus dem Nutzerverhalten resultieren, unterscheiden sich die Verbräuche innerhalb einer Liegenschaft schon infolge von bauphysikalischen Gegebenheiten. Aus unterschiedlichen Außenwandanteilen/ Giebelflächen, Dach-, Decken- und Kellerdeckenanteilen sowie Orientierungen und den daraus resultierenden Wärmegewinnen, ergeben sich andere Wärmebedarfswerte. Es entsteht eine Variation des Verbrauchs innerhalb der einem Gebäude zugehörigen Nutzeinheiten um einen Mittelwert. Aus einer Häufigkeitsverteilung der auf einen Gebäudemittelwert genormten Einzelverbräuche lässt sich die Spreizung ablesen. Für die Darstellung der Häufigkeitsverteilungen wird für jede Nutzeinheit ein normierter Verbrauchsfaktor $\widehat{v}_j$ berechnet. Dieser ist in der VDI 2077 [24] wie folgt definiert:

$$\widehat{v}_j = \frac{v_j}{\overline{v}} \tag{2.1}$$

Dabei ist v_j der wohnflächenbezogene Verbrauchswert einer Nutzeinheit und $\overline{v}$ der arithmetische Mittelwert der wohnflächenbezogenen Verbrauchswerte der einzelnen

Nutzeinheiten eines Gebäudes. Dieser Mittelwert wird mit Hilfe der Anzahl der Nutzeinheiten des Gebäudes n nach bekannter Formel gebildet:

$$\overline{v} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} v_j \tag{2.2}$$

Aus den Energiekennzahlen der Messdienstunternehmen können mit Hilfe der eben vorgestellten Gleichungen die normierten Verbrauchsfaktoren nach VDI 2077 [24] gebildet werden. Erstellt man daraus eine Häufigkeitsverteilung, entstehen Kurven, mit denen die Verbrauchsspreizung bspw. innerhalb der nach Tabelle 2.5 klassifizierten Gruppen grafisch dargestellt werden können. Solche Häufigkeitsverteilungen sind in der Abbildung 2.5 für die kleinen Gebäude mit 2 Nutzeinheiten zu sehen. Entlang der x-Achse sind die normierten Verbrauchsfaktoren wiederum in Klassen zusammengefasst. Die Intervalle werden in Richtung der steigenden Verbrauchsfaktoren immer größer. Im Bereich von 0 bis ≤ 1 ist die Achseinteilung in 0,1er Schritten gewählt, zwischen < 1 und ≤ 2 in 0,25er Schritten und danach sind die Verbrauchsfaktoren in 0,5er Schritten gruppiert. Diese Einteilung ist im Wesentlichen der besseren Übersichtlichkeit der Darstellung zuzuschreiben. In den vorliegenden Daten gibt es eher wenige Nutzeinheiten mit normierten Verbrauchsfaktoren größer 2, so dass dieser Bereich nicht unnötig aufgeweitet werden muss.

Tabelle 2.5: Festlegung zur Gebäudeklassifizierung

Zeichen	Bedeutung	
	Energieform	
FW	Fernwärme	
K	Kessel	
	Baualter	
0	Altbau vor 1977 (unmodernisiert)	BAK 1-7
1	1978 - 1994 (WSchVO 77)	BAK 8
2	1995 - 2001 (WSchVO 95)	BAK 9
3	2002 - 2008 (EnEV 02)	BAK 10
4	ab 2009 (EnEV 09)	BAK 10
	Anzahl der Nutzeinheiten im Gebäude	
K	2	
M	3 - 4	
G	5 - 7	
SG	8 - 16	
SSG	17 - 60	

Ein Verbrauchsfaktor $\widehat{v}_j = 1$ bedeutet, dass der Verbrauch der Nutzeinheit j dem Mittelwert seiner Klasse entspricht. Dementsprechend gehören alle Verbrauchsfaktoren, die links von 1 liegen zu Wohnungen mit einem geringeren und alle rechts der 1 zu einer Wohnung mit einem höheren Verbrauch. Die Kurven der Verbrauchsfaktoren bilden einen Peak zwischen 1 und 1,25. Die Häufigkeitsverteilung der Klasse FW3K (Fernwärmeversorgte Zweifamilienhäuser, die zwischen 2001 und 2008 errichtet wurden) ist gegenüber den anderen Kurven deutlich inhomogener und weist keinen eindeutigen

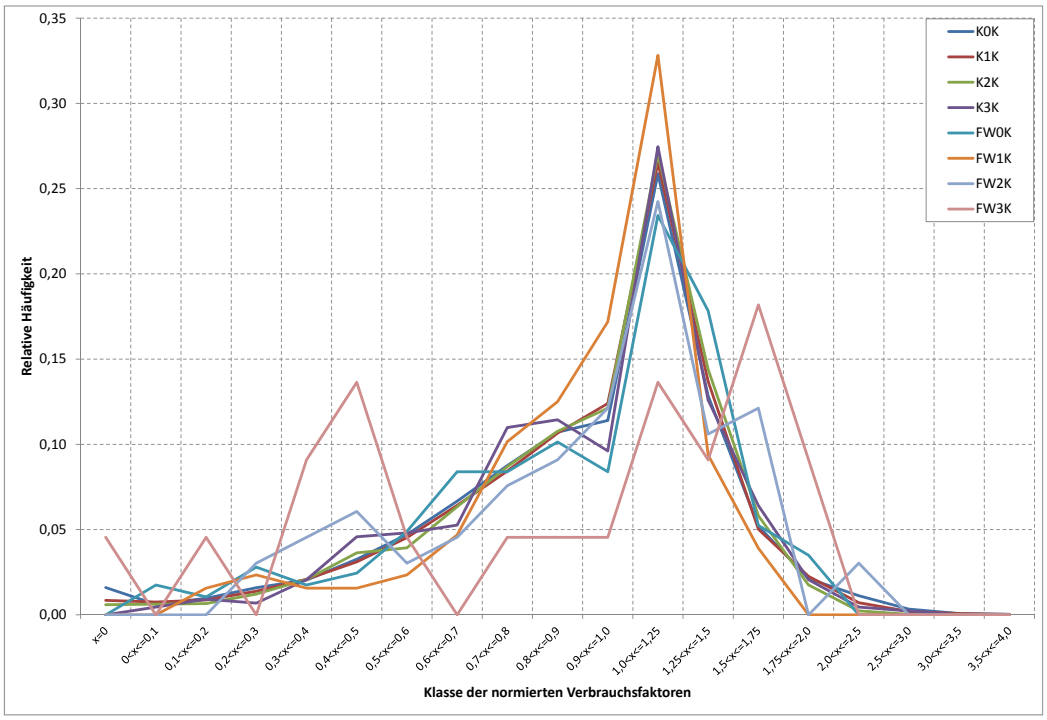


Abbildung 2.5: Häufigkeitsverteilung normierter Verbrauchsfaktoren für Heizung und Warmwasser aus dem Datenmaterial der Messdienstunternehmen (kleine Gebäude)

Peak auf. Dies ist in der Tatsache begründet, dass diese Gruppe nur schwach besetzt und daher statistisch nicht belastbar ist.

Die restlichen Gruppen sind geordnet nach Gebäudegrößen in den Abbildungen 2.6, 2.7, 2.8 und 2.9 dargestellt. Da hinter den Klassen, der in diesen Diagrammen liegenden Häufigkeitsverteilungen deutlich mehr abgerechnete Nutzeinheiten stehen, sind sie alle wesentlich gleichmäßiger. Wie weiter oben schon erwähnt, setzen sich die Daten aus rund 74, 9 % kessel- und 25, 1 % fernwärmebeheizten Wohnungen zusammen.

Die Verbrauchsspreizungen sind ein wichtiges Werkzeug bei der Anpassung des virtuellen Nutzerverhaltens der zu erstellenden Simulationsmodelle. Das Nutzerverhalten wird wohnungsweise so angepasst, dass die hier gezeigten Häufigkeitsverteilungen mit den normierten Verbrauchsfaktoren der Heizwärmeverbräuche, die das Modell liefert, annähernd nachgebildet werden können.

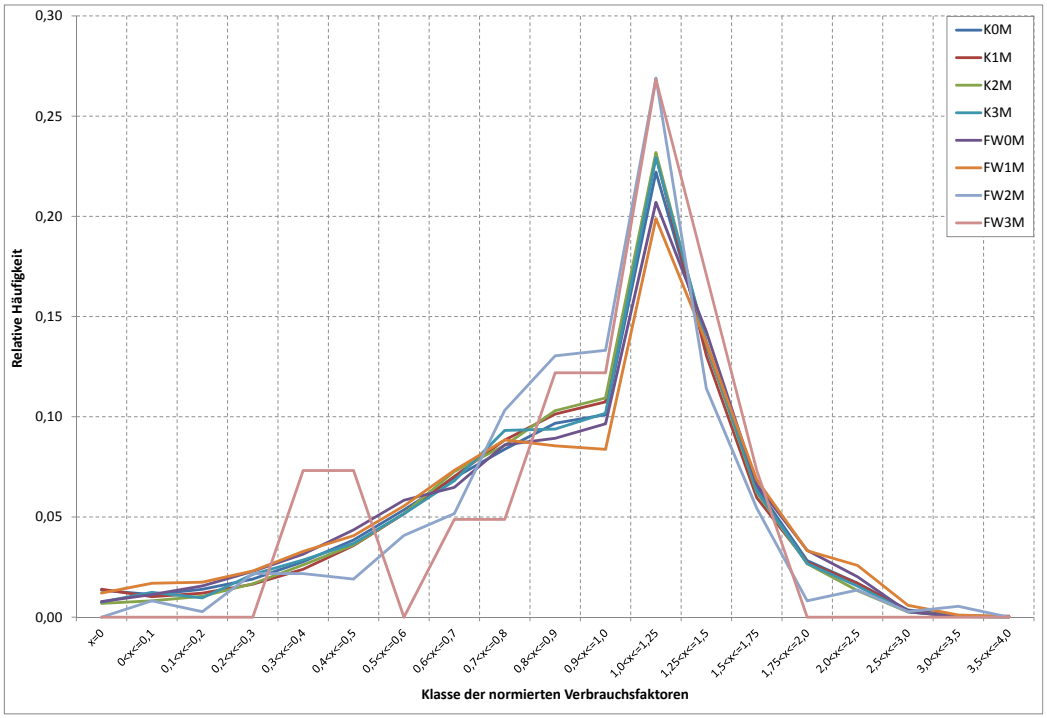


Abbildung 2.6: Häufigkeitsverteilung normierter Verbrauchsfaktoren für Heizung und Warmwasser aus dem Datenmaterial der Messdienstunternehmen (mittelgroße Gebäude)

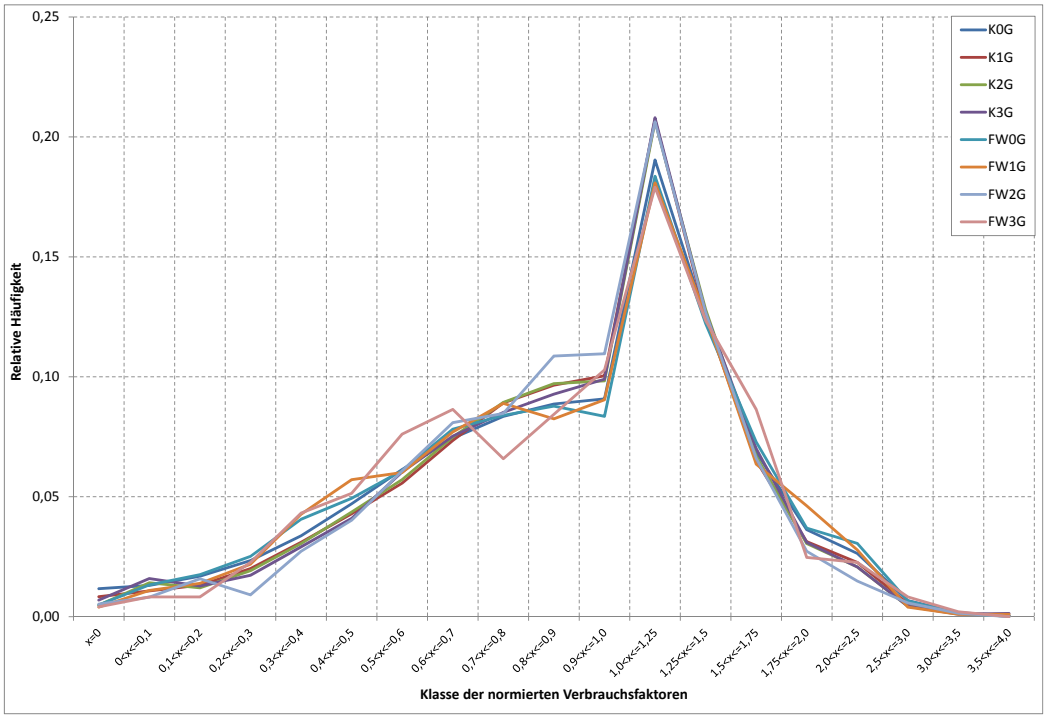


Abbildung 2.7: Häufigkeitsverteilung normierter Verbrauchsfaktoren für Heizung und Warmwasser aus dem Datenmaterial der Messdienstunternehmen (große Gebäude)

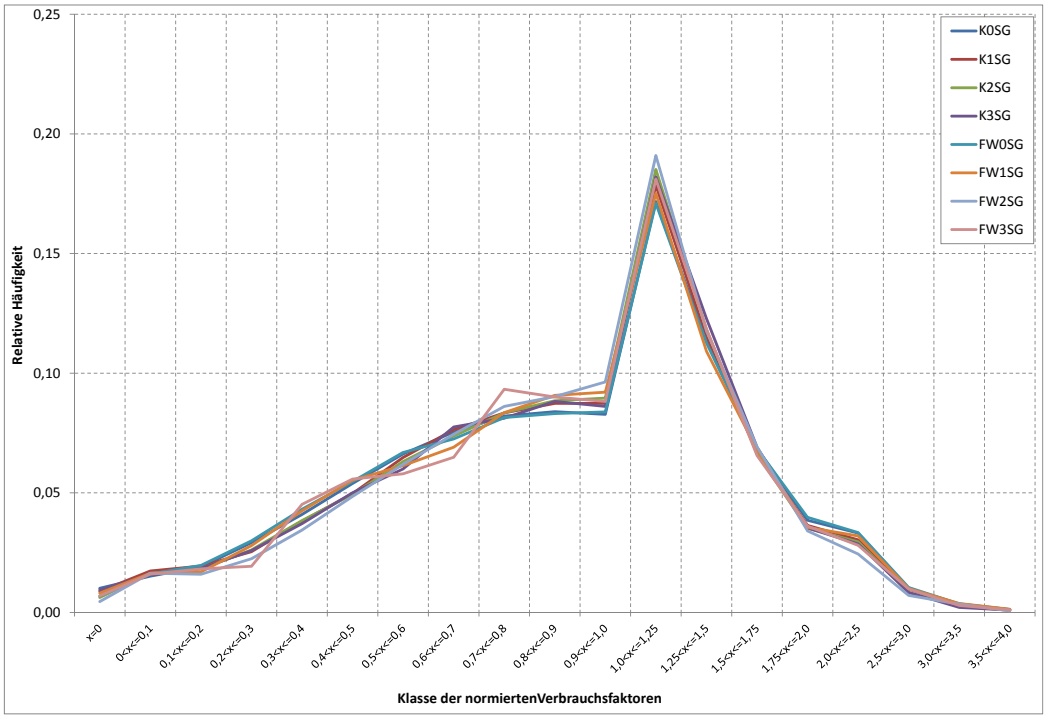


Abbildung 2.8: Häufigkeitsverteilung normierter Verbrauchsfaktoren für Heizung und Warmwasser aus dem Datenmaterial der Messdienstunternehmen (sehr große Gebäude)

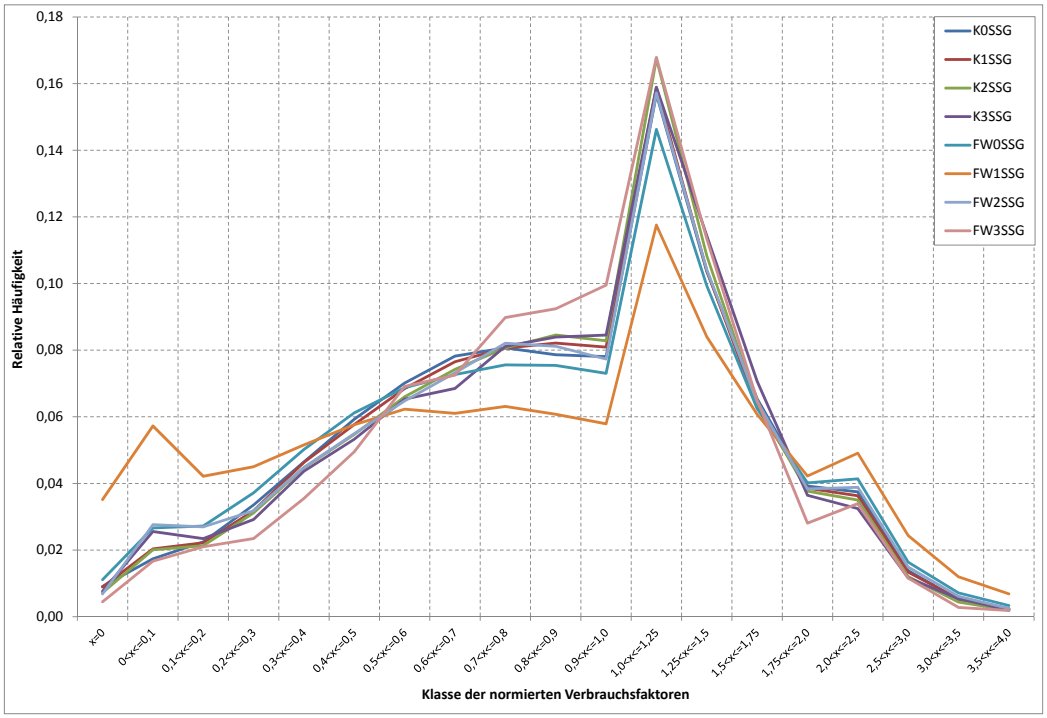


Abbildung 2.9: Häufigkeitsverteilung normierter Verbrauchsfaktoren für Heizung und Warmwasser aus dem Datenmaterial der Messdienstunternehmen (sehr sehr große Gebäude)

3 Heizkostenverteilung und energetische Gebäudequalität

3.1 Anliegen und Methodisches Vorgehen

Die Energiebilanz von Gebäuden ist maßgeblich geprägt durch den für Raumheizung und Trinkwassererwärmung erforderlichen Energieaufwand. Im Hinblick auf die Quantifizierung möglicher Energieeinspareffekte stehen neben den bekannten bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäude vor allem die Auswirkungen des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch im Mittelpunkt des Interesses. Dazu ist es zunächst erforderlich dieses Nutzerverhalten möglichst realitätsnah abzubilden. Mit Hilfe der Gebäude- und Anlagensimulation ist es möglich, in relativ kurzer Zeit (gegenüber der Erfassung von Felddaten über mehrere Jahre) reproduzierbare Daten zu generieren. In der Realität störende Einflüsse sowie Messunsicherheiten spielen in der Simulation keine Rolle. Dafür können gezielt feste Randbedingungen (Wetter, interne Wärmegewinne, Gebäudehülle, usw.) gesetzt werden, um nur die Größen zu variieren, die der Nutzer beeinflussen kann. Im Wesentlichen sind das:

- die Raumsolltemperatur,
- der Fensterluftwechsel und
- der Trinkwarmwasserbedarf.

Diese Größen werden im Rahmen der Simulation gebäude- und wohnungsweise iterativ verändert, um die aus dem veränderten Nutzerverhalten resultierenden Energieverbräuche mit den vorliegenden Messdaten abzugleichen. Die unterschiedlichen Heizwärmeverbräuche ermöglichen einerseits im Vergleich mit den spezifischen Energiekennzahlen aus den Messdaten die Validierung des Modells, andererseits ergeben sich daraus Verbrauchsspreizungen, die wiederum zur Anpassung der Nutzungsrandbedingungen verwendet werden. Auf diese Weise wird Schritt für Schritt das Nutzerverhalten in Abhängigkeit von der energetischen Qualität der Gebäude identifiziert. Mit diesen Informationen soll eine Extrapolation des Verhaltens und der daraus zu erwartenden zukünftigen Verbräuche neuer Gebäude (EnEV09 bzw. deren geplante Fortscheibung) ermöglicht werden.

Ein besonderes Interesse besteht darin, den relativen Einfluss des individuellen Nutzerverhaltens auf den tatsächlichen Energieverbrauch kenntlich zu machen. Dies ist z.B. wichtig, weil sich auch bei baugleichen Gebäuden der Energieverbrauch aufgrund des unterschiedlichen Nutzerverhaltens z.T. deutlich unterscheidet. Dies führt womöglich nicht nur zu Fehlinterpretationen bei der Auswertung und dem Vergleich der auf den Energieverbrauch bezogenen Energieausweise sondern erzeugt auch Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Energieverbrauch eines Gebäudes und seinem errechneten Energiebedarfswert. Aus entsprechenden Untersuchungen [**?**] ist bekannt, dass in Bestandsgebäuden der Energieverbrauchswert deutlich kleiner ist als der Normbedarf wohingegen bei energiesparenden Gebäuden (z.B. nach Sanierung oder bei Neubau) der Verbrauch tendenziell höher ist als der berechnete Normbedarf. Dem sorglosen Umgang mit Energie in Gebäuden mit geringem Energiebedarf (und erwarteten geringen Energiekosten) könnte durch eine verbrauchsabhängige Abrechnung der Heizkosten begegnet werden. Die nachfolgenden Untersuchungen sind geeignet, das diesbezügliche Einsparpotenzial moderner, d.h. energiesparender Gebäude, zu quantifizieren.

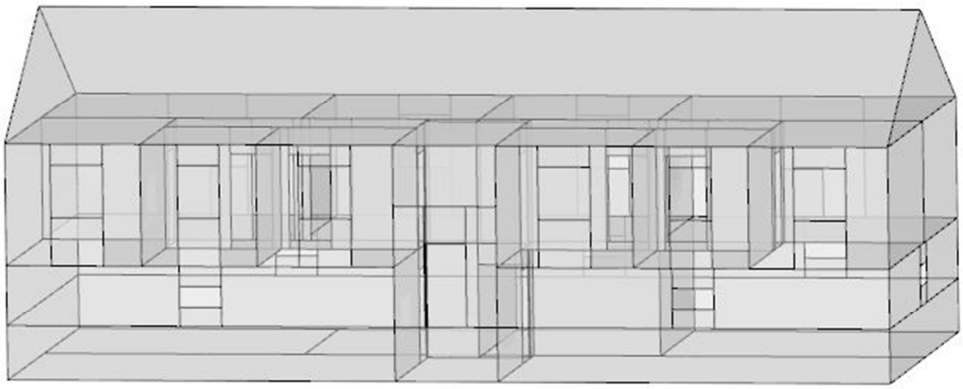
Die Simulationen erfolgen mit Hilfe des dynamischen Gebäude- und Anlagensimulationsprogramms TRNSYS-TUD. Bei diesem Programm handelt es sich um eine an der Technischen Universität Dresden umfassend erweiterte Version des kommerziellen Gebäudesimulationsprogramms TRNSYS [26], [33]. Das Programm erlaubt u.a. die knotenmodellbasierte thermische Simulationen über große Zeiträume (Jahresgänge) und in sehr komplexen Gebäuden. Die guten Voraussetzungen zur Erweiterung begründen sich im modularen Aufbau des Programmsystems und in den allgemein gültigen Nutzerschnittstellen. Das Programmsystem wird permanent weiterentwickelt und validiert.

3.2 Gebäudemodelle

Für die Simulationsrechnungen werden vier typisierte Gebäudemodelle erstellt, die sich hinsichtlich ihrer Größe unterscheiden. Sie enthalten jeweils zwei, vier, sechs oder zwölf Nutzeinheiten. Die Nutzeinheiten entsprechen einer 3-Zimmerwohnung mit Küche, Bad und Flur. Die Wohnfläche nach Wohnflächenverordnung [9] beträgt durchschnittlich 109 m^2. Die Modelle sollen repräsentativ für den gesamten hier betrachteten Gebäudebestand sein. Dabei besteht das kleinstmögliche Mehrfamilienhaus natürlich aus 2 Nutzeinheiten. Aus den Messdaten ist bekannt, dass die sehr sehr großen Gebäude (SSG: 17 - 60 NE, vgl. Tabelle 2.5) sich in ihrem energetischen Verhalten bzw. der Verbrauchsspreizung nicht viel von der nächst kleineren Gruppe (SG: 8 - 16 NE) unterscheiden. Deshalb soll das 12-Familienhaus als Vertreter der sehr großen Gebäude auch zur Repräsentation der Liegenschaften mit noch mehr Wohnungen genügen. Die beiden Zwischengrößen 4- und 6-Familienhaus stellen Stützgrößen innerhalb der beiden anderen Gruppen (M: 3 - 4 NE und G: 5 - 7 NE) dar. Bei der Erstellung der Modelle sollte möglichst effektiv gearbeitet werden. Deshalb wurde aus dem Zweifamilienhaus durch Duplikation des Erdgeschosses ein Vierfamilienhaus und durch nochmaliges Kopieren einer Etage ein Sechsfamilienhaus. Das Zwölffamilienhaus entsteht schließlich durch Spiegelung des Sechsfamilienhauses.

Aus der Datensammlung ist bekannt, dass die mittleren Wohnflächen mit zunehmender Anzahl von Nutzeinheiten im Gebäude kleiner werden. Aus der oben erläuterten Vorgehensweise bei der Erstellung der Modelle resultieren allerdings immer gleich große Wohnflächen in jeder Gebäudegröße. Damit entsteht zunächst eine Ungenauigkeit bei der Abbildung des Gebäudebestandes in Deutschland durch das Simulationsmodell. Da die Wohnfläche des Modells mit rund 109 m^2 jedoch zwischen den maximalen (117 m^2 als nach Anzahl der Nutzeinheiten gewichteter Mittelwert für die kleinen Gebäude) und minimalen (78 m^2 als gewichteter Mittelwert für die sehr großen Gebäude) Flächen liegt, relativiert sich der Fehler.

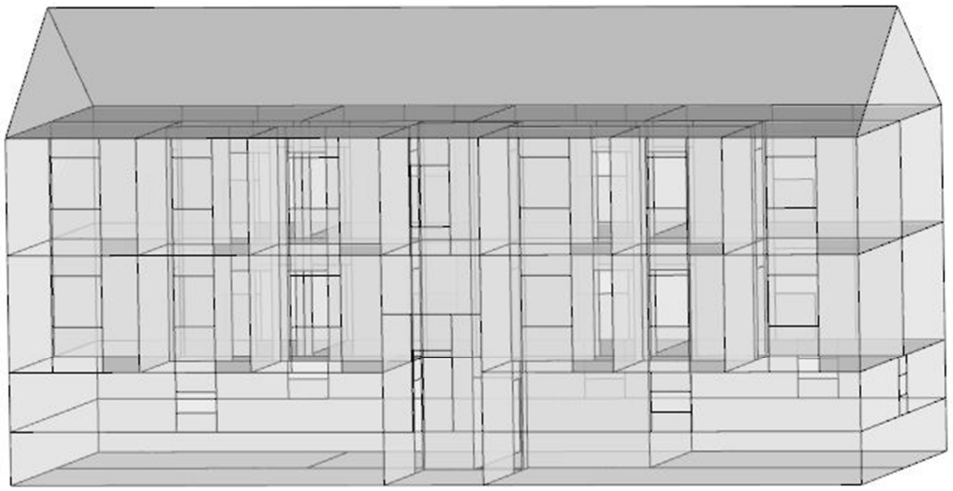
Die Abbildungen 3.1 bis 3.4 zeigen die Gebäudemodelle mit ihren jeweiligen charakteristischen Gebäudedaten.



V = 976 m³ **A/V = 0,82** **A = 798 m²**

Gebäudenutzfläche nach EnEV: A_N = 0,32 · V = 312 m²

Abbildung 3.1: Zweifamilienhaus

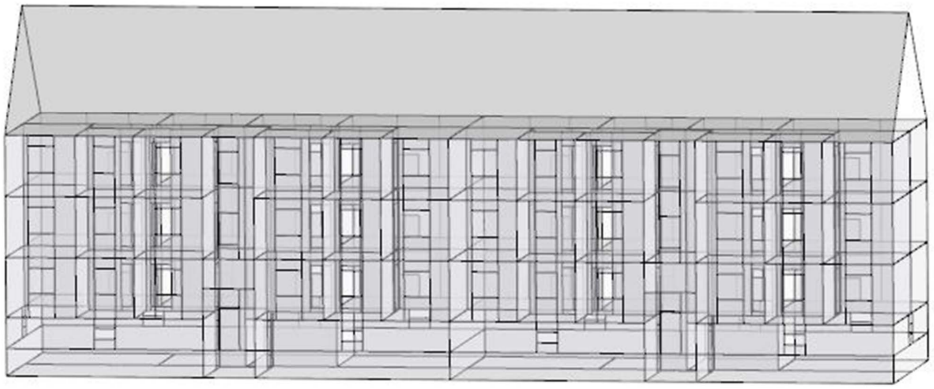


V = 1622 m³ **A/V = 0,60** **A = 975 m²**

Gebäudenutzfläche nach EnEV: A_N = 0,32 · V = 519 m²

Abbildung 3.2: Vierfamilienhaus

Abbildung 3.3: Sechsfamilienhaus



V = 5169 m³ **A/V = 0,43** **A = 2238 m²**

Gebäudenutzfläche nach EnEV: $A_N = 0{,}32 \cdot V = 1654\ m^2$

Abbildung 3.4: Zwölffamilienhaus

Es existieren unterschiedliche Bezugsflächen in Gebäuden. Zur besseren Verständlichkeit zeigt die Tabelle 3.1 eine Übersicht der wichtigsten Flächen angewandt auf die vier Gebäudegrößen der Simulationsmodelle.

Tabelle 3.1: Überblick über die verschiedenen Flächendefinitionen (A_N nach Gleichung (3.1))

	Wohnfläche nach WoFlV **[m²]**		**Nutzfläche** nach EnEV **[m²]**		**Gebäudenutzfläche** nach EnEV **[m²]**		**Umrechnungs-faktor**
NE	$A_{wohn.ges}$	A_{wohn}	$A_{nutz.ges}$	A_{nutz}	A_N	A_N	$A_N/A_{wohn.ges}$
2 FH	218	109	195,6	97,8	312,4	156,2	1,4
4 FH	436	109	391,1	97,8	519,2	129,8	1,2
6 FH	654	109	586,7	97,8	726,1	121,0	1,1
12 FH	1308	109	1173,3	97,8	1654,1	137,8	1,3

Es gelten die folgenden Definitionen:

Die Wohnfläche umfasst die Grundflächen der Räume, die ausschließlich zu dieser Wohnung gehören [9]. Dies umfasst sowohl beheizte als auch unbeheizte Räume.

Die Nutzfläche umfasst die beheizten bzw. gekühlten Flächen der Wohnung [12].

Die Gebäudenutzfläche berechnet sich aus dem beheizten Gebäudevolumen nach EnEV [12] mit der Formel:

$$A_N = 0,32\,\mathrm{m}^{-1} \cdot V_e \tag{3.1}$$

(In den Abbildungen 3.1 bis 3.4 wird V_e nur als V bezeichnet!)

Dabei ist:

das beheizte Gebäudevolumen das Volumen, das von der wärmeübertragenden Umfassungsfläche umschlossen wird [12]

und

die wärmeübertragende Umfassungsfläche die Fläche, die ein Ein-Zonen-Modell bildet, das mindestens die beheizten Räume einschließt [12].

Bei der Erstellung von Energieverbrauchsausweisen lässt die EnEV [12] eine überschlagsmäßige Berechnung für die Gebäudenutzfläche zu. Dabei wird die Wohnfläche mit einem Umrechnungsfaktor von 1,2 bis 1,35 multipliziert:

$$A_N = 1,2 \ldots 1,35 \cdot A_{wohn} \tag{3.2}$$

In der letzten Spalte der Tabelle 3.1 wird beispielhaft auf den Umrechnungsfaktor zurück gerechnet. Dazu wird die Gebäudenutzfläche durch die Wohnfläche geteilt. Hier sieht man, dass dieser Umrechnungsfaktor bei den Modellen nur im 4- und im 12-Familienhaus im von der EnEV empfohlenen Bereich liegt. Diese pauschale Umrechnung ist also auf einzelne Gebäude z.T. nur mit Einschränkung anzuwenden und kann im Einzelfall zu abweichenden Ergebnissen führen. Allerdings sei dies an dieser Stelle nur rein informativ gezeigt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Energieverbräuche auf die Wohnfläche bezogen, da auch die vorliegenden Energiekennzahlen der Messdienstunternehmen wohnflächenbezogen sind.

3.3 Die energetische Qualität der Gebäudehülle

Die energetische Qualität der Gebäudehülle wird durch den konstruktiven Aufbau, die bauphysikalischen Eigenschaften der Baustoffe der Außenbauteile, der Gebäudegeometrie sowie den eingesetzten Verglasungen charakterisiert. Der Mindestwärmeschutz der Außenbauteile ist in

- der WSchVO 77 [5] mit der Begrenzung des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten des Gebäudes U_m und in
- der EnEV 02 [8] sowie EnEV 09 [12] mit der Begrenzung des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlustes H'_T

gesetzlich geregelt. Dem entsprechend werden die Ausführung der vier Gebäudegrößen jeweils mit fünf verschiedenen Wandaufbauten entsprechend den Baualtersklassen:

- Altbau vor 1977 (BAK 6 stellvertretend für die BAK 1-7)
- 1978 bis 1995 (BAK 8)
- 1995 bis 2001 (BAK 9)
- 2002 bis 2008 (BAK 10/ EnEV 02) und
- ab 2009 (BAK 10/ EnEV 09)

realisiert. Jedes der vier vorgestellten Gebäude (2-, 4-, 6- und 12- Familienhaus) wird in 5 verschiedenen Ausführungen in Übereinstimmung mit den ausgewählten Baualtersklassen erstellt. Dadurch entstehen 20 Gebäudevarianten.

Die Auswahl der Baualtersklassen erfolgte unter Abwägung des für die Modellerstellung und die Simulationen erforderlichen Zeit- und Rechenaufwandes sowie der Notwendigkeit, einen repräsentativen Gebäudebestand abzubilden. Mit den vier Baualtersklassen BAK 6, 8, 9 und 10 sind deutlich über 50% des Gebäudebestandes abgedeckt (siehe Tabelle 3.2). Die fehlenden Anteile sind im Wesentlichen den Baualtersklassen 1-5 (in der Summe etwa 26%) und 7 (etwa 19%) zuzuordnen. Dieses Vorgehen wird insofern als zulässig betrachtet, als dass mit BAK 6 bereits ein Großteil der Bestandsgebäude vor Gültigkeit der ersten Wärmeschutzverordnung in den Untersuchungen Berücksichtigung findet.

Tabelle 3.2: Zuordnung des Wohnungsbestands auf Baualtersklassen (in Anlehnung an [18] und [19])

Baualter	Modell	prozentualer Anteil		Anzahl absolut (in Mio)	
		Gebäude	Wohnungen	Gebäude	Wohnungen
BAK 1 - 7	BAK 6	19,6%	22,0%	3,54	8,66
BAK 8	BAK 8	19,0%	19,7%	3,42	7,77
BAK 9	BAK 9	9,9%	8,6%	1,78	3,37
BAK 10	EnEV 02/09	6,4%	4,3%	1,15	1,69
Gesamt		54,9%	54,6%	9,89	21,49

Die in den Gebäudemodellen hinterlegten Wandaufbauten sind im Anhang B.1 gelistet. Die verwendeten Baustoffe wurden anhand typischer Gebäude der entsprechenden Baualtersklassen mit Hilfe von Hausdatenblättern [20] ermittelt. Die DIN V 4108-4 [31] sowie DIN EN ISO 10456 [32] enthalten Tabellenwerke für wärme-und feuchtetechnische Eigenschaften und Bemessungswerte von Baustoffen. Beide wurden zur Ermittlung der benötigten Rohdichten, Wärmeleitfähigkeiten und spezifischen Wärmekapazitäten verwendet. Aus den Schichtdicken und Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Baustoffe ergeben sich die mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile. Diese werden für die Außenbauteile von Gebäuden ab der BAK 8 durch den Gesetzgeber mittels entsprechender Verordnungen begrenzt. Die Simulationsmodelle der betroffenen Baualtersklassen (BAK 8 bis 10) halten die Anforderungen an den Wärmeschutz der jeweils in dieser Zeit geltenden Verordnungen ein (WSchVO 77 [5] und WSchVO 95 [6] sowie EnEV 02 [8] und EnEV 09 [12]). Die folgenden Darstellungen zeigen, dass die Modelle den gesetzlichen Anforderungen an die maximal zulässigen Wärmeverluste entsprechen.

Die Abbildung 3.5 zeigt in einer roten Kurve den Verlauf des maximal zulässigen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten nach WSchVO 77 [5]. Dieser wurde in Abhängigkeit vom A/V_e-Verhältnis (Kompaktheitsgrad) des Gebäudes angegeben. Als schwarze Punkte sind die Modellwerte der BAK 8 eingetragen. Sie liegen eindeutig unter der Kurve, halten also die Anforderungen ein. Jedoch sind sie nicht allzuweit von ihr entfernt. Auf Grund der Materialkosten macht es Sinn, das Gebäude so nah wie möglich an den Grenzwerten zu orientieren und sie nicht wesentlich zu unterschreiten.

In der Abbildung 3.6 ist dieser Zusammenhang analog für die Anforderungen der EnEV 02 an den maximalen auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlust dargestellt, wiederum in Abhängigkeit von der Kompaktheit der Gebäude. Da sich die Kompaktheit mit steigender Anzahl der Nutzeinheiten verbessert, wäre für das 12-Familienhaus ein größerer Transmissionswärmeverlust bzw. eine geringere energetische Qualität der Gebäudehülle erlaubt als bspw. im 2- Familienhaus. Diese Tatsache wird mit den Modellen nicht ausgenutzt, da von jeweils gleichen Wandaufbauten ausgegangen wurde. Demzufolge werden bei den größeren Gebäuden die diesbezüglichen Anforderungen der EnEV 02 deutlich unterschritten.

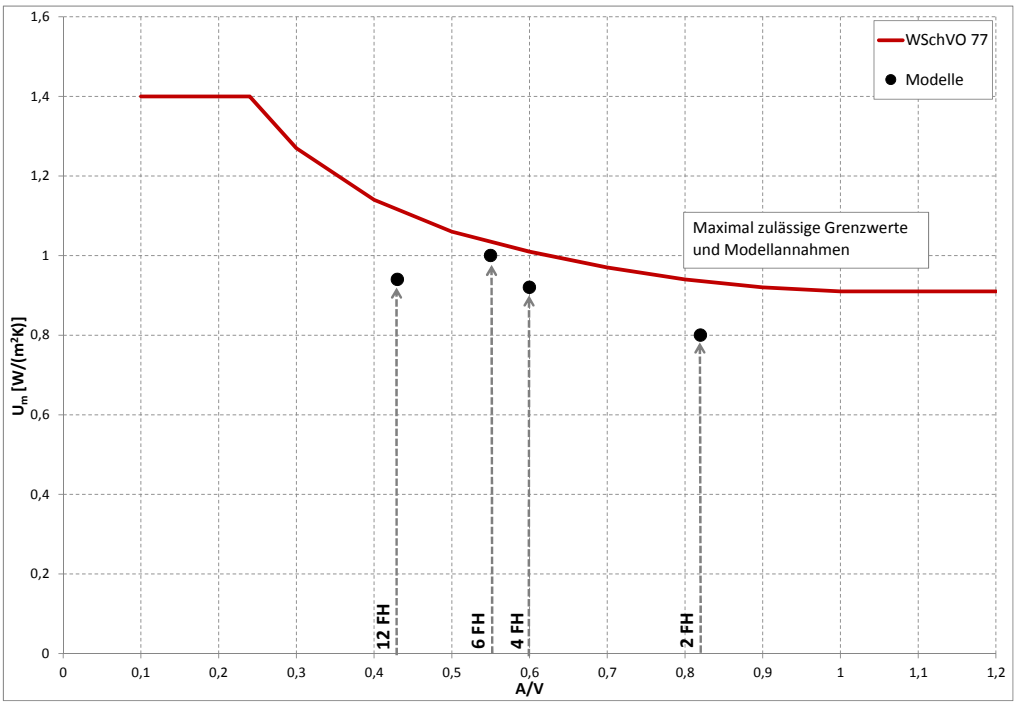


Abbildung 3.5: Maximal zulässige Grenzwerte der WSchVO 77 und Modelleigenschaften

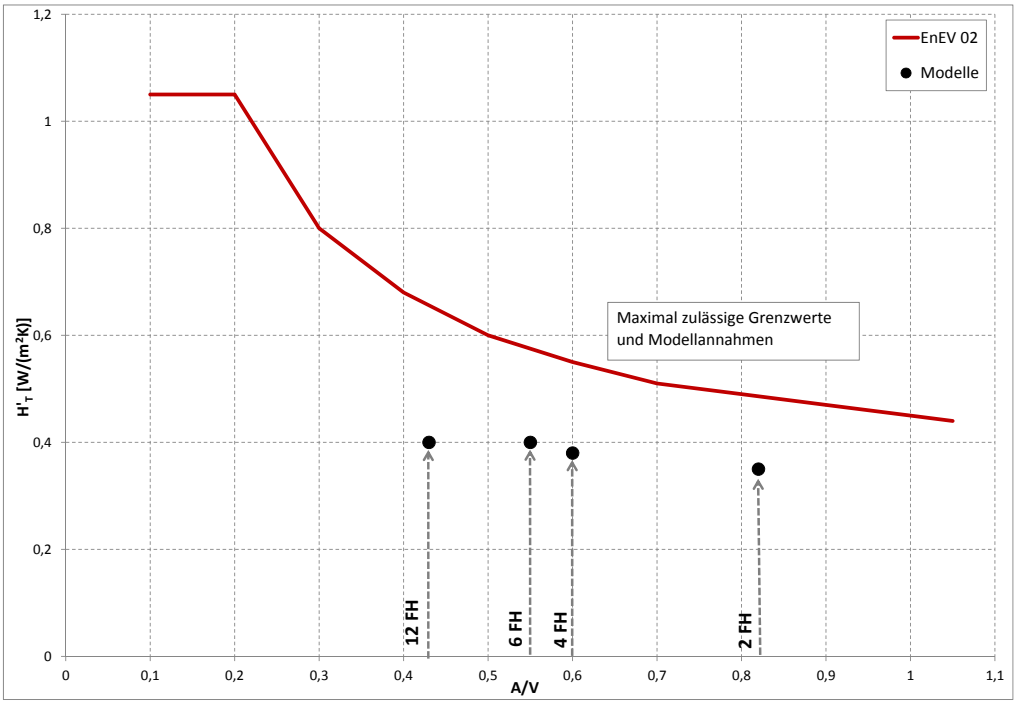


Abbildung 3.6: Maximal zulässige Grenzwerte der EnEV 02 und Modelleigenschaften

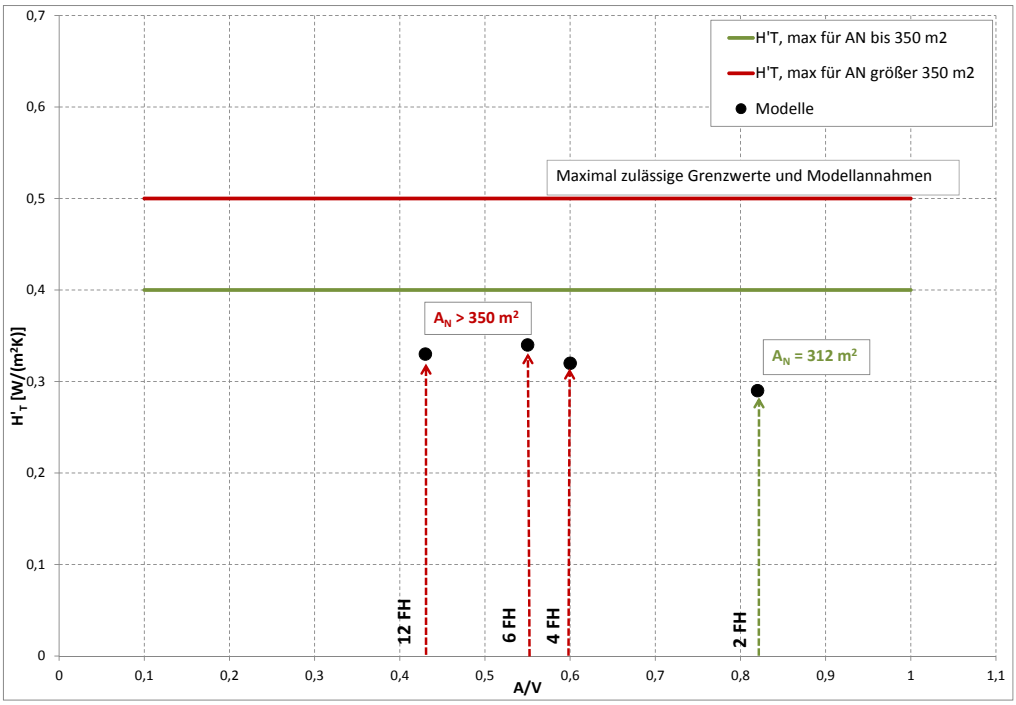


Abbildung 3.7: Maximal zulässige Grenzwerte der EnEV 09 und Modelleigenschaften

Die EnEV 09 gibt die Grenzwerte für die energetische Qualität der Gebäudehülle nicht mehr in Abhängigkeit des Kompaktheitsgrades an. Statt dessen gibt sie einen maximal zulässigen spezifischen auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlust für freistehende Wohngebäude mit einer Gebäudenutzfläche $A_N \leq 350\,\mathrm{m}^2$ von $0,4\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$ und für Gebäude mit $A_N > 350\,\mathrm{m}^2$ von $0,5\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$ an. Da größere Gebäude im Allgemeinen mit einem kleineren A/V_e-Verhältnis einher gehen, bleibt das Prinzip der EnEV, kompaktere Gebäude mit höheren Grenzwerten zu belohnen allerdings erhalten. In der Abbildung 3.7 wurde zur besseren Vergleichbarkeit mit den vorhergehenden Bildern die gleiche Darstellungsweise gewählt. Man sieht auch hier wieder, dass vor allem die drei größeren Gebäudetypen mit Ausführung nach EnEV 09 die Anforderungen übererfüllen.

Desweiteren wird jeder Baualtersklasse entsprechend der Dichtheit ihrer Gebäude ein unterschiedlicher thermisch wirksamer Luftwechsel zugeordnet. Dieser ist in Tabelle 3.3 dargestellt. Die Daten für EnEV 09 sind der DIN V 18599-2 [30] entnommen (Kategorie I a: Gebäude ohne raumlufttechnische Anlage). Davon ausgehend wurden die restlichen Luftwechsel zunächst angenommen und während der Modellvalidierung durch den Vergleich mit den Felddaten der Messdienstunternehmen angepasst, d.h. über die Variation des thermisch wirksamen Luftwechsels und den daraus berechneten Energieverbräuchen werden die vorliegenden Messdaten in geeigneter Weise nachgebildet.

Tabelle 3.3: Thermischer Luftwechsel nach Baualtersklasse

BAK	$\beta_{therm}\,[\mathrm{h}^{-1}]$
BAK 6	0,4
BAK 8	0,35
BAK 9	0,3
EnEV 02	0,21
EnEV 09	0,14

3.4 Randbedingungen der Simulation

Die Simulation erfolgt jeweils über ein ganzes Jahr mit der Schrittweite 1 h. Für die äußeren Bedingungen dient das aktuelle Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes für die Region „04 Norddeutsches Tiefland“ (Wetterstation Potsdam). Dieses repräsentiert mittlere klimatische Verhältnisse. Ein Testreferenzjahr enthält stündliche meteorologische Daten, wie:

- Luftdruck,
- Bedeckungsgrad,
- Außenlufttemperatur,
- Windgeschwindigkeit und -richtung,
- Wasserdampfgehalt und relative Feuchte der Außenluft, sowie
- direkte und diffuse Sonnenbestrahlungsstärke.

Den äußeren Bedingungen gegenüber stehen die Konditionen innerhalb des Gebäudes. Die inneren Wärmequellen werden mit $6,5\ \mathrm{W/m^2_{Wohnfl}}$ angenommen. Dieser Wert orientiert sich an den Randbedingungen der DIN V 18599-10 [29] für Wohngebäude. Diese geht von $100\ \mathrm{Wh/m^2d}$ im Mehrfamilienhaus aus.

Der Fensterluftwechsel (zusätzlich zum thermisch wirksamen Luftwechsel nach Tabelle 3.3) und die mittlere Raumtemperatur (Sollwert der Heizung) stellen den größten Einfluss des Nutzers auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes dar. Beide Parameter können wohnungsweise variiert werden. Die mittlere Raumtemperatur einer Wohnung gibt den Mittelwert des Heizungssollwertes aller Räume einer Wohnung über den gesamten Tagesverlauf an. Damit sind eventuelle Temperaturschwankungen über den Tag (bspw. durch intermittierenden Betrieb) sowie unterschiedliche Beheizung nach Art der Raumnutzung (Badezimmer, Schlafzimmer,...) enthalten. Im Rahmen einer Gebäudesimulation mit TRNSYS-TUD wäre es auch möglich, für jeden einzelnen Raum im Gebäude eine eigene Raumsolltemperatur anzunehmen. Außerdem könnten für diese Temperaturen zusätzlich noch Zeitpläne erstellt werden, um intermittierenden Betrieb genau abzubilden. Für die Erstellung dieser Arbeit wurde darauf allerdings verzichtet, da der Rechenaufwand in dem Fall enorm ansteigen würde und in keinem sinnvollen Verhältnis zur gewonnenen Genauigkeit steht. Die Energieeinsparungen durch intermittierenden Betrieb liegen bei maximal 5 % und sind zu dem vom Nutzerverhalten abhängig.

Eine weitere wohnungsweise variierbare Größe soll der Fensterluftwechsel sein. Er tritt zusätzlich zu dem, vom Baualter abhängigen, thermischen Luftwechsel (vgl. Tabelle 3.3 auf der vorherigen Seite) auf und bietet dem Nutzer einen großen Einfluss auf die Höhe des Energieverbrauchs der Heizung seiner Wohnung. Analog zur Vorgehensweise mit den mittleren Raumtemperaturen wird der Fensterluftwechsel wohnungsweise gemittelt, um den Simulationsaufwand bei angemessener Genauigkeit gering zu halten.

Als Ergebnis einer Simulation wird für jede Nutzeinheit ein Heizwärmebedarf ausgegeben. Dieser ist abhängig von den Randbedingungen (vgl. Abschnitt 3.4) und der Lage der Nutzeinheit im Gebäude. Aus diesem Heizwärmebedarf muss im Anschluss der Simulation der Anteil des Endenergiebeverbrauchs der Wohnung für Heizung und Trinkwassererwärmung berechnet werden. Die Verluste durch die Anlagentechnik werden über einen pauschalen Aufschlag von 10 % des Heizwärmebedarfs berücksichtigt. Hintergrund dieser stark vereinfachenden Annahme ist die Validierung der Gebäudemodelle an den gemessenen Energiekennzahlen. Hierbei bestand nicht das Ansinnen, die Mehraufwendungen der Anlagentechnik detailliert, d.h. für jeden Gebäude-, Anlagen-, und Nutzertyp nachzubilden (entsprechende Aussagen lassen sich aus den Messwerten gar nicht ableiten), sondern den Gesamtwärmeverbrauch der Gebäude in den Simulationsmodellen widerzuspiegeln. Der Energiebedarf für die Trinkwassererwärmung wird zunächst nach DIN V 18599-10 mit $12,5$ kWh/($m^2 \cdot a$) angenommen. Dies stellt sich im Vergleich zu den Messdaten (tatsächlicher Verbrauch) als zu gering heraus. Der der Trinkwassererwärmung tatsächlich zuzuordnende Energieverbrauch liegt im Durchschnitt bei 26 kWh/($m^2 \cdot a$). Dies sollte bei der Überarbeitung von DIN V 18599-10 berücksichtigt werden.

3.5 Durchführung der Simulation

3.5.1 Basisvariante

Jedes Gebäudemodell soll zunächst in einer Basisvariante simuliert werden, um einen Richtwert für den Jahresheizwärmebedarf zu bekommen. Dafür wird unabhängig von Gebäudegröße und Lage der Nutzeinheit ein einheitliches Nutzerverhalten angesetzt. In der Praxis lässt sich mit besserer energetischer Qualität der Gebäudehülle eine Zunahme der mittleren Raumtemperaturen beobachten (vgl. Abbildung 2.1 auf Seite 4). Deshalb wird für die Gebäude der Baualtersklassen 6 und 8 eine mittlere Raumtemperatur von 19 °C und für die restlichen Gebäude eine mittlere Raumtemperatur von 20 °C angenommen. Abgesehen vom bereits erwähnten thermisch wirksamen Luftwechsel in Abhängigkeit des Baualters wird zunächst kein zusätzlicher, durch den Nutzer verursachter, Fensterluftwechsel angenommen. Der Bedarf für die Trinkwassererwärmung liegt für die Basisvariante bei $12,5$ kWh/(m^2a) und wird später je nach Nutzerverhalten mit einem Faktor von 1 bis 6 multipliziert, um die realen Verbrauchswerte besser abzubilden.

Aus dem einheitlichen Nutzerverhalten aller Wohneinheiten einer Liegenschaft lassen sich Energiebedarfsunterschiede zwischen den Wohnungen, die ausschließlich auf ihre relative Lage innerhalb des Gebäudes zurückzuführen sind, ermitteln. Ursache solcher Unterschiede sind z.B. zusätzliche Wärmeverluste über Keller- und Dachgeschossdecken, erhöhte

Außenwandanteile oder abweichende solare Einstrahlung über unterschiedlich orientierte Gebäudefassaden. Aus Abbildung 3.8 ist zu erkennen, dass sich bereits bei einheitlichem Nutzerverhalten eine deutliche Verbrauchsspreizung abzeichnet. Allerdings fällt diese erwartungsgemäß wesentlich geringer aus, als aus den Verbrauchsmessungen bekannt. Zum Vergleich ist aus den Messdaten der Messdienstunternehmen eine mittlere Kurve gebildet worden. Um mit den Modellen eine ähnlich große Verbrauchsspreizung abbilden zu können, ist daher im Folgenden das Nutzerverhalten in den einzelnen Nutzeinheiten bzw. Wohnungen stärker zu diversifizieren. Im Vorgriff auf die noch zu erläuternden Anpassungen an den Simulationsmodellen ist in Abbildung 3.8 bereits auch die berechnete mittlere Verbrauchsspreizung bei veränderlichem, d.h. wohnungsweise unterschiedlichem Nutzerverhalten dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Gesamtanzahl der den drei Kurvenverläufen zugrunde liegenden Datensätzen bzw. Simulationsvarianten ergeben sich unterschiedliche maximale relative Häufigkeiten. Die exakte Nachbildung der aus den Daten der Messdienstunternehmen extrahierten Häufigkeitsverteilung erfordert eine entsprechend große Vielfalt an Simulationsvarianten. Dies ist einerseits mit vertretbarem Aufwand nicht zu leisten und bringt andererseits keine neuen Erkenntnisse, da die vorhandenen Simulationsvarianten als Stützstellen ausreichende Einsicht in die energetischen Zusammenhänge ermöglichen.

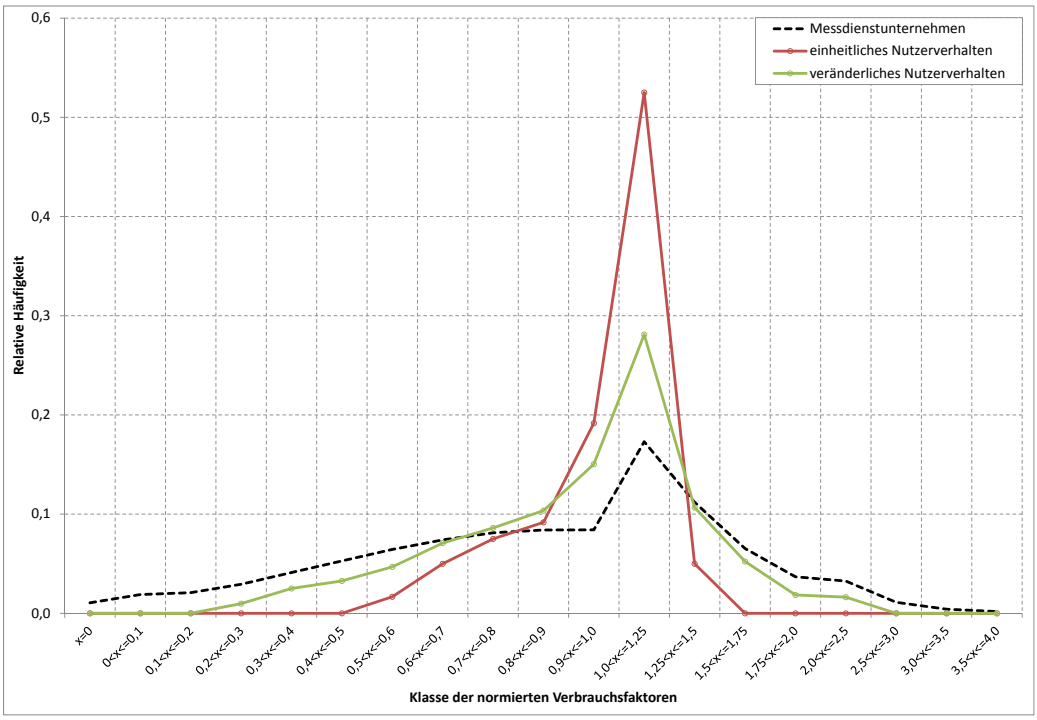


Abbildung 3.8: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von normierten Verbrauchsfaktoren bei einheitlichem und veränderlichem Nutzerverhalten mit Felddaten der Messdienstunternehmen

3.5.2 Veränderliches Nutzerverhalten

Die im Feld erfassten Energieverbräuche werden als normierte Verbrauchswerte gemäß VDI 2077 [24] zusammengefasst. Die von den Messdienstunternehmen zur Verfügung

gestellten Daten sind als Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Baualtersklassen und der Gebäudegröße im Abschnitt 2.3 angegeben. Deutlich sind die Verbrauchspreizungen zu erkennen. Demzufolge schwanken die gemessenen flächenbezogenen Verbrauchswerte in einem Bereich von etwa 0,1...2,5(3,5) in Relation zu einem Mittelwert. Die aus der Simulation mit einheitlichem Nutzerverhalten (Basisfall) resultierenden, normierten Verbrauchsfaktoren spannen einen kleineren Bereich von 0,5...1,5 auf. Dies ist bereits deutlich in der Abbildung 3.8 auf der vorherigen Seite zu sehen.

Für die Annäherung der simulierten Verbrauchsspreizungen an die aus den Feldmessungen bekannten Werte wird das Nutzerverhalten (mittlerer Raumtemperatursollwert der Nutzereinheit, zusätzlicher Fensterluftwechsel sowie zusätzlicher Bedarf durch die Trinkwassererwärmung) wohnungs- und gebäudeweise variiert. Diese Variation findet iterativ so lange statt, bis die aus Abschnitt 2.3 bekannten Häufigkeitsverteilungen der Verbrauchsspreizungen annähernd nachgebildet werden können.

Des Weiteren müssen die erreichten Absolutwerte für den mittleren Energieverbrauch innerhalb des durch den Datenpool aufgespannten Bereiches für die jeweilige Größe und Baualtersklasse liegen, d.h. die Variation des Nutzerverhaltens in den einzelnen Wohnungen darf nicht zu einem unzulässig hohen Gesamtverbrauch des Gebäudes führen. Im Verlauf der Simulationen zeigt sich, dass die Veränderung des Bedarfs für die Trinkwassererwärmung im Mittel die geringste Auswirkung auf den normierten Verbrauchsfaktor hat, während die Wahl des Luftwechsels den größten Einfluss bietet.

Die Auswahl der mittleren Wohnungstemperaturen [35] und der Fensterluftwechsel [27] wird anhand der aus der Literatur bekannten Werte getroffen. Demnach soll die mittlere Raumlufttemperatur in Mehrfamilienhäusern zwischen $17,5$ und $20,5\,°C$ ($45,5\%$ von 3,7 Millionen Messungen in deutschen MFH) liegen. Dazu wird ein durchschnittlicher Fensterluftwechsel von $0,3$ bis $0,5\,h^{-1}$ angenommen. Somit befindet sich auch das simulierte Verhalten durchschnittlicher Nutzer in diesem Bereich. Die untere Grenze („Sparer“) wird zwischen $14,5$ und $16,5$ °C ($22,1\%$) mit einem Fensterluftwechsel von 0 bis $0,2\,h^{-1}$ gelegt. Die mit einem höheren normierten Verbrauch einhergehenden Verschwendungspotenziale („Vielverbraucher“) sind deutlich mit höheren Raumtemperaturen und größeren Luftwechselzahlen verknüpft. Verschwenderisches Verhalten liegt in der Simulation zwischen 21,5 und $24,5$ °C ($17,2\%$) bei $0,6$ bis $0,9\,h^{-1}$. Die Tabelle 3.4 zeigt einen Überblick.

Tabelle 3.4: Klassifizierung des Nutzerverhaltens für die Simulation

Nutzer	mittlere Raumtemperatur	Fensterluftwechsel	TWE-Bedarf (Faktor TWE)
	[°C]	[h^{-1}]	[$kWh/(m^2 \cdot a)$]
Sparer	14,5 bis 16,5	0,0 bis 0,2	12,5 bis 18,75 (1,0 bis 1,5)
Durchschnitt	17,5 bis 20,5	0,3 bis 0,5	25,0 bis 43,75 (2,0 bis 3,5)
Vielverbraucher	21,5 bis 24,5	0,6 bis 0,9	50,0 bis 75,00 (4,0 bis 6,0)

Mit Hilfe dieser Auswahl werden alle Wohnungen der verschiedenen Gebäudegrößen (2, 4, 6 und 12 FH) mit unterschiedlichem Nutzerverhalten belegt und für die vorhandenen Baualtersklassen (BAK 6, 8, 9, EnEV 02/09) simuliert. In jeder Baualtersklasse werden so viele Varianten erstellt und berechnet, wie zur Nachbildung der Häufigkeitsverteilungen

aus dem Datenpool der Messdienstunternehmen notwendig sind. So ergibt sich schließlich eine Datensammlung von 918 simulierten Nutzeinheiten, die sich entsprechend der Tabelle 3.5 auf die einzelnen Baualtersklassen verteilen.

Tabelle 3.5: Simulierte Nutzeinheiten

Baualtersklasse	Nutzeinheiten
BAK 6	164
BAK 8	142
BAK 9	176
EnEV 02	184
EnEV 09	132
Basisfälle	120 (je 24 pro BAK)

Die Abbildung 3.9 zeigt die Häufigkeit der mittleren Raumtemperatursollwerte, die für die Anpassung an die realen Verbrauchspreizungen je nach Baualter benötigt werden. Eine analoge Darstellung der angenommenen Fensterluftwechsel findet sich in Abbildung 3.10. Aus beiden Abbildungen ist ersichtlich, dass mit steigender energetischer Qualität der Gebäudehülle ein „verschwenderischeres“ Verhalten unterstellt werden muss. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Mittelwerte der simulierten Raumtemperaturen und Fensterluftwechsel im entsprechenden Diagramm angegeben. Die Annahmen reichen von im Mittel $18,11\ ^{\circ}\mathrm{C}$ und $0,27\ \mathrm{h}^{-1}$ im Altbau vor 1977 bis zu $20,10\ ^{\circ}\mathrm{C}$ und $0,46\ \mathrm{h}^{-1}$ in den Gebäuden mit einem der EnEV 09 entsprechenden Dämmstandard. Neben Raumtemperatur und Luftwechsel wird auch der Energiebedarf für die Trinkwassererwärmung angepasst, um eine realitätsnahe Verbrauchsspreizung zu erreichen. Dabei wird der Standardwert von $12,5\ \mathrm{kWh/m^2a}$ mit einem Faktor 1 (Sparer) bis 6 (Vielverbraucher) variiert. Erwartungsgemäß können zwischen baulichem Wärmeschutz und Energiebedarf der Trinkwassererwärmung keine Korrelationen nachgewiesen werden. Deshalb wird an dieser Stelle auf eine entsprechende Darstellung verzichtet.

Die Abbildung 3.11 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen angenommenen Raumlufttemperaturen und Fensterluftwechseln nach BAK. Zur Verdeutlichung wurden Trendlinien in das Diagramm eingefügt. Von links nach rechts führen die Linien jeweils vom sparsamen zum verschwenderischen Verhalten. Höhere mittlere Raumlufttemperaturen gehen mit höheren Fensterluftwechseln einher. Die gestrichelte Linie wurde nachträglich eingefügt. Innerhalb des rautenförmigen Bereichs, den sie umschließt, variiert das Nutzerverhalten.

Die simulierten Heizwärmebedarfswerte wurden um einen pauschalen Anlagenverlust erhöht und auf die Wohnfläche bezogen. Aus den so entstandenen flächenbezogenen „Verbrauchswerten“ konnten die normierten Verbrauchsfaktoren nach VDI 2077 [24] (vgl. Abschnitt 2.1 auf Seite 12) gebildet werden. Die Abbildung 3.12 enthält eine Darstellung der im Ergebnis der Simulationsrechnungen ermittelten Häufigkeitsverteilungen normierter Verbrauchswerte für die unterschiedlichen Baualtersklassen. Ein aus den in den Abbildungen 2.5, 2.6 2.7, 2.8 und 2.9 auf Seite 16 dargestellten Verbrauchsspreizungen abgeleiteter mittlerer Kurvenverlauf aller Messdienstunternehmen wurde zu Vergleichszwecken in die Abbildung übernommen.

Die Verbrauchsspreizung des gesamten simulierten Modell- bzw. Nutzerbestands reicht nunmehr von 0,2 bis 2,4. Die zu Grunde liegenden Nutzerrandbedingungen sind im weites-

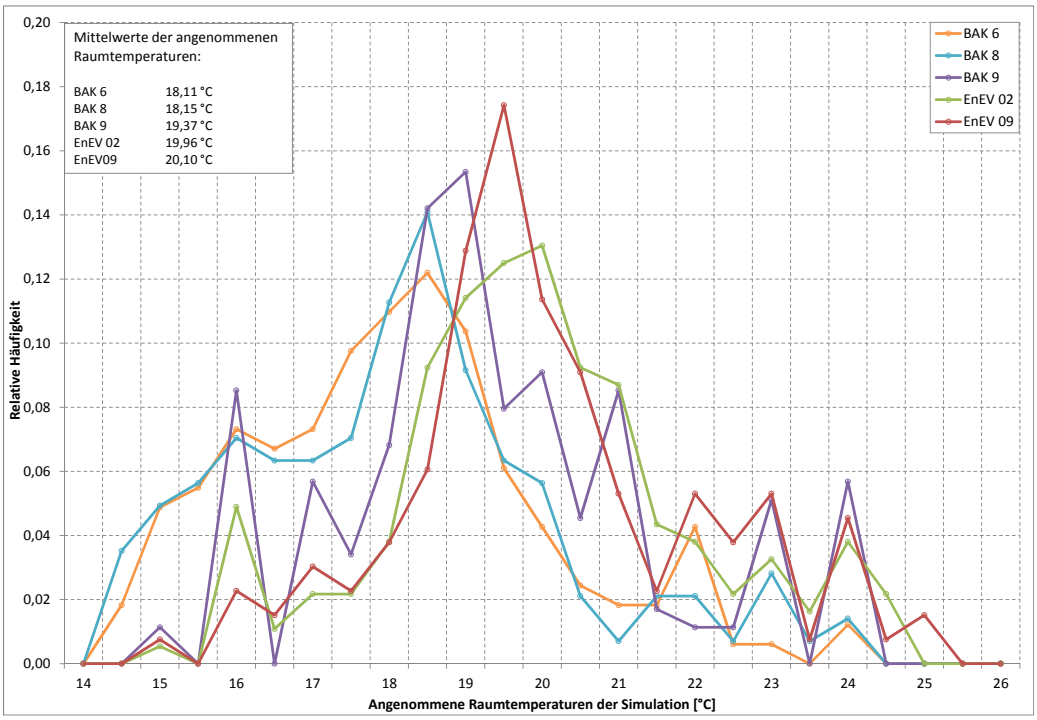


Abbildung 3.9: Häufigkeitsverteilung der für die Simulation angenommenen mittleren Raumtemperaturen

ten Sinne plausibel. Eine grundsätzliche statistische Absicherung ist gegeben. Die relative Häufigkeitsverteilung der normierten „Verbrauchswerte“ aus den Simulationsrechnungen ist gegenüber den Messdaten deutlich volatiler und weniger gleichmäßig. Dies liegt in der wesentlich geringeren Anzahl an Simulationsvarianten begründet. Es ist zu prüfen, inwieweit ein bestimmtes Nutzerverhalten mit Baualtersklassen korreliert, um tendenzielles Verschwendungspotenzial identifizieren zu können.

Die in Abbildung 3.12 dargestellte Auffächerung der Verbrauchsspreizungen nach Baualtersklassen scheint nicht signifikant. Viel mehr war es Ziel der Simulationen, durch veränderliches Verbrauchsverhalten eine der gegenüber der in Abbildung 3.8 ursprünglich ermittelten Spreizung bei einheitlichem Verhalten deutlich breitere und damit flachere Verteilung ähnlich den Felddaten zu erhalten und gleichzeitig im Bereich realer Energiekennwerte zu bleiben. Die genauere Vorgehensweise hierzu wird im folgenden Kapitel dargestellt.

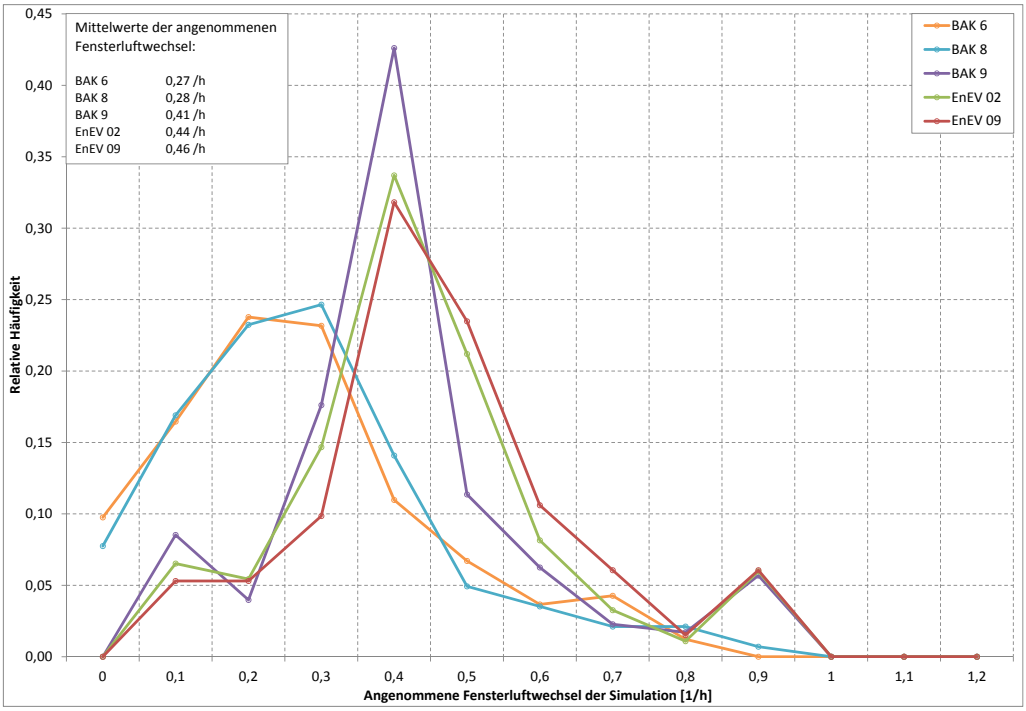


Abbildung 3.10: Häufigkeitsverteilung der für die Simulation angenommenen Fensterluftwechsel

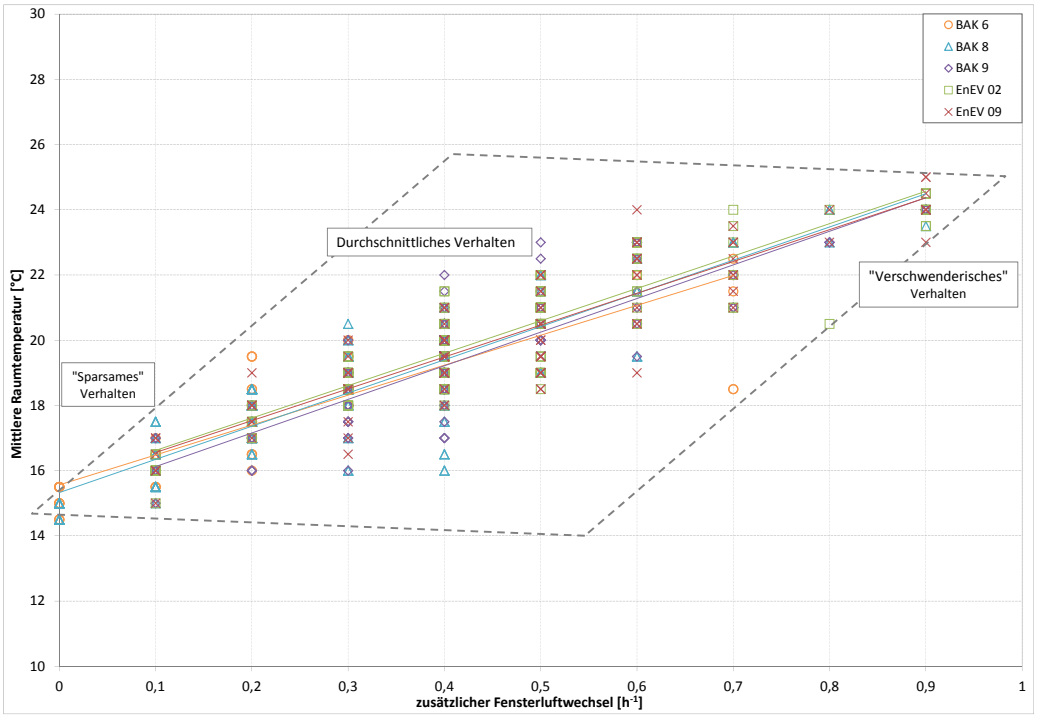


Abbildung 3.11: Angenommene Raumtemperaturen und zusätzliche Fensterluftwechsel nach BAK

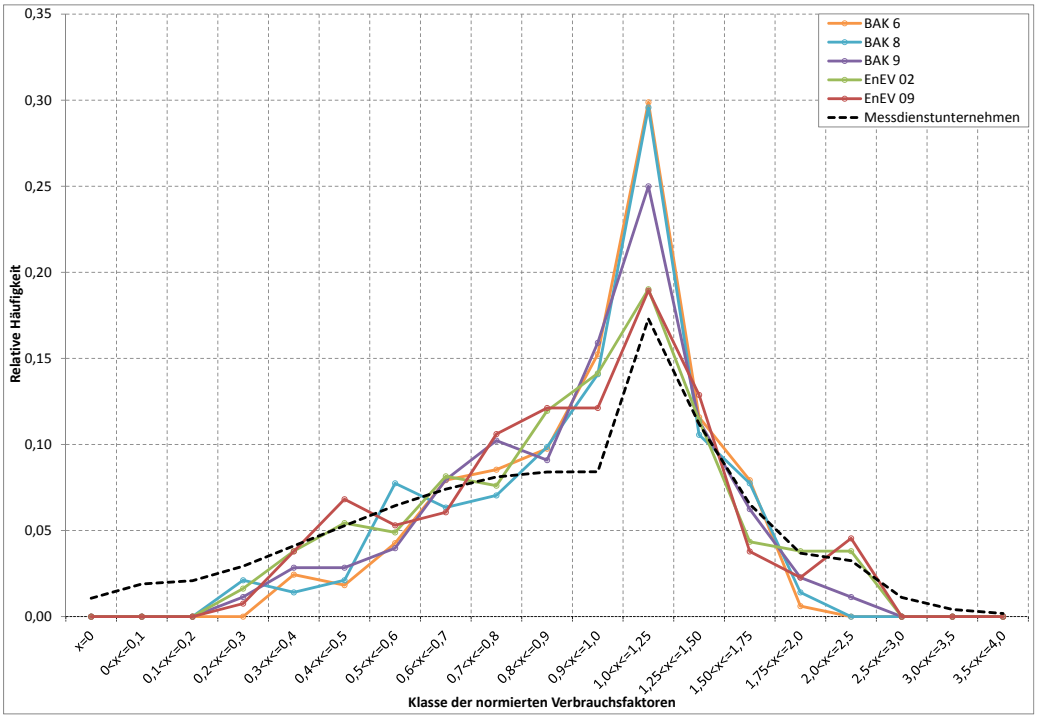


Abbildung 3.12: Verbrauchsspreizungen für unterschiedliche Baualtersklassen

3.5.3 Die Auswahl der Simulationsergebnisse

Am Beispiel zweier 6-Familienhäuser der Baualtersklassen 6 und EnEV 02 soll die Vorgehensweise bei der Variation des Nutzerverhaltens und der Auswahl der Simulationsergebnisse für die weitere Verwendung zur Erstellung der relativen Häufigkeitsverteilungen normierter Verbrauchsfaktoren gezeigt werden. Die Randbedingungen für Variation und Auswahl sind im wesentlichen:

- Die Eingaben bezüglich des Nutzerverhaltens sollen in einem sinnvollen Bereich nach Tabelle 3.4 liegen.
- Die Ergebnisse des mittleren Energieverbrauchs pro Nutzeinheit sollen innerhalb der für jede Baualtersklasse und Gebäudegröße typischen Energiekennwertsbereiche liegen, die durch die Daten der Messdienstunternehmer identifiziert wurden.

Die Tabelle 3.6 zeigt die, aus der Datensammlung entnommenen, Verbrauchsbereiche für die Baualtersklassen 6 und EnEV 02 in großen Gebäuden[5].

Tabelle 3.6: Bereich der Energiekennzahlen für 6-Familienhäuser der BAK 6 und EnEV 02 aus der Datensammlung der Messdienstunternehmer

Baualtersklasse	Verbrauchsbereich Messdaten kWh/m^2	gewichteter Mittelwert Messdaten kWh/m^2
BAK 6	144 - 182	165
EnEV 02	78 - 115	108

Zur besseren Verständlichkeit werden für die folgenden Beispiele nur Raumlufttemperatur und Fensterluftwechsel variert. Der Faktor für die Trinkwassererwärmung wird konstant für alle Nutzeinheiten mit 2 angenommen. Damit ergibt sich ein mittlerer Verbrauch von 25 kWh/m^2 für die Erwärmung des Trinkwassers.

Die Abbildung 2.1 auf Seite 4 zeigt bereits, dass bei Feldmessungen unterschiedliche mittlere Raumlufttemperaturen je Baualter des Gebäudes festgestellt wurden [36]. Dies kann mit Hilfe der Simulationen nachvollzogen werden. Durchschnittliches Verhalten liegt nach Tabelle 3.4 bei einer mittleren Raumlufttemperatur zwischen 17, 5 und 20, 5 °C und einem mittleren Fensterluftwechsel zwischen 0, 3 und 0, 5 h^{-1}. Die Mittelwerte des Durchschnittsverhaltens (19 °C und 0, 4 h^{-1}) werden in allen Wohnungen des 6-Familienhauses der BAK 6 eingegeben. Nach der Simulation ergibt sich ein mittlerer Verbrauch[6] des Gebäudes von 191 kWh/m^2 pro Nutzeinheit. Ein Blick in Tabelle 3.6 verrät, das dieser deutlich über dem Verbrauchsbereich der Messdaten für diese Baualtersklasse und Gebäudegröße liegt. Das Verhalten wird nun weiter angepasst bis zu einer mittleren Raumlufttemperatur von 18 °C und einem mittleren Fensterluftwechsel von 0, 3 h^{-1} in jeder Nutzeinheit des 6-Familienhauses der BAK 6. Der sich daraus ergebende mittlere Verbrauch pro Nutzeinheit liegt mit 169 kWh/m^2 sehr nah an dem gewichteten Mittelwert der Messdaten nach Tabelle 3.6.

Das gleiche Vorgehen soll nun beispielhaft an Hand des gleichen Gebäudes mit einem der EnEV 02 entsprechenden Dämmstandard gezeigt werden. Wieder wird mit dem

[5] Der Mittelwert ist nach Wohnfläche und Anzahl der Nutzeinheiten gewichtet.

[6] Der mittlere Verbrauch wurde entsprechend der in Abschnitt 3.4 vorgestellten Vorgehensweise gebildet und enthält die Energieaufwendungen für Raumheizung, Warmwasser und Anlagenverluste

mittleren Durchschnittsverhalten (19 °C und 0,4 h^{-1}) in jeder Wohnung begonnen. Im Ergebnis zeigt sich ein mittlerer Verbrauch von 75 kWh/m^2 pro Nutzeinheit. Nach Tabelle 3.6 ist dieser Wert zu niedrig. Das Nutzerverhalten wird nun weiter angepasst bis zu einer Raumlufttemperatur von 20,5 °C und einem Fensterluftwechsel von 0,5 h^{-1}. Damit sind die oberen Grenzen des durchschnittlichen Nutzerverhaltens erreicht und es ergibt sich ein mittlerer Verbrauch pro Nutzeinheit von 94 kWh/m^2. Es zeichnet sich schon jetzt ab, dass das Durchschnittsverhalten in der BAK 6 deutlich sparsamer ist, als in einem Gebäude der EnEV 02.

Ausgehend vom einheitlichen Nutzerverhalten der Verbrauchsmittelwerte wird nun mittels variablem Nutzerverhalten versucht, die relative Häufigkeitsverteilung der normierten Verbrauchsfaktoren nachzubilden, die sich aus der Datensammlung der Messdienstunternehmen ergibt. Dabei soll vor allem eine größere Spreizung erreicht werden. Wieder am Beispiel des 6-Familienhauses der BAK 6 kann die Vorgehensweise bei der Variation des Nutzerverhaltens im wesentlichen in 3 Schritten zusammengefasst werden.

1. Untere Grenze: 5 NE mit durchschnittlichem Nutzer (18 °C und 0,3 h^{-1}) + 1 NE mit sparsamem Nutzer (14,5 °C und 0 h^{-1})

   Die Simulation ergibt einen Verbrauch von 160 kWh/m^2. Dieser Wert liegt noch innerhalb des Bereiches der Verbrauchsdaten, aber der sparsame Nutzer liegt an der unteren Grenze des Nutzerverhaltens. Das Ersetzen eines durchschnittlichen Nutzers durch einen zweiten „Extremsparer“ führt zu einem Verbrauch von 151 kWh/m^2 und liegt damit immer noch im Bereich. Erst das Ersetzen eines weiteren Durchschnittsnutzer durch einen Sparer führt zu einem mittleren Verbrauch pro Nutzeinheit, der mit 139 kWh/m^2 zu niedrig ist.

2. Obere Grenze: 5 NE mit durchschnittlichem Nutzer (18 °C und 0,3 h^{-1}) + 1 NE mit verschwenderischem Nutzer (24,5 °C und 0,9 h^{-1})

   Die Simulation ergibt einen Verbrauch von 194 kWh/m^2. Dieser Wert ist deutlich zu hoch. Sogar mit einer Anpassung des Verschwenders bis auf die untere Grenze (21,5 °C und 0,6 h^{-1}) des verschwenderischen Verhaltens entsteht ein leicht zu hoher Verbrauch von 183 kWh/m^2. Deshalb wird das durchschnittliche Verhalten leicht nach unten korrigiert (17,5 °C und 0,3 h^{-1}). Der mittlere Verbrauch einer Nutzeinheit liegt dann bei 177 kWh/m^2 und damit im oberen Bereich des Messdatenbereichs nach Tabelle 3.6. Hebt man den Verschwender nun wieder auf einen höheren Verbrauch (23 °C und 0,7 h^{-1}) lässt sich mit 181 kWh/m^2 die obere Grenze des Messdatenbereichs erreichen.

3. Kombination: 1 Sparer + 1 Verschwender pro Gebäude, die restlichen Bewohner liegen im Durchschnitt

   Es ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, zunächst mit 4 NE „Durchschnitt“ (18 °C und 0,3 h^{-1}), 1 NE „Verschwender“ (24 °C und 0,8 h^{-1}) und 1 NE „Sparer“ (14,5 °C und 0 h^{-1}). Die Simulation liefert einen etwas zu hohen mittleren Verbrauch pro Nutzeinheit von 183 kWh/m^2. Es gibt mehrere Möglichkeiten diesen mittleren Verbrauch nun zu senken. Das Verhalten des Sparers kann nach Tabelle 3.4 nicht weiter verringert werden. Statt dessen können entweder die

durchschnittlichen Nutzer oder der Verschwender mit ihrem Verhalten energiesparender sein. Da nach den Daten der Messdienstunternehmen möglichst eine große Spreizung entstehen soll, wird als nächstes das durchschnittliche Verhalten etwas nach unten korrigiert ($17,5\,°C$ und $0,3\ h^{-1}$). Daraus ergibt sich ein mittlerer Verbrauch pro Nutzeinheit von 178 kWh/m^2.

Die Tabelle 3.7 zeigt eine Übersicht verschiedener Beispielvarianten und die sich aus der Simulation ergebenden Verbräuche sowie die daraus resultierenden normierten Verbrauchsfaktoren.

Tabelle 3.7: Beispiele der Variantenrechnung und zugehörige normierte Verbrauchsfaktoren

Variante	**Wohnung**	T_L °C	β_F h^{-1}	v_j kWh/m^2	v_m kWh/m^2	$v_{j,n}$ -
1	1	18	0,3	191	160	1,192
	2	18	0,3	186	160	1,161
	3	14,5	0,0	78	160	0,487
	4	18	0,3	142	160	0,892
	5	18	0,3	184	160	1,150
	6	18	0,3	179	160	1,119
2	1	18	0,3	191	151	1,262
	2	18	0,3	190	151	1,259
	3	14,5	0,0	79	151	0,523
	4	14,5	0,0	79	151	0,524
	5	18	0,3	184	151	1,218
	6	18	0,3	183	151	1,214
3	1	21,5	0,6	281	177	1,587
	2	17,5	0,3	174	177	0,983
	3	17,5	0,0	130	177	0,733
	4	17,5	0,3	135	177	0,761
	5	17,5	0,3	171	177	0,968
	6	17,5	0,3	171	177	0,967
4	1	23	0,7	311	181	1,714
	2	17,5	0,3	173	181	0,955
	3	17,5	0,3	128	181	0,707
	4	17,5	0,3	135	181	0,741
	5	17,5	0,3	171	181	0,942
	6	17,5	0,3	171	181	0,941
5	1	24	0,8	340	178	1,904
	2	17,5	0,3	173	178	0,973
	3	14,5	0,0	76	178	0,424
	4	17,5	0,3	136	178	0,761
	5	17,5	0,3	174	178	0,979
	6	17,5	0,3	171	178	0,959

Aus den normierten Verbrauchsfaktoren der in diesem Beispiel vorgestellten Berechnungen ergibt sich die folgende Häufigkeitsverteilung, die in Abbildung 3.13 zu sehen ist.

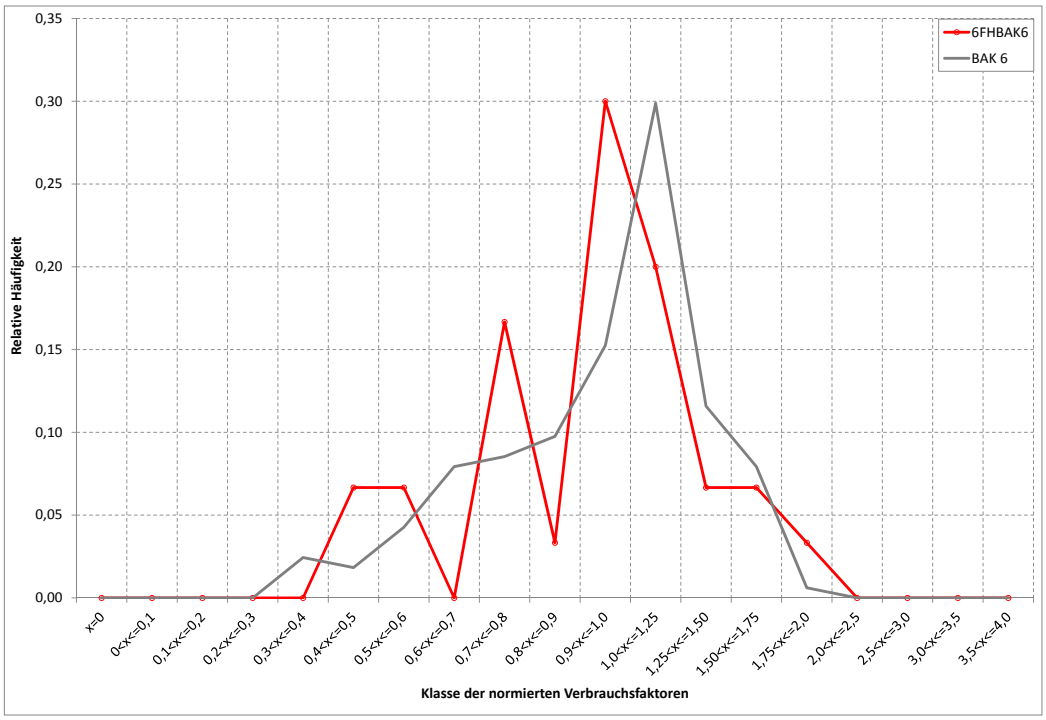


Abbildung 3.13: Anpassung der relativen Häufigkeitsverteilung der normierten Verbrauchsfaktoren der BAK 6 am Beispiel eines 6-Familienhauses

Die rote Kurve zeigt die Verteilung, die sich aus den in diesem Abschnitt simulierten Varianten ergibt. Dabei wurden natürlich nur die Simulationen berücksichtigt, deren Ergebnisse für den mittleren Verbrauch pro Nutzeinheit in den in Tabelle 3.6 dargestellten Grenzen des Messdatenbereichs für 6-FH der BAK 6 liegt. Die Kurve sieht auf Grund der geringen Datengrundlage noch recht ungleichmäßig aus. Trotzdem ist schon eine deutliche Spreizung der normierten Verbrauchsfaktoren zwischen $0,3 < x \leq 0,4$ und $1,75 < x \leq 2,0$ zu erkennen. Mit weiteren Kombinationen der verschiedenen Nutzertypen im 6-FH, Einbeziehung des Verbrauchs zur Trinkwassererwärmung und weiteren Variationen in den anderen Gebäudegrößen der BAK 6 entsteht die graue Kurve in der Abbildung 3.13. Diese ist nun deutlich gleichmäßiger und der Peak liegt, wie bei den Kurven aus den Daten der Messdienstunternehmen im Bereich von $1,0 < x \leq 1,25$. Basierend auf dieser Vorgehensweise wurden die Simulationen für alle BAK durchgeführt bis die in Abbildung 3.12 auf Seite 33 dargestellten Kurven entstanden. Diese stellen einen Kompromiss aus Energiekennzahlbereichen und Häufigkeitsverteilungen der Messdienstunternehmen, sowie den Möglichkeiten der Anpassungen der Simulationen an reale Verhältnisse dar.

3.6 Validierung der Modelle

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Simulation in das von den Messdienstunternehmen zur Verfügung gestellte Datenmaterial eingeordnet werden. Die folgenden Abbildungen 3.14, 3.15 und 3.16 stellen Mittelwerte gemessener Energiekennzahlen aus der Datensammlung den simulierten Daten gegenüber. Während Bild 3.14 spezifische

Verbräuche für Trinkwassererwärmung und Heizung enthält, vergleichen 3.15 und 3.16 jeweils die Mittelwerte der gemessenen, auf die Wohnfläche bezogenen Energiekennzahlen für nur Heizung bzw. nur Trinkwassererwärmung.

Die Klassifizierung der Gebäude erfolgte wieder gemäß Tabelle 2.5 auf Seite 13. Die schwarzen Balken stellen die, aus dem Modell gewonnenen Daten dar. Innerhalb der Gruppe der kleinen Gebäude mit 2 Nutzeinheiten sind sie minimal zu hoch, ansonsten passen sie sich gut in die Energiekennzahlbereiche der verwendeten Datensätze ein. Da sich Gebäude mit 17 bis 60 Nutzeinheiten (SSG) oder mehr in ihrem energetischen Verbrauchsverhalten nicht wesentlich von der nächst kleineren Gruppe mit 9 bis 16 Wohnungen (SG) unterscheiden, wurde auf ein entsprechendes Modell verzichtet. Dafür zeigt die Position 4 die Simulationsergebnisse für Gebäude, die ab dem Jahr 2009 erbaut wurden. Der verwendete Felddatensatz enthält keine Gebäude dieser Gruppe. Hier stellen die Modellergebnisse eine Extrapolation der zu erwartenden Verbrauchswerte hochwärmegedämmter Gebäude dar.

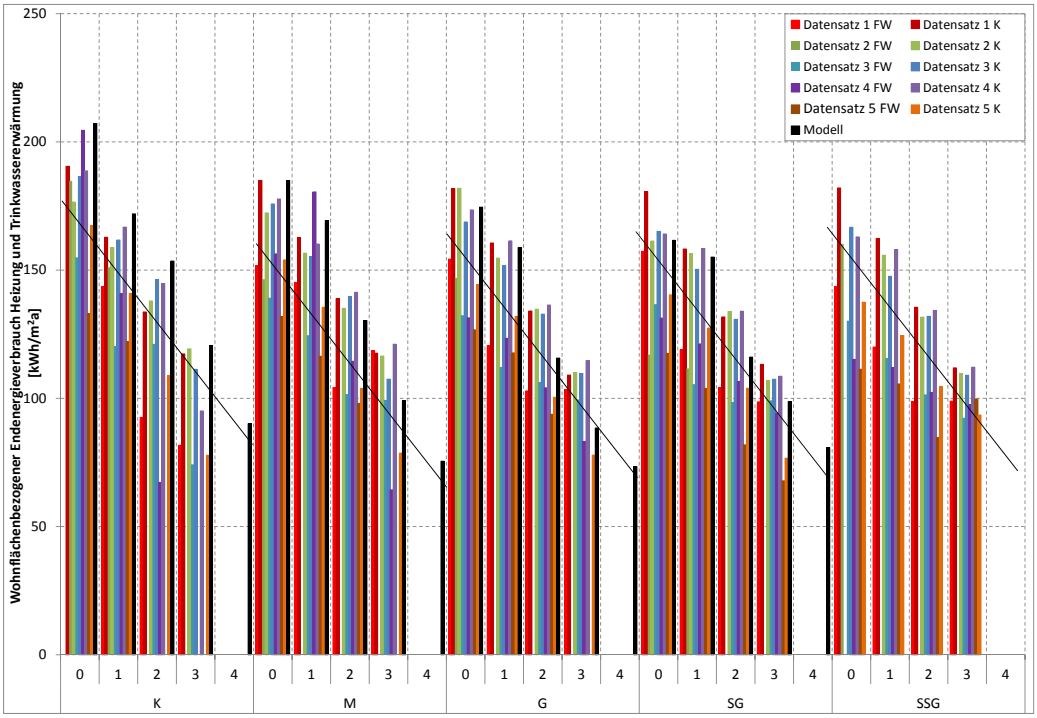


Abbildung 3.14: Vergleich der Energiekennzahlen für Heizung und Trinkwassererwärmung

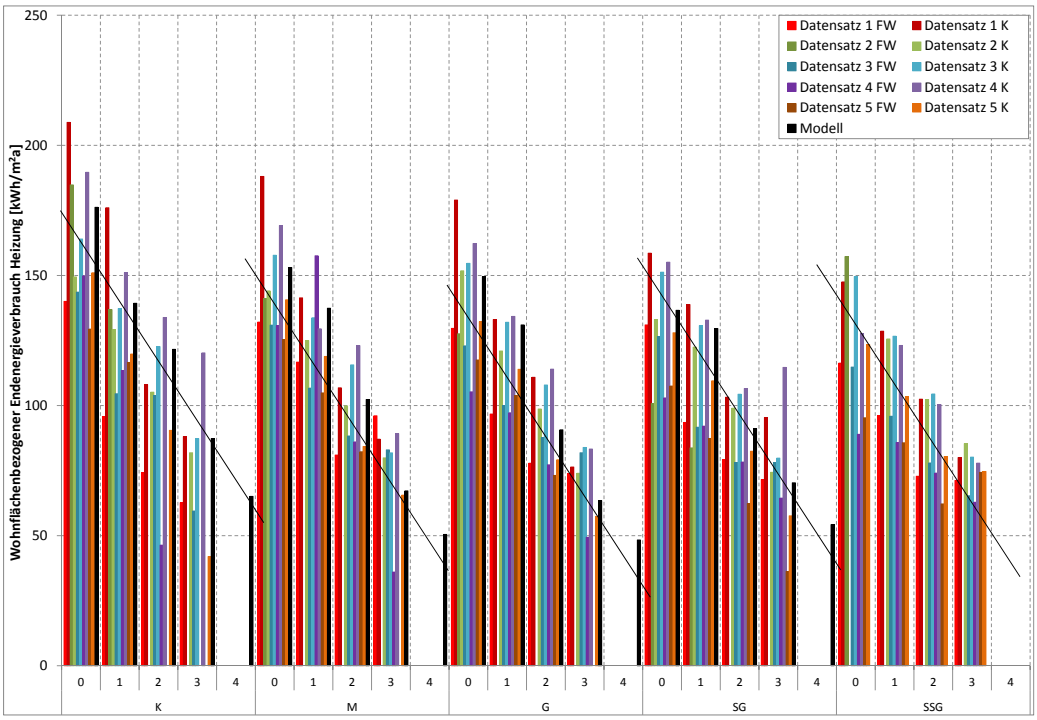


Abbildung 3.15: Vergleich der Energiekennzahlen für nur Heizung

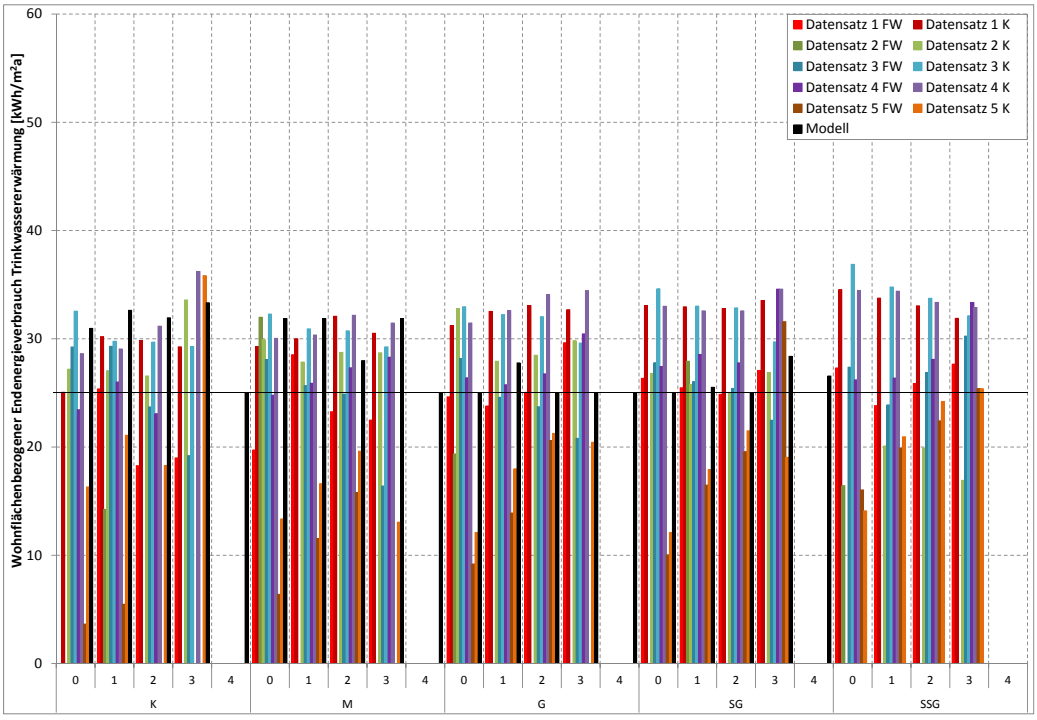


Abbildung 3.16: Vergleich der Energiekennzahlen für nur Trinkwassererwärmung

3.7 Korrelationen zwischen Nutzerverhalten und Energieverbrauch innerhalb der Baualtersklasse

Um Zusammenhänge zwischen dem Nutzerverhalten und der Verbrauchsspreizung innerhalb der Baualtersklassen zu erkennen, werden in den folgenden Diagrammen die schon aus Abschnitt 3.5.2 auf Seite 28 bekannten Häufigkeitsverteilungen des normierten Verbrauchsfaktors angewandt. Außerdem sind in Abbildung 3.17 die angenommenen mittleren Raumtemperaturen und in Abbildung 3.18 die zusätzlichen Fensterluftwechsel getrennt nach Baualtersklassen über den zugehörigen normierten Verbrauchsfaktoren als Punktewolke aufgetragen. Es zeigt sich zunächst, dass relativ große Temperaturunterschiede erforderlich sind, um eine aus den statistischen Daten bekannte Verbrauchsspreizung nachbilden zu können. Die Raumtemperatursollwerte wurden zwischen 14, 5 und 25 °C variiert, wobei letztlich aber immer die Kombination aus Raumtemperatur, Luftwechsel und Trinkwarmwasserverbrauch angepasst wurden. Von Interesse ist hier aber nicht vorrangig die Höhe der Raumtemperatur sondern der Einfluss der Raumtemperaturänderung auf die Verbrauchsspreizung, d.h. welche Temperaturänderungen (Heraufsetzen oder Absenken) sind notwendig um eine vorgegebene Verbrauchsspreizung zu erhalten, bzw. analog bei der Veränderung der Luftwechselzahlen.

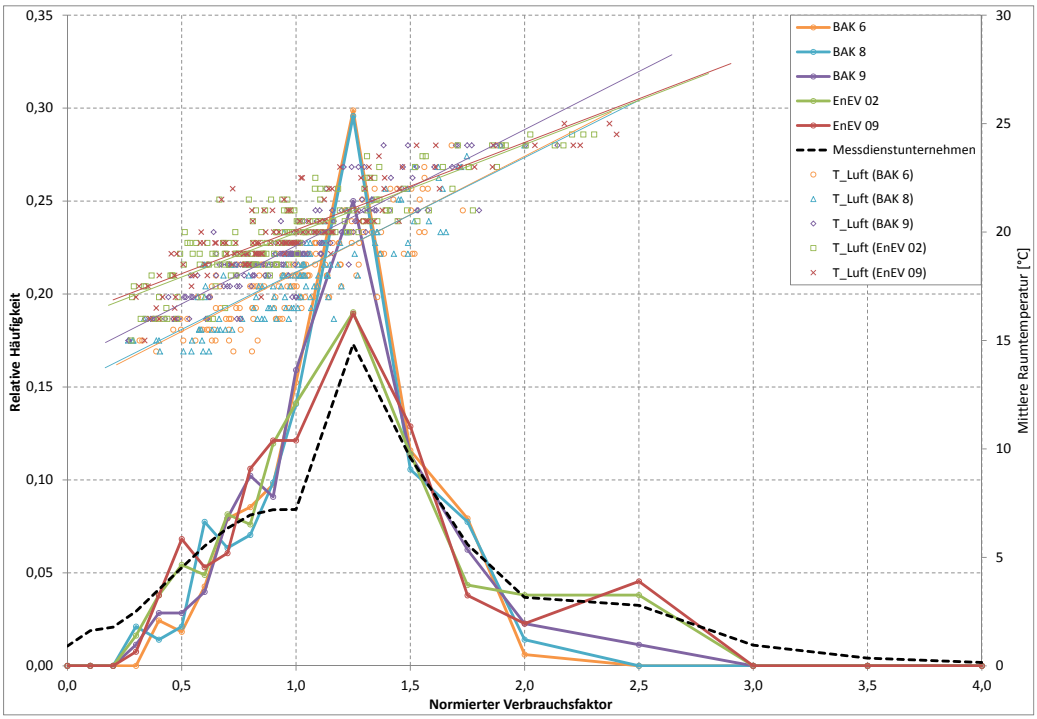


Abbildung 3.17: Verbrauchsspreizung für unterschiedliche BAK und zugehörige mittlere Raumluftemperatur

Zur Verdeutlichung werden die Punktewolken um Trendlinien entsprechend der Baualtersklassen ergänzt. Mit Hilfe dieser Linien ist in beiden Diagrammen derselbe Zusammenhang zwischen Nutzerverhalten und Verbrauchsspreizung zu erkennen: je besser die energetische Qualität der Gebäudehülle wird, desto flacher werden die Trendlinien. Je fla-

cher die Trendlinien sind, desto empfindlicher reagiert die Heizwärmeverbrauchsspreizung auf geänderte Raumtemperaturen bzw. Fensterluftwechsel, d.h. die gleiche Temperatur- bzw. Luftwechseländerung in einer Nutzeinheit eines Gebäudes der BAK 6 bedeutet eine geringere Auswirkung auf die Verbrauchsspreizung als in der gleichen Nutzeinheit desselben Gebäudes mit Dämmstandard entsprechend der EnEV 09. Es lassen sich also im Neubau bzw. in Gebäuden mit geringem flächenbezogenen Wärmebedarf bereits mit kleineren Temperaturdifferenzen zwischen den Nutzereinheiten größere Schwankungen im Heizwärmeverbrauch erreichen.

Mit steigendem Wärmeschutzniveau hat der Nutzer mit seinem Verhalten größeren Einfluss auf die Verbrauchsspreizung. Das relative Einspar- bzw. Verschwendungspotenzial ist im Neubau demzufolge größer. Entsprechend wird der Nutzer mit einer verbrauchsabhängigen Abrechnung gerechter behandelt. Dadurch bietet sie nicht nur einen Anreiz für Vielverbraucher, ihren Verbrauch zu reduzieren, sondern bestärkt auch die Sparer in ihrem Verhalten. In der weiteren Untersuchung ist zu prüfen, welche absoluten Werte (kWh, Euro, CO_2-Emissionen) hinter den Verbrauchsfaktoren stehen.

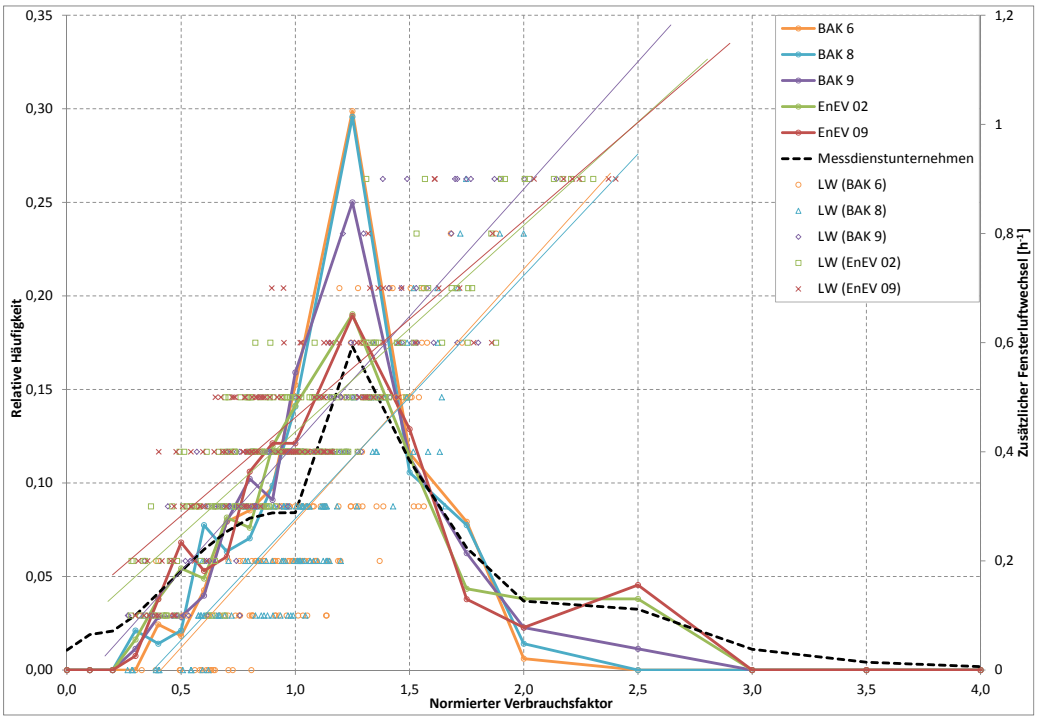


Abbildung 3.18: Verbrauchsspreizung für unterschiedliche BAK und zugehöriger zusätzlicher Luftwechsel

Die Abbildung 3.19 zeigt die normierten Verbrauchskurven entsprechend denen der vorhergehenden Abbildungen. Zusätzlich ist hier der Faktor für die Trinkwassererwärmung als Punktewolke angegeben. Das Diagramm wird an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber mit angegeben, denn erwartungsgemäß können zwischen Trinkwarmwasserverbrauch und Baualtersklasse keine Zusammenhänge festgestellt werden. Unabhängig von der energetischen Qualität der Gebäudehülle liegt der Energieverbrauch nach den Felddaten der Messdienstunternehmen durchschnittlich bei 26 $kWh/(m^2 \cdot a)$. Daraus folgt, dass mit sinkendem Energieverbrauch des Gebäudes bei höheren Dämmstandards der

absolute Verbrauch der Trinkwassererwärmung zwar in etwa konstant bleibt, dafür aber der relative Anteil des Warmwasserverbrauchs am Gesamtenergieverbrauch steigt. Dieser Zusammenhang konnte schon an Hand der Messdatenauswertung im Abschnitt 2.3.2 dargestellt werden (vgl. Abbildung 2.4 auf Seite 12). Mit ansteigender energetischer Qualität der Gebäudehülle gewinnt damit die exakte Erfassung und Verteilung des Trinkwarmwasserverbrauchs mit Hilfe von Warmwasserzählern und der verbrauchsabhängigen Abrechnung zunehmend an Bedeutung.

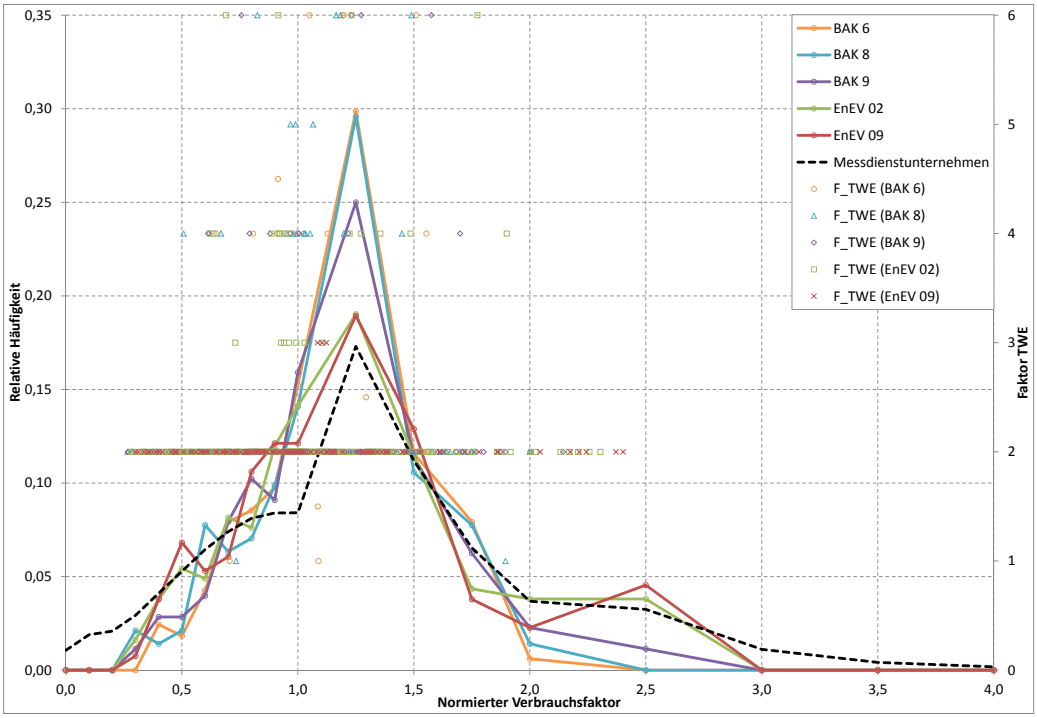


Abbildung 3.19: Verbrauchsspreizung für unterschiedliche BAK und zugehöriger Faktor für die Trinkwassererwärmung

3.8 Ableitung des relativen Verschwendungs- bzw. Einsparpotenzials

Im Folgenden soll untersucht werden, inwiefern das relative Einsparpotenzial durch die verbrauchsabhängige Abrechnung mit dem baulichen Wärmeschutz eines Gebäudes korreliert. Zahlreiche Studien belegen Energieverbrauchsreduzierungen infolge der Umsetzung der Heizkostenverordnung von etwa 20 % (vgl. Tabelle A.1 auf Seite 69). Mit Hilfe eines Beispielgebäudes der BAK 6 soll das Nutzerverhalten dahingehend verändert werden, dass eine Erhöhung des Verbrauchs um 20 % entsteht. Damit soll überprüft werden, wie das (hypothetische) Nutzerverhalten ohne verbrauchsabhängige Abrechnung aussehen könnte. Die so quantifizierte Änderung von Raumsolltemperatur und Fensterluftwechsel, wird anschließend auf je ein Beispielgebäude der restlichen Baualtersklassen angewandt. Es wird dabei vereinfachend und konservativ angenommen, dass sich ohne verbrauchsabhängige Abrechnung die für BAK 6 ermittelte relative Verhaltensänderung näherungsweise auch auf modernere Baualtersklassen übertragen

lässt. Aus der Erhöhung des Verbrauchs, lassen sich dann Rückschlüsse auf die Entwicklung der Verschwendungs- bzw. Einsparpotenziale bei Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehülle ziehen.

Die Simulationen sollen mit einem 6-Familienhaus erfolgen. Zunächst werden anhand der flächenbezogenen Verbräuche aus der Datensammlung der Messdienstunternehmen geeignete Varianten aus den Modellrechnungen gesucht. Die Tabelle 3.8 zeigt die Energieverbrauchsbereiche großer Gebäude nach Baualtersklasse und den Verbrauch des gewählten Modells.

Tabelle 3.8: Auswahl eines Referenzmodells auf Grundlage der Simulationen entsprechend der Baualtersklasse und dem zugehörigen Verbrauchsbereich (Messdaten) für große Gebäude

Baualtersklasse	**Verbrauchsbereich Messdaten** kWh/m^2	**Verbrauch gewähltes Referenzmodell** kWh/m^2
BAK 6	144 - 182	156,5
BAK 8	112 - 161	135,2
BAK 9	94 - 136	116,4
EnEV 02	78 - 115	94,9
EnEV 09	≈75	75,7

Die Referenzmodelle wurden aus der Gruppe der Simulationsmodelle mit den für den jeweiligen Dämmstandard ermittelten Verhaltensweisen (Temperatur und Luftwechsel entsprechend den Abbildungen 3.9 und 3.10 bzw. 3.11) ausgewählt. Den ausgesuchten Modellen liegt ein bestimmtes baualtersklassenspezifisches Nutzerverhalten zugrunde (vgl. Abschnitt 3.5.2), das zu dem entsprechenden flächenbezogenen Referenzverbrauch führt, der in der Tabelle 3.8 angegeben ist. Nun werden zunächst für das Referenzmodell der BAK 6 mittlere Raumlufttemperatur und Fensterluftwechsel in jeder der 6 Nutzeinheiten soweit erhöht, dass eine Steigerung des relativen Verbrauchs um 20 % erreicht wird. Die Tabelle 3.9 zeigt, die relativen Mehrverbräuche, die sich durch verschiedene Änderungen im Nutzerverhalten ergeben.

Tabelle 3.9: Relativer Mehrverbrauch infolge der Änderung des Nutzerverhaltens in einem 6-Familienhaus der BAK 6

Änderung Raumsolltemperatur	**Änderung Fensterluftwechsel**	**relativer Mehrverbrauch**
$+\,2,5$ K		20, 4 %
$+\,2$ K		16, 9 %
$+\,2$ K	$+\,0,1$ h^{-1}	19, 1 %
$+\,2$ K	$+\,0,15$ h^{-1}	20, 1 %
$+\,2$ K	$+\,0,2$ h^{-1}	21, 1 %

Es zeigt sich, dass sich mit einer Kombination aus Raumlufttemperatur- und Fensterluftwechselerhöhung eine gute Näherung an die zu erreichenden 20 % nachbilden lässt. Die zu beobachtenden Änderungen hinsichtlich Raumtemperatur und Fensterluftwechsel sind in einer plausiblen Größenordnung und decken sich mit Erfahrungswerten. Unter der Annahme, dass sich ohne verbrauchsabhängige Abrechnung das Nutzerverhalten im

Alt- und Neubau gleichermaßen ändert, soll im Weiteren mit der folgenden Variante gerechnet werden:

- Erhöhung der Raumsolltemperatur um $\Delta\vartheta = +\ 2\ \mathrm{K}$ und des Fensterluftwechsels um $\Delta\beta = +\ 0,1\ \mathrm{h}^{-1}$

in jeder Nutzeinheit des zu betrachtenden 6-Familienhauses. Die Annahme, dass sich die Änderungen im Nutzerverhalten von einem Gebäude der BAK 6 auf den Neubau übertragen lassen kann weder belegt noch widerlegt werden. Sie soll hier lediglich der Abschätzung dienen, inwiefern eine hypothetische Abschaffung der Heizkostenverordnung zu einem relativen Mehrverbrauch in den Gebäuden führt und in welchen Größenordnungen dieser in Gebäuden verschiedener Baualtersklassen auftreten kann. Damit wird ein Bereich aufgespannt innerhalb dessen sich die relativen Mehrverbräuche der Gebäude bewegen. Die Tabelle 3.10 zeigt die Auswirkungen der Nutzerverhaltensänderung in Sechsfamilienhäusern der verschiedenen Baualtersklassen.

Tabelle 3.10: Relativer Mehrverbrauch infolge der Änderung des Nutzerverhaltens in einem 6 Familienhaus verschiedener Baualtersklassen

Verhaltensänderung	BAK 6	BAK 8	BAK 9	EnEV02	EnEV09
$\Delta\vartheta = +\ 2\ \mathrm{K},\ \Delta\beta = +\ 0,1\ \mathrm{h}^{-1}$	$19,1\%$	$19,9\%$	$20,2\%$	$21,7\%$	$23,2\%$

Der relative Mehrverbrauch steigert sich um etwa $4,1\%$ von $19,1\%$ in der BAK 6 auf $23,2\%$ im Gebäude mit Dämmstandard EnEV09. Die Abbildung 3.20 zeigt diesen Zusammenhang noch einmal in grafischer Form.

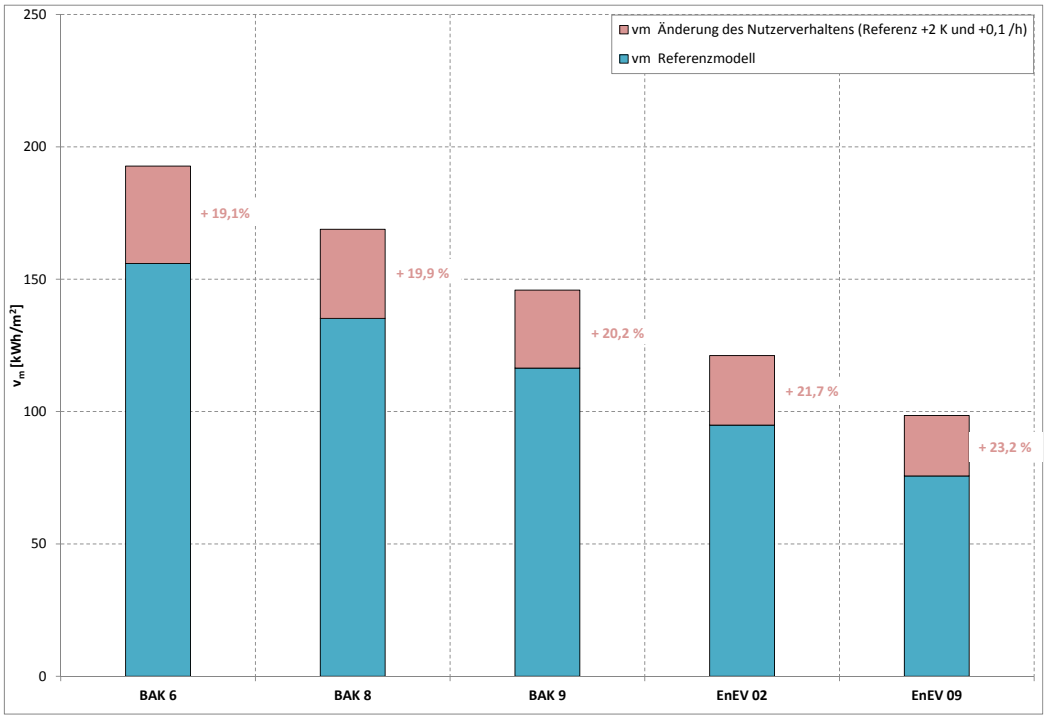


Abbildung 3.20: Relatives Verschwendungspotenzial für große Gebäude nach Baualtersklassen

Die blauen Grundbalken stellen die Verbräuche der jeweils gewählten Referenzmodelle gemäß Tabelle 3.8 dar. Diese kommen aus den im Abschnitt 3.5.2 erläuterten Simulationen, die mit Hilfe der Datensammlung der Messdienstunternehmen validiert wurden und enthalten damit die Einsparungen durch die verursachergerechte Abrechnung. Die hellroten Balken zeigen den relativen Mehrverbrauch bei Veränderung des Nutzerverhaltens in oben genannter Form. D.h., eine Erhöhung der mittleren Raumsolltemperatur jeder Wohnung um $\Delta\vartheta = +\ 2$ K und des mittleren Fensterluftwechsels um $\Delta\beta = +\ 0,1$ h^{-1} gegenüber der Referenzvariante.

Insgesamt kann, je nach Verhaltensänderung, im Neubau ein relatives Verschwendungspotenzial zustande kommen (vgl. Tabelle 3.10), welches das im Altbau unterstellte um 1/3 übersteigt, wenn man konservativ von einer gleichmäßigen Verhaltensänderung der Nutzer infolge der Abschaffung der verbrauchsabhängigen Abrechnung ausgehen würde. So wird auch mit steigenden Anforderungen an zu errichtende Gebäude und zunehmender Sanierung des Altbaus die weitere Umsetzung der Heizkostenverordnung sinnvoll sein.

4 Rentabilität und Wirtschaftlichkeit der Heizkostenverteilung

4.1 Vorbemerkungen

Im Folgenden soll die Rentabilität der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung ermittelt werden, um einen bewertenden Vergleich zu üblichen Modernisierungsmaßnahmen zu ermöglichen. Neben den reinen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sollen auch die sogenannten CO_2-Vermeidungskosten[7] ausgewiesen werden. Mit diesem Wert lässt sich die Verbrauchsabrechnung in wirtschaftlicher Hinsicht mit anderen Energieeffizienzmaßnahmen am Gebäude vergleichend bewerten. Darüber hinaus wird versucht, Beiträge der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung im Hinblick auf die CO_2-Problematik auszuweisen.

In [11] werden verschiedene Ansätze zur Vermeidung von CO_2-Emissionen (sogenannte Vermeidungshebel) miteinander verglichen und bewertet. Dafür erfolgte eine Berechnung der durch den Einsatz ausgewählter Vermeidungshebel erreichbaren Emissionsvermeidung sowie deren Umsetzungskosten. Diesen Betrachtungen lag ein Zeitraum von einem Basisjahr (1990 bzw. 1995) bis zu einem Zeitpunkt in der Zukunft (jeweils 2020 und 2030) zu Grunde. In Folge der Wirtschaftlichkeits- und Rentabilitätsbetrachtungen zur verbrauchsgerechten Heizkostenabrechnung in diesem Gutachten sollen mit [11] vergleichbare Ergebnisse entstehen. Dazu gehören das bisher umgesetzte und zukünfig umsetzbare CO_2-Vermeidungspotenzial sowie die Kosten der Abrechnung. Die dafür benötigten Eingangsgrößen sollen im Weiteren zunächst näher erläutert werden.

[7] „Zusätzliche Kosten (bzw.) Ersparnisse, die sich durch den Einsatz einer Technologie mit geringer Treibhausgasintensität gegenüber dem jeweils vorherrschenden Stand der Technik ergeben [...]“ [11]

4.2 Randbedingungen und Eingangsgrößen der Rentabilitäts- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

4.2.1 Verbraucherpreise

Sowohl für die nachfolgend angestellten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen als auch für die Berechnung der CO_2-Vermeidungskosten sind die Energiepreise für die Wärmeversorgung zu berücksichtigen. Dazu werden mittlere Verbraucherpreise für unterschiedliche Energieträger angesetzt. Grundlage der Mittelung sind die vom BMWi veröffentlichten Energiestatistiken [15]. Demnach waren über die vergangenen Jahre deutliche Preisänderungen zu erkennen. Abbildung 4.1 enthält eine Übersicht über die Entwicklung der Verbraucherpreise seit 1996. Die Preise enthalten sämtliche Steuern und Abgaben.

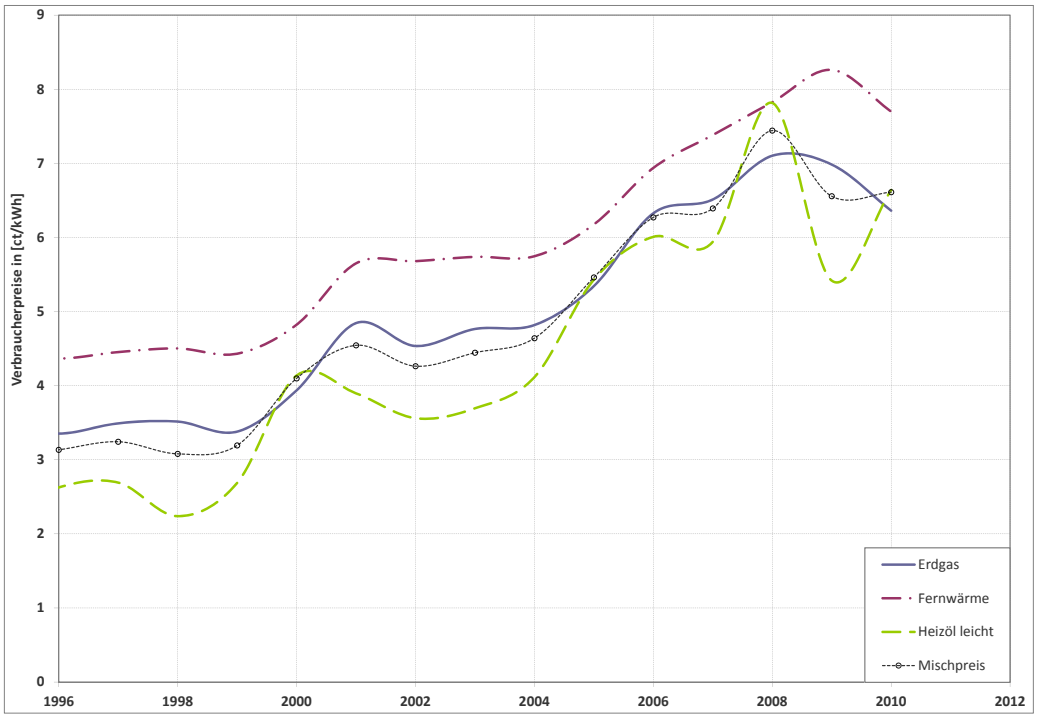


Abbildung 4.1: Verbraucherpreise Deutschland für ausgewählte Energieträger [15]

Bei der Berechnung der mittleren Energiekosten für Raumheizung und Trinkwassererwärmung (Mischpreis) wurden die Anteile der Energieträger Gas, Öl und Fernwärme entsprechend der Angaben in [15] gewichtet. Es ergibt sich für 2010 ein mittlerer Preis von $p_Q = 6,61$ ct/kWh. Dabei handelt es sich um eine Erhöhung von $3,48$ ct/kWh gegenüber 1996. Für die weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass sich die Preissteigerung in leicht abgeschwächter Form bis 2030 fortsetzt. Der angenommene Verlauf der Energiepreisentwicklung ist in der Abbildung 4.2 dargestellt. Er entspricht einer Steigerung des Verbraucherpreises um $3,21$ ct/kWh gegenüber 2010 und entsprechend $6,68$ ct/kWh innerhalb des gesamten betrachteten Zeitraumes zwischen 1996 bis 2030. Daraus ergibt sich für 2030 ein Mischpreis von $9,82$ ct/kWh.

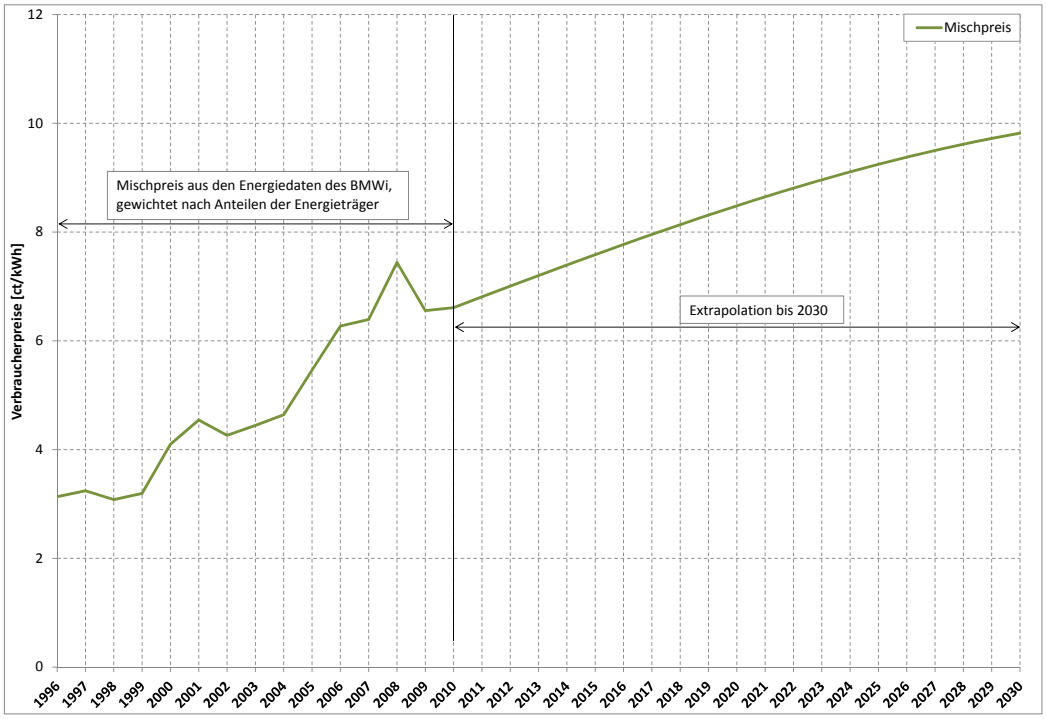


Abbildung 4.2: Entwicklung des mittleren Verbraucherpreises für die Wärmeversorgung

4.2.2 Entwicklung des für die verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung relevanten Wohnungsbestandes in Deutschland

Für die Bewertung der Kosten für die verbrauchsabhängige Abrechnung ist neben den Dienstleistungskosten der Abrechnung auch die Anzahl der insgesamt abgerechneten Wohnungen relevant. Das statistische Bundesamt stellt in seinen jährlichen Veröffentlichungen [13] unter anderem Übersichten zur Entwicklung des Wohnungsbestandes in Deutschland von 1996 bis 2009 zur Verfügung.

Tabelle 4.1: Wohnungsbestand Deutschland in den Jahren 2000 bis 2009 [13] und Anteil der abgerechneten Wohneinheiten (WE)

Bestand an Wohngebäuden 2009:	18 Mio
Bestand an Wohnungen 2009:	39 Mio
Marktpotenzial abzurechn.Wohnungen:	20 Mio
Anteil:	50,8%

Jahr		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Wohneinheiten	WE	37629526	37921153	38157911	38369965	38586543	38772437	38971262	39132222	39267887	39390468
abger. WE	WE	19105905	19253974	19374185	19481853	19591817	19686203	19787154	19868879	19937761	20000000

Die Tabelle 4.1 zeigt einen Ausschnitt der enthaltenen Daten. Dabei sind die grün hinterlegten Zahlen, der genannten Veröffentlichung [13] entnommen. Die obere Auflistung für 2009 ist schon aus dem Abschnitt 2.2 bekannt. An dieser Stelle wurde bereits der Bestand an Wohngebäuden und darin enthaltenen Wohnungen für 2009 genannt (dort aus [19]) und darauf hingewiesen, dass nicht alle diese Wohnungen nach Heizkostenverordnung abgerechnet werden. Das sind im wesentlichen Einfamilienhäuser, aber auch einige Zwei- und zentral beheizte Mehrfamilienhäuser. Das Marktpotenzial der für die Heiz- und Wasserkostenverteilung relevanten Wohnungen wurde mit 20 Mio. beziffert (blaues Feld in Tabelle 4.1). Daraus ergibt sich ein Anteil abzurechnender Nutzeinheiten am Gesamtwohnungsbestand von $50,8$ %. Angewendet auf die übrigen Jahre von 2000 bis 2008 ergeben sich die restlichen Werte in der Tabelle für die Anzahl abgerechneter Wohnungen (orange hinterlegt).

Für den angestrebten Vergleich mit den Vermeidungshebeln aus [11] ist es notwendig, die Entwicklung aller jährlich veränderlichen Eingangsgrößen bis 2030 möglichst sinnvoll abzuschätzen. Die Bestandsentwicklung von 1996 bis 2010 kann aus den Daten des statistischen Bundesamtes entnommen werden ([13], [16]). Mithilfe einer Veröffentlichung zur Wohnungsmarktentwicklung des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung [14] kann eine Prognose bis 2030 erfolgen.

4.2.3 Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Wärme in Deutschland

Die Informationen zur Entwicklung des Energieverbrauchs in deutschen Haushalten werden im Wesentlichen einer Veröffentlichung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie [15] entnommen. Dort sind die Verbrauchsdaten mehrerer Jahre von 1990 bis 2010 angegeben. Die Tabelle 4.2 zeigt einen Ausschnitt der Daten aus [15] für die Jahre 2005 bis 2010. Der Gesamtendenergieverbrauch der deutschen Haushalte entsprach 2010 demnach 2583 PJ.

Tabelle 4.2: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte nach Energieträgern (alle Angaben in PJ) [15]

Energieträger	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Steinkohle	15	20	26	25	17	25
Braunkohle	17	20	13	20	19	23
Erneuerbare	196	205	199	229	251	292
übrige feste Brennstoffe	0	0	0	0	0	0
Heizöl	686	727	439	647	554	559
übrige Mineralölprodukte	3	2	2	2	4	4
Gas	1.012	987	920	969	954	992
darunter Naturgas	985	960	894	940	928	964
Strom	509	509	505	502	501	508
Fernwärme	154	151	155	164	176	180
Insgesamt	**2.591**	**2.622**	**2.259**	**2.558**	**2.476**	**2.583**

Die jährlichen Endenergieaufwendungen der privaten Haushalte nach BMWi enthalten auch Verbräuche, die nicht aus der Bereitstellung von Raumheizung und Warmwasser resultieren (z.B. Strom für die Beleuchtung). Da außerdem die durch Strom erzeugte Wärme nicht nach Heizkostenverordnung abgerechnet wird, muss der gesamte Stromverbrauch vom Gesamtverbrauch abgezogen werden. Für 2010 wird der Stromverbrauch mit 508 PJ ausgewiesen. Der Anteil des Endenergieverbrauchs privater Haushalte für Wärme betrug 2010 also:

$$2583\ \text{PJ} - 508\ \text{PJ} = 2075\ \text{PJ}$$

In diesem Wert ist der Wärmeverbrauch aller deutschen Haushalte enthalten. Einige Zwei- sowie zentral beheizte Mehrfamilienhäuser werden allerdings nicht nach Heizkostenverordnung abgerechnet. Der Anteil des Wärmeverbrauchs abzurechnender Nutzeinheiten am Gesamtwärmeverbrauch deutscher Haushalte beträgt $42,6\%$ (vgl. Abschnitt 2.2). Damit ergibt sich der absolute Anteil des Endenergieverbrauchs für Wärme in den für die Heizkostenverteilung relevanten Nutzeinheiten Deutschlands für 2010 zu:

$$0,426 \cdot 2075\ \text{PJ} = 884\ \text{PJ}$$

Auf diese Weise werden alle jährlichen Endenergieverbräuche aus [15] umgerechnet. Im Anschluss erfolgt eine Witterungsbereinigung der so gewonnenen Ergebnisse. Dazu müssen zunächst die klimaabhängigen und die von klimatischen Bedingungen unabhängigen Verbrauchsanteile bestimmt werden. Da die jährlich unterschiedlichen klimatischen Bedingungen (z.B. besonders milde oder besonders kalte Heizperioden) nur den Anteil des Wärmeverbrauchs beeinflussen, der für die Raumheizung zuständig ist, muss zunächst der Verbrauchsanteil der Trinkwassererwärmung abgetrennt werden. Dazu werden wieder die dieser Studie zugrunde liegenden Verbrauchsdaten verwendet. Aus ihnen kann

ein nach Anzahl der Nutzeinheiten gewichteter mittlerer Warmwasseranteil von 19 % berechnet werden. Dazu wird beachtet, dass ca. 60% der Wohnungen eine zentrale Trinkwassererwärmung haben (Auskunft: Techem). Damit wird der Verbrauchsanteil der Warmwasserbereitung bestimmt und vom Gesamtwärmeverbrauch abgezogen, z.B. im Jahr 2010:

$$0,6 \cdot (1 - 0,19) \cdot 884 \text{ PJ} + 0,4 \cdot 884 \text{ PJ} = 783 \text{ PJ}$$

Der übrig gebliebene Verbrauchsanteil der Raumheizung kann nun der Witterungsbereinigung unterzogen werden. Ein Softwaretool des Instituts Wohnen und Umwelt [17] berechnet zu diesem Zweck Gradtagzahlen und Klimafaktoren deutscher Städte aus den Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes. Für die Berechnung werden entsprechend dem Referenzklima der DIN V 4108-6 [28] die Klimafaktoren der Stadt Würzburg ausgewählt. Die Witterungsbereinigung erfolgt durch Multiplikation dieser Klimafaktoren mit den Endenergieverbräuchen, z.B. für 2010 mit einem Klimafaktor für Würzburg von 0,97:

$$0,97 \cdot 783 \text{ PJ} = 760 \text{ PJ}$$

Der so entstandene witterungsbereinigte Wert des Wärmeverbrauchs für die Raumheizung wird nun wieder mit dem vorher abgetrennten Verbrauchsanteil für die Trinkwassererwärmung addiert. Damit ergibt sich für alle abgerechneten Nutzeinheiten im Jahr 2010 ein witterungsbereinigter Endenergieverbrauch für Wärme von 861 PJ.

Im Berechnungs-Tool des IWU stehen ausschließlich Daten für die Jahre 2000 bis 2010 zur Verfügung, weshalb die Witterungsbereinigung nur für diese Jahre erfolgt.

Die so vorbereiteten Endenergieverbrauchswerte werden für die Berechnung der jährlichen CO_2e-Vermeidungskosten von 1996 bis 2010 genutzt. Für eine weiterführende Auswertung bis 2020 bzw. 2030 muss der zukünftige Verbrauch anhand dieser Daten extrapoliert werden. Die Abbildung 4.3 zeigt die nach obiger Vorgehensweise aufbereiteten jährlichen Endenergieverbräuche für Wärme in den für die Heizkostenverteilung relevanten deutschen Nutzeinheiten von 1996 bis 2010. Für die Prognose der Jahre nach 2010 bis 2030 ist eine extrapolierte Verbrauchskurve eingezeichnet.

Dafür wird davon ausgegangen, dass der Energieverbrauch im Gebäudesektor auch nach 2011 weiterhin absinkt. Allein die Bestrebungen der Bundesregierung bspw. mit fortschreitender EnEV und den damit verbundenen Energiebedarfsverminderungen von Neubauten und zu sanierendem Altbaubestand, werden zu niedrigeren Endenergieverbräuchen führen. Aus diesen Überlegungen resultiert der in Abbildung 4.3 dargestellte Kurvenverlauf. Mit diesen prognostizierten Verbrauchswerten werden im Weiteren die zukünftig zu erwartenden CO_2-Einsparungen sowie -Vermeidungskosten der Verbrauchsabhängigen Abrechnung berechnet.

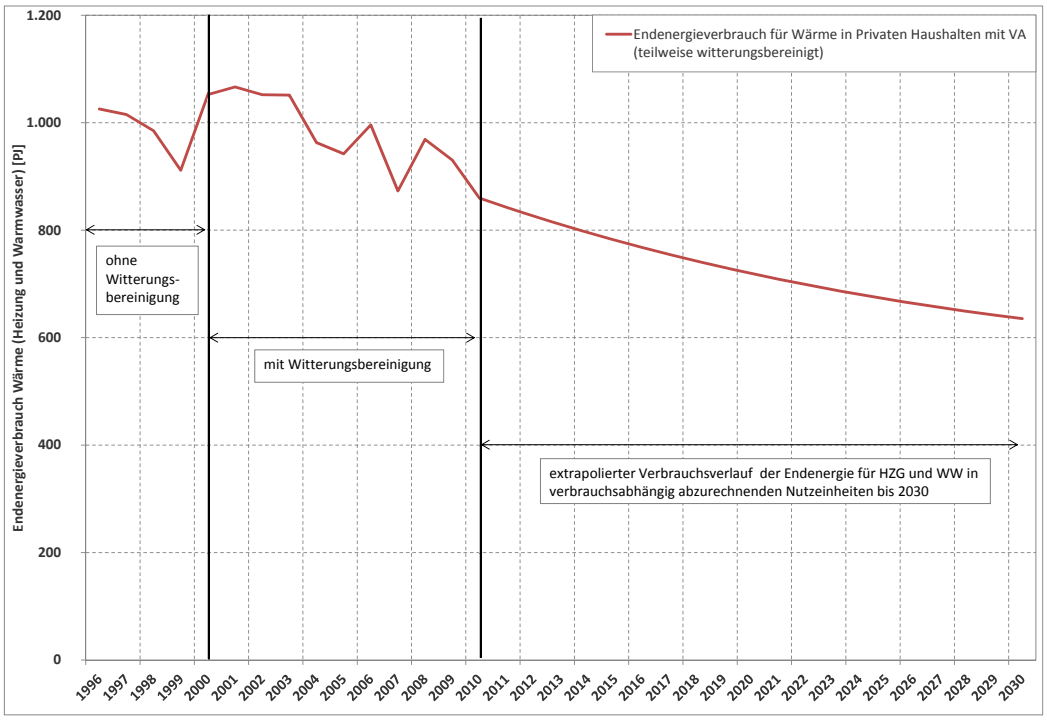


Abbildung 4.3: Prognostizierte Wärmeverbrauchsentwicklung für Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung bis 2030 mit Hilfe von [15] und [17]

4.2.4 Emissionsfaktoren

Der Emissionsfaktor ist ein stoff- und prozessspezifischer Wert. Er bezeichnet die auf den unteren Heizwert bezogenen Emissionen. Die Tabelle 4.3 gibt CO_2e-Emissionsfaktoren für Gas, Öl und Fernwärme an.

Tabelle 4.3: Emissionsfaktoren für Energieträger zur Wärmeversorgung ([3] und [21])

Energieträger	Emissionsfaktor CO_2-Äquivalent	
	t/TJ	g/kWh
Erdgas	55,8	200,9
Öl	74,4	267,8
Fernwärme	71,1	255,9

Hierbei ist zu beachten, dass der Wert für die Fernwärme sich in Abhängigkeit von der Art der Wärmeerzeugung ändert und deshalb nicht jedes Jahr gleich angenommen werden kann. In einer Studie des Öko-Instituts [21] werden Emissionsfaktoren für Fernwärme für die Jahre 2000 und 2005 berechnet und dazwischen linear interpoliert. Es ergeben sich Werte entsprechend Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4: Emissionsfaktoren für Fernwärme in den Jahren 2000 bis 2005 nach [21]

	Einheiten						
Jahr	a	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Faktor FW	g/kWh	**269**	266,4	263,8	261,2	258,5	**255,9**

Führt man die Werte entsprechend dem linearen Ansatz in [21] weiter, ergibt sich folgender Zusammenhang für die Emissionsfaktoren der Fernwärme, der in Abbildung 4.4 zu sehen ist.

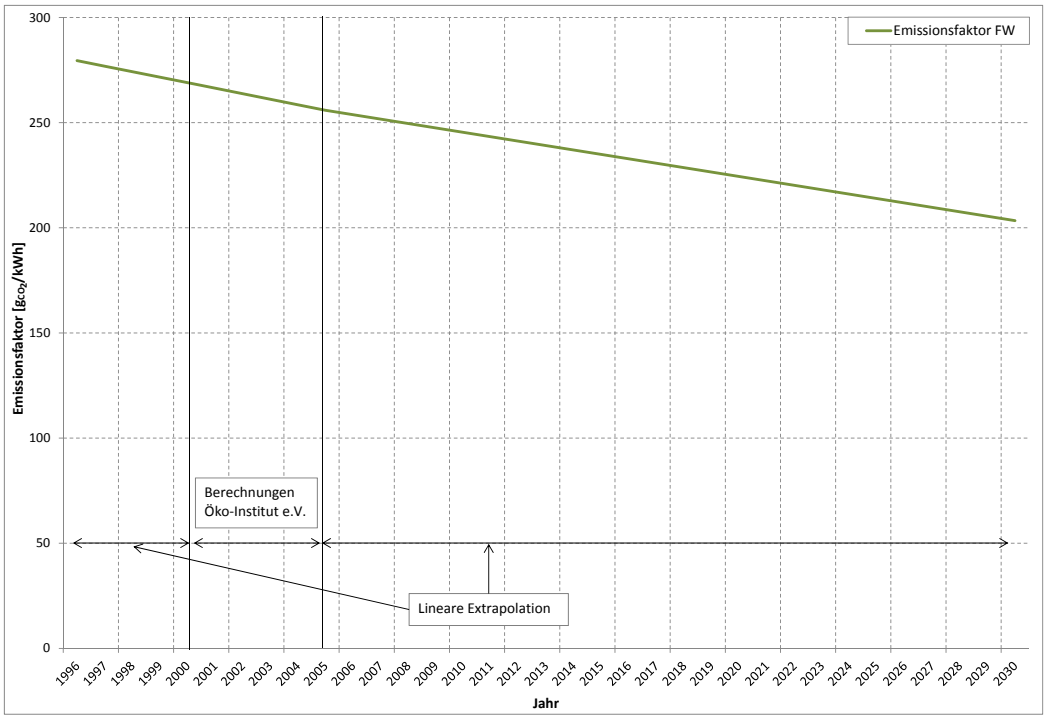


Abbildung 4.4: Emissionsfaktoren für Fernwärme [21]

Für die Berechnung der CO_2e-Vermeidungskosten wird aus den Emissionsfaktoren ein mittlerer Faktor gebildet. Dieser wird entsprechend der Angaben in [15] nach Anteilen der Energieträger Gas, Öl und Fernwärme an der Wärmeversorgung der privaten Haushalte gewichtet und liegt z.B. im Jahr 2010 bei 227, 1 g_{CO_2e}/kWh.

4.3 Wirtschaftlichkeit

Die Verringerung des Wärmeverbrauchs für Heizung und Trinkwassererwärmung der deutschen Haushalte infolge der Verhaltensänderungen der Nutzer durch die Einführung und Umsetzung der Heizkostenverordnung wird in entsprechenden Veröffentlichungen im Durchschnitt mit 20 % beziffert (vgl. Abschnitt 2.1). Auf Grundlage dieser 20 %igen Einsparung werden im Folgenden die Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit der verbrauchsabhängigen Abrechnung und ihrer Auswirkungen auf die CO_2-Problematik berechnet. Zudem sollen die Erkenntnisse zum Verschwendungspotential aus Abschnitt 3.8 in die Betrachtungen mit einfließen.

Die Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit beruhen auf einem einfachen Vergleich der Kosten für das System zur Heizkostenverteilung und den eingesparten Energiekosten infolge reduzierten Energieverbrauchs. Es werden daher die Kosteneinsparungen für den Nutzer als Differenz aus Energiekosteneinsparungen in Abhängigkeit vom flächenbezogenen Wärmeverbrauch für Heizung und Trinkwassererwärmung sowie der für die Heizkostenabrechnung erforderlichen Kosten für eine durchschnittliche Geräteausstattungstechnologie unter Verwendung elektronischer Heizkostenverteiler und die Abrechnungsdienstleistung in der Abbildung 4.5 aufgetragen. Dabei wird eine typische Wohnungsgröße von $A = 80\,\mathrm{m}^2$ für eine 3-Zimmerwohnung unterstellt und zunächst von der schon erwähnten Verbrauchsreduzierung von 20 % ausgegangen.

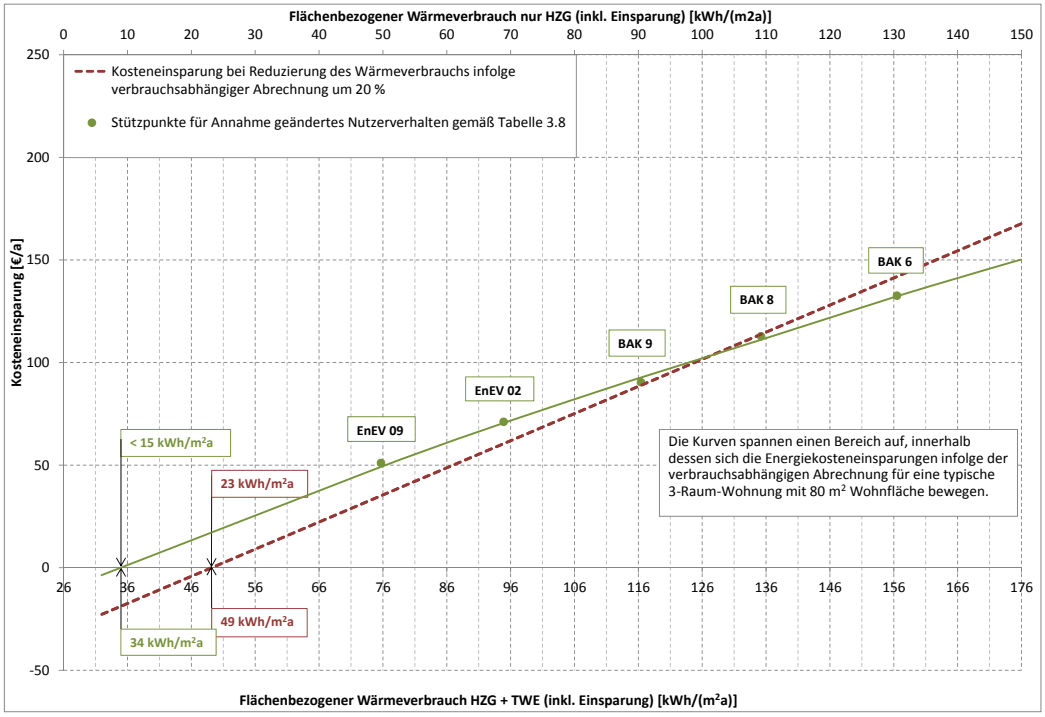


Abbildung 4.5: Jährliche Kosteneinsparung durch Heizkostenverteilung (der flächenbezogene Wärmeverbrauch enthält die 20%ige Einsparung durch verbrauchsabhängige Abrechnung)

In Abschnitt 3.8 wurde bereits das mögliche Verschwendungs- bzw. Einsparpotential der verbrauchsabhängigen Abrechnung in Abhängigkeit der Baualtersklassen diskutiert. Dort

wurde ein mögliches Szenario zur Erhöhung des Energieverbrauchs infolge angepassten Nutzerverhaltens erarbeitet:

- Erhöhung der Raumsolltemperatur um $\Delta\vartheta = +\ 2$ K und des Fensterluftwechsels um $\Delta\beta = +\ 0,1$ h^{-1}

Geht man von einer gleichmäßigen Veränderung des Nutzerverhaltens bei Abschaffung der Heizkostenverordnung aus, lassen sich je nach Baualtersklasse relative Mehrverbräuche zwischen 19, 1 % und 23, 2 % erreichen. Mithilfe dieses Szenarios und den Referenzmodellen aus Abschnitt 3.8 können die Stützpunkte in Abbildung 4.5 eingefügt werden. Die bei Verbindung dieser Punkte mit einer Trendlinie entstehende Kurve spannt mit der 20 %Kurve einen Bereich auf, innerhalb dessen die tatsächliche jährliche Energiekosteneinsparung einzuordnen ist, die sich mit Hilfe der verbrauchsabhängigen Abrechnung erreichen lässt. Die Schnittpunkte der Kurven mit der Abszissenachse stellen die Grenzwerte des flächenbezogenen Wärmeverbrauchs dar, ab denen sich die Umsetzung der Heizkostenverordnung als wirtschaftlich erweist.

Der Einsatz der Heizkostenverteilung ist wirtschaftlich, wenn die aus der Reduzierung des Wärmeverbrauchs resultierenden Energiekosteneinsparungen größer sind als die mittleren Jahreskosten der Heizkostenverteilung. Dies wäre unter der ursprünglichen Annahme einer 20 %igen Einsparung ab einem flächenbezogenen Wärmeverbrauch von 49 kWh/m^{2}a (Raumheizung + TWE) der Fall. Wie der Abbildung 3.14 zu entnehmen ist, trifft dies bei den Bestandsgebäuden in jedem Fall und sogar für den Neubau zu, so dass für den derzeit erfassten Gebäudebestand die Heizkostenverteilung eine wirtschaftliche Maßnahme mit Amortisationszeiten unter einem Jahr darstellt. Eine Übersicht über zu erwartenden Grenzwerte für die Wirtschaftlichkeit liefert Tabelle 4.5.

Tabelle 4.5: Grenzwerte des mittleren Jahresverbrauchs

Szenario	Grenzwert Wärmeverbrauch HZG + TWE	Grenzwert Wärmeverbrauch nur HZG
Pauschal 20%	49 kWh/(m^2 · a)	23 kWh/(m^2 · a)
$\Delta\vartheta = +\ 2$ K und $\Delta\beta = +\ 0,1$ h^{-1}	34 kWh/(m^2 · a)	$<$ 15 kWh/(m^2 · a)

Der Grenzwert verschiebt sich bei Annahme einer konkreten Verhaltensänderung der Nutzer ($\Delta\vartheta = +\ 2$ K, $\Delta\beta = +\ 0,1$ h^{-1}) gegenüber der pauschalen 20 %-Annahme in Richtung geringeren Wärmeverbrauchs. Damit wäre die Durchführung der verursachergerechten Abrechnung schon bei einen flächenbezogenen Wärmeverbrauch für Heizung und Trinkwassererwärmung von 34 kWh/(m^2 · a) wirtschaftlich. Es ist davon auszugehen, dass sich die tatsächlichen Grenzwerte innerhalb dieses Bereiches zwischen 34 und 49 kWh/(m^2 · a) befinden.

Die Heizkostenverordnung [4] schließt Gebäude mit einem Heizwärmebedarf kleiner 15 kWh/(m^2 · a) (Passivhausstandard) von der verbrauchsabhängigen Abrechnung aus. Mit Hilfe einer zweiten Abszissenachse am oberen Rand der Abbildung 4.5, die nur den Wärmeverbrauch für die Raumheizung berücksichtigt, soll diese Annahme überprüft werden. Dabei wurde pauschal ein mittlerer Wärmeverbrauch von 26 kWh/(m^2 · a) für die Trinkwassererwärmung vom Gesamtwärmeverbrauch abgezogen. Dieser Wert ergibt

sich aus der Datensammlung der Messdienstunternehmen und ist nach Wohnfläche und Anzahl der Nutzeinheiten gewichtet. Es ergeben sich nunmehr Grenzwerte für die Wirtschaftlichkeit der verbrauchsabhängigen Abrechnung die zum Teil deutlich unterhalb des vom Verordnungsgeber festgelegten Grenzwertes von 15 kWh/($m^2 \cdot a$) liegen. Insgesamt zeigt sich, dass dieser Grenzwert sehr vorausschauend gewählt worden ist. Dies gilt auch, wenn der tatsächliche Heizwärmeverbrauch über dem Bedarf liegt[8]. Die Durchführung der verbrauchsabhängigen Abrechnung wäre unter den angenommenen Randbedingungen und der gegenwärtigen Preis- bzw. Kostensituation lediglich in Gebäuden mit sehr geringem Heizwärmebedarf nicht wirtschaftlich.

4.4 CO_2-Vermeidungskosten

4.4.1 Allgemeines

Im Kontext der Bemühungen zur Reduzierung der CO_2-Emissionen (hier insbesondere im Zusammenhang mit der Energieversorgung von Gebäuden) ist immer wieder auch die Frage nach der wirtschaftlichen Effizienz möglicher Maßnahmen zu beantworten. Eine für die Bewertung von Maßnahmen geeignete Größe sind die CO_2-Vermeidungskosten anhand derer die finanziellen Aufwendungen für die Vermeidung von CO_2-Emissionen bzw. Emission von CO_2-Äquivalenten[9] quantifiziert werden. Eine vergleichende Gegenüberstellung unterschiedlichster der Maßnahmen im Gebäudesektor zeigt Abbildung 4.6.

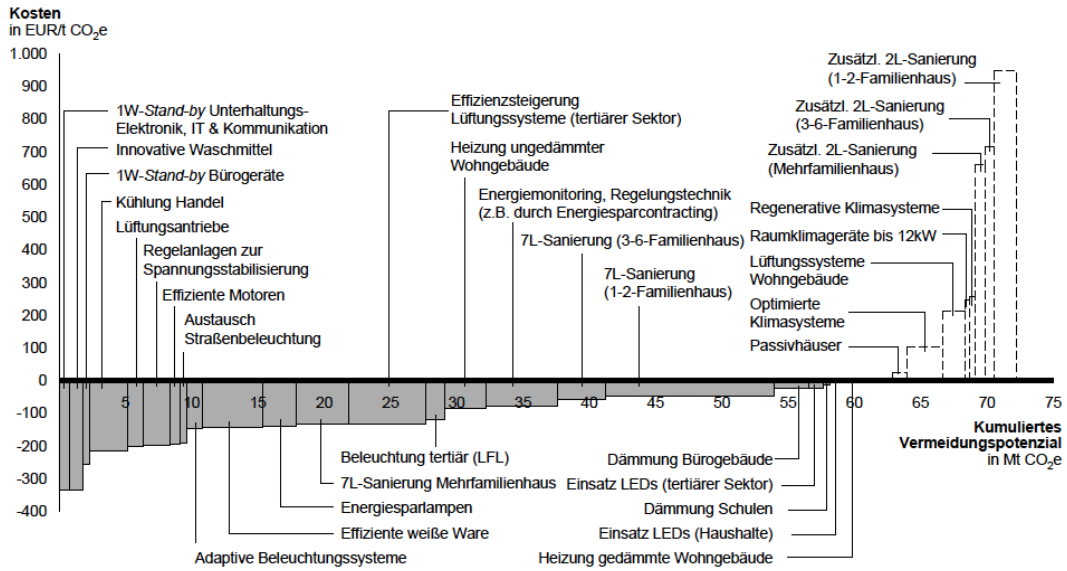


Abbildung 4.6: Vermeidungskostenkurve Deutschland 2020 im Gebäudesektor [11]

Die Bewertung der verbrauchsabhängigen Heizkostenverteilung anhand der Vermeidungskosten wird unter der vereinfachenden Annahme einer statischen Betrachtungs-

[8] In der Heizkostenverordnung wird der Bedarf geregelt, während die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Verbrauchswerten basiert.

[9] Kohlendioxid-Äquivalent bzw. CO_2e ist eine Kennzahl für die Intensität eines Treibhausgases im Vergleich zu Treibhauswirkung von CO_2

weise vorgenommen. Dabei berechnen sich die Vermeidungskosten allgemein wie folgt:

$$K_{V,CO_2} = \frac{K_{HKV} - K_{Ref}}{E_{Ref} - E_{HKV}} \tag{4.1}$$

K_{V,CO_2}	Vermeidungskosten[EUR/t_{CO_2e}]
K_{HKV}	Gesamtkosten (Investition und Betrieb) mit HKV
K_{Ref}	Gesamtkosten (Investition und Betrieb) im Referenzsystem ohne HKV
E_{HKV}	Emissionen mit HKV
E_{Ref}	Emissionen im Referenzsystem ohne HKV

Für die im Zähler angegebenen Gesamtkosten sind neben den Dienstleistungskosten für die Verbrauchserfassung und Abrechnung (Investitionen, Montage und Abrechnung) auch die aus dem veränderten Nutzerverhalten resultierenden Änderungen in den Verbrauchskosten zu berücksichtigen. Die Verbrauchskosten selbst ergeben sich aus dem Heizenergieverbrauch Q_{HKV} und den entsprechenden Energiepreisen p. Dabei sind die für die unterschiedlichen Energieträger (Gas, Öl, Fernwärme) gültigen Preise anzusetzen (vgl. Abschnitt 4.2.1). Damit ergeben sich Kosten ($K_{HKV} - K_{Ref}$), die den negativen und bereits in Abbildung 4.5 nach Baualtersklassen dargestellten Einsparungen entsprechen. Diese beinhalten die Kosten für den Aufwand der Heizkostenverteilung und den Nutzen der Energieeinsparung abhängig vom Wärmepreis.

Der Heizenergieverbrauch für das Referenzsystem ohne verbrauchsabhängige Heizkostenverteilung wird aus den bekannten Energiekennzahlen und unter Annahme einer bestimmten relativen Verbrauchseinsparung $\bar{\Delta}Q_H$ berechnet. Die zugehörigen Kosten ergeben sich dann gemäß Gleichung 4.3. Investitionskosten fallen im Referenzsystem ohne verbrauchsabhängige Abrechnung nicht an:

$$K_{HKV,Q} = Q_{HKV} p \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned} K_{Ref,Q} &= Q_{Ref} p \\ &= \frac{Q_{HKV}}{1 - \bar{\Delta}Q_H} p \end{aligned} \tag{4.3}$$

Die Emissionen können in ähnlicher Weise aus den Heizenergieverbräuchen und den energieträgerspezifischen Emissionen ermittelt werden.

$$E_{HKV} = Q_{HKV} e \tag{4.4}$$

$$
\begin{aligned}
E_{Ref,Q} &= Q_{Ref}\, e \\
&= \frac{Q_{HKV}}{1 - \bar{\Delta} Q_H}\, e
\end{aligned}
\tag{4.5}
$$

$K_{HKV,Q}$	Heizkosten mit HKV
$K_{HKV,Ref}$	Heizkosten im Referenzsystem ohne HKV
$\bar{\Delta} Q_H$	relative Einsparung Heizwärmeverbrauch durch verbrauchsabhängige Abrechnung
p	Wärmepreis in ct/kWh
e	Emissionsfaktor in g_{CO_2}/kWh

Die Heizkosten können mit den aus Abschnitt 4.2.3 bekannten Energieverbrauchskennzahlen berechnet werden. Die Energieverbrauchskennzahlen beziehen sich auf die Endenergie. Demzufolge sind für die Preise Endenergiepreise, d.h. Verbraucherpreise anzusetzen. Für die Emissionsfaktoren werden in den Berechnungen die in Abschnitt 4.2.4 angegebenen Werte verwendet.

Die Vermeidungskosten sind für den gesamten Gebäudebestand zu ermitteln. Es wird davon ausgegangen, dass in Deutschland ein flächendeckender Einsatz der verbrauchsabhängigen Abrechnung erfolgt. Die vorliegenden Energieverbrauchskennwerte entsprechen daher dem Verbrauch eines Systems mit geltender Heizkostenverordnung. Für die Dienstleistungskosten der Heizkostenverteilung kann ein auf die einzelne Nutzereinheit bezogener mittlerer Wert angesetzt werden, der für alle Nutzungseinheiten gleichermaßen angewendet wird. Dabei wird von einer mittelgroßen 3-Zimmer-Wohnung von 80 m^2 ausgegangen, die für den deutschen Gebäudebestand repräsentativ ist. Der Heizenergieverbrauch Q_{HKV} wurde auf Grundlage der in [15] veröffentlichten Zahlen unter Berücksichtigung einer Witterungsbereinigung ermittelt. Er beträgt 860 PJ und entspricht damit in etwa dem zu Beginn aus den zur Verfügung stehenden Daten extrapolierten Wärmeverbrauch für 2010.

Obwohl die Sensibilitätsanalyse in Abschnitt 3.8 zeigt, dass höhere Werte möglich sind, wird der Berechnung eine relative Einsparung des Heizwärmeverbrauchs durch die verbrauchsabhängige Abrechnung von 20 % zugrunde gelegt. Diese vorsichtige Annahme stellt sicher, dass die berechneten CO_2e-Vermeidungskosten den tatsächlichen Effekt der Heizkostenverordnung nicht überbewerten.

4.4.2 Berechnung der CO_2e-Vermeidungskosten und Emissionseinsparungen an Hand eines Beispieljahres

Im Folgenden soll die Ermittlung der CO_2e-Vermeidungskosten am Beispiel des Jahres 2010 näher erläutert werden. Die Berechnungsgleichung (4.1) ist aus Abschnitt 4.4.1 bekannt. Die Tabelle 4.6 zeigt eine Auflistung aller für 2010 geltenden Größen:

Tabelle 4.6: Eingangsgrößen der CO_2e-Vermeidungskostenberechnung

Eingangsgröße	**Wert für 2010**	**Einheit**
Marktpotenzial	20	Mio · NE
Q_{HKV}	860 bzw. $\mathbf{2{,}388 \cdot 10^{11}}$	PJ kWh
$\bar{\Delta}Q_H$	**0,2**	-
p	**6,61**	cent/kWh
e	**227,6**	g_{CO_2e}/kWh

Unter Einbezug der angegebenen Eingangsgrößen ergeben sich für das Jahr 2010 CO_2e-Vermeidungskosten von -195 EURO/t_{CO_2e} bei Annahme einer 20 %-igen Einsparung durch die verbrauchsabhängige Abrechnung. Die Vermeidungskosten stellen in diesem Zusammenhang also finanzielle Ersparnisse bzw. Gewinne in Folge der Umsetzung der Heizkostenverordnung dar.

Die vermiedenen Emissionen berechnen sich im Jahr 2010 nach der Gleichung:

$$\Delta E = (\frac{Q_{HKV}}{1 - \bar{\Delta}Q_H} - Q_{HKV}) \cdot e \tag{4.6}$$

zu $13,6$ Mt_{CO_2e}.

4.4.3 Voraussichtliche CO_2e-Vermeidungskosten und Emissionseinsparung bis 2030

Um die bisherigen und zukünftigen Emissionseinsparungen und CO_2e-Vermeidungskosten abzuschätzen, werden diese für jedes Jahr von 1996 bis 2030 nach oben beschriebener Vorgehensweise einzeln berechnet. Dies geschieht wieder unter Annahme einer 20 %igen Einsparung infolge verbrauchsabhängiger Abrechnung. Die folgenden Abbildungen 4.7 und 4.8 zeigen die Ergebnisse dieser Berechnungen.

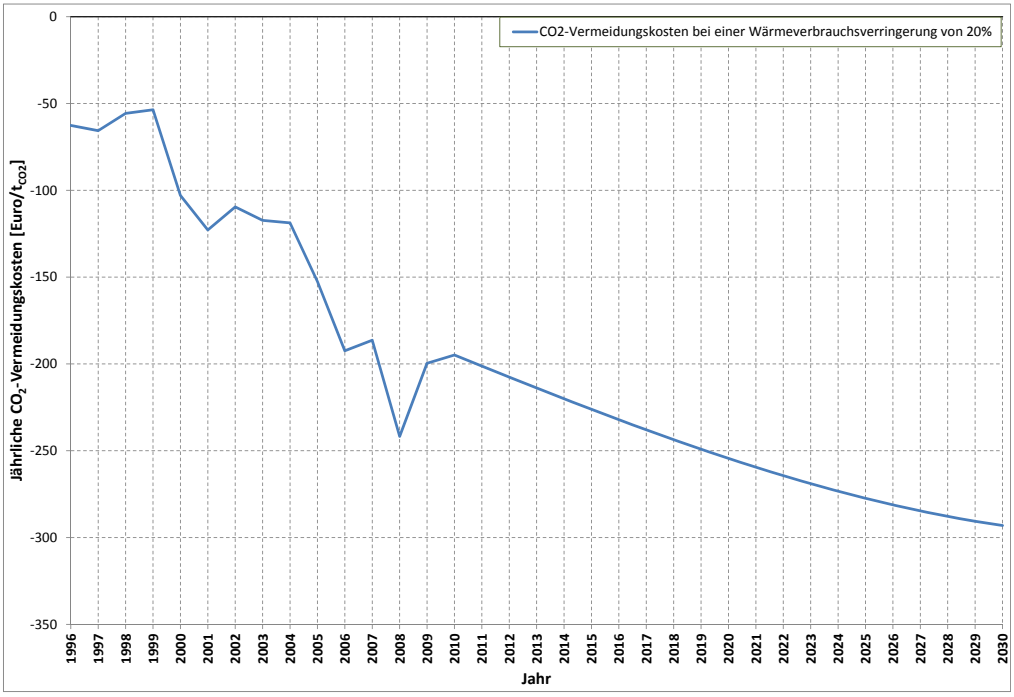


Abbildung 4.7: Entwicklung der jährlichen CO_2e-Vermeidungskosten von 1996 bis 2030

In Abbildung 4.7 sind die CO_2e-Vermeidungskosten in Abhängigkeit von ihren Entstehungsjahren aufgetragen. Die Kurve zeigt den Verlauf der Kostenentwicklungen bei Annahme einer Verringerung des Wärmeverbrauchs durch die verbrauchsabhängige Abrechnung um 20%. Wie zu erkennen, führte die Umsetzung der Heizkostenverordnung schon im Jahr 1996 zu einem Gewinn von ca. 63 $\text{EURO}/\text{t}_{\text{CO}_2\text{e}}$. Unter den hier angenommenen Randbedingungen können im Jahr 2020 rund 254 $\text{EURO}/\text{t}_{\text{CO}_2\text{e}}$ und 2030 bis zu 293 $\text{EURO}/\text{t}_{\text{CO}_2\text{e}}$ gespart werden.

Die jährlich möglichen Einsparungen an CO_2e-Emissionen sind in Abbildung 4.8 zu sehen. Wieder unter Annahme einer Verringerung des Wärmeverbrauchs infolge der verursachergerechten Heizkostenabrechnung um 20 %. Während die finanziellen Gewinne pro eingesparter Tonne CO_2e zunächst immer mehr ansteigen, werden die vermeidbaren Emissionen jedes Jahr geringer, da der Wärmeverbrauch tendenziell sinkt. Lagen diese 1996 noch bei $16,8$ $\text{Mt}_{\text{CO}_2\text{e}}$ wird die mögliche Emissionsvermeidung im Jahr 2020 mit $11,1$ $\text{Mt}_{\text{CO}_2\text{e}}$ deutlich geringer ausfallen. 2030 sind schließlich nur noch $9,6$ $\text{Mt}_{\text{CO}_2\text{e}}$ vermeidbar. Dies stellt trotzdem ein gewaltiges Einsparpotenzial dar, da die Gesamtemissionen im Gebäudesektor nach [11] von 345 $\text{Mt}_{\text{CO}_2\text{e}}$ (2004) auf 331 $\text{Mt}_{\text{CO}_2\text{e}}$ (2020) bzw. 312 $\text{Mt}_{\text{CO}_2\text{e}}$ (2030) ebenfalls sinken werden.

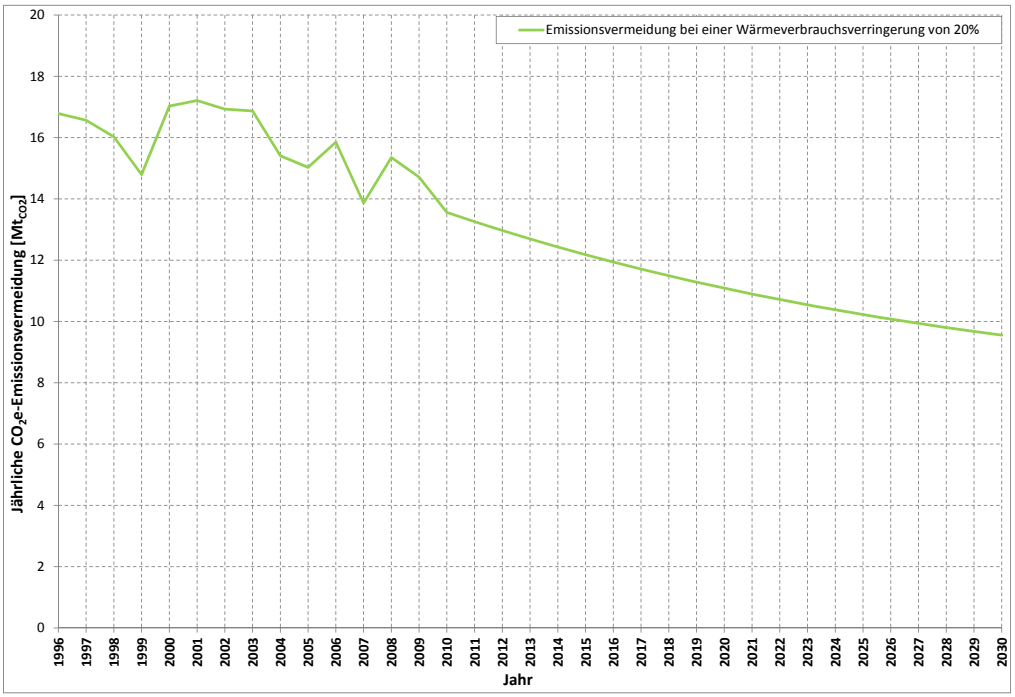


Abbildung 4.8: Entwickung der jährlich möglichen CO_2e-Emissionsvermeidung von 1996 bis 2030

Die bereits in Abbildung 4.6 auf Seite 55 dargestellte Vermeidungskostenkurve zeigt die Kosten und das kumulierte jährliche CO_2e-Vermeidungspotenzial der in [11] untersuchten Energiesparmaßnahmen. Dafür wurde für alle betrachteten Vermeidungshebel ein jährlicher Durchschnittswert für die im Zeitraum von 1996 bis 2020 vermiedenen CO_2e-Emissionen gebildet. Insgesamt können so nach [11] im Gebäudesektor durchschnittlich $72,5\ \mathrm{Mt_{CO_2e}/a}$ vermieden werden. Die Abbildung 4.9 ordnet die verbrauchsabhängige Abrechnung als weiteren CO_2e-Vermeidungshebel in die von [11] betrachteten Hebel ein. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden nur einige ausgewählte, dem Wohngebäudesektor zuzuordnende Vermeidungshebel eingetragen. Die ausgewählten Hebel erreichen ein Einsparpotential von rund $42\ \mathrm{Mt_{CO_2e}/a}$. Zum Vergleich wurde für den Zeitraum 1996 bis 2020 ein mittlerer jährlicher Wert für die Emissionsvermeidung infolge der verbrauchsabhängigen Abrechnung von $14,3\ \mathrm{Mt_{CO_2e}/a}$ eingetragen. Damit ist sie in ihrer Wirkung vergleichbar mit der Sanierung von 1- bis 2-Familienhäusern auf 7L-Standard[10]. Diese würde nach [11] bis 2020 durchschnittlich $12,7\ \mathrm{Mt_{CO_2e}/a}$ vermeiden, ist allerdings mit CO_2e-Vermeidungskosten von $-49\ \mathrm{EURO/(t_{CO_2e} \cdot a)}$ weniger wirtschaftlich als die Umsetzung der Heizkostenverordnung ($-171\ \mathrm{EURO/(t_{CO_2e} \cdot a)}$ im Mittel bis 2010).

Bei Erweiterung des betrachteten Zeitraumes um 10 Jahre bis 2030 könnten zusammen mit den in [11] untersuchten Vermeidungshebeln im Gebäudesektor pro Jahr

[10] Damit sind Bestandsbauten gemeint, die vor 1979 fertig gestellt wurden. Die Sanierungsrate wurde laut [11] mit 3 % der unsanierten 1- bis 2-Familienhäuser von vor 1979 angesetzt. Dies entspricht einer Sanierungsrate von etwa 1,7 % des gesamten deutschen Gebäudebestandes und ist damit recht ambitioniert gewählt. Die Sanierungsmaßnahme umfasst die Verbesserung von Dämmung und Heizung dieser Gebäude mit der Zielsetzung, ihren Energieverbrauch auf 70 kWh/a (bzw. 7 Liter/m^2 Heizöl im Jahr) zu begrenzen.

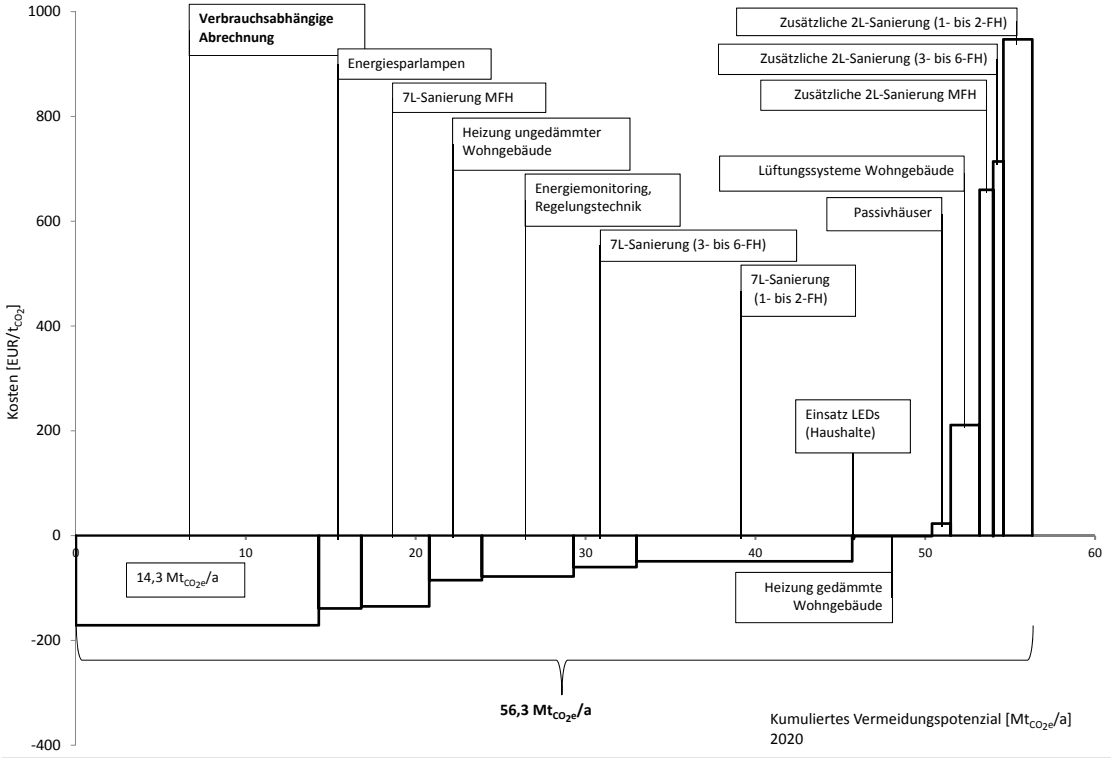


Abbildung 4.9: Vermeidungskostenkurve Deutschland 2020 im Wohngebäudesektor [11] mit verbrauchsabhängier Abrechnung

insgesamt 101,7 Mt_{CO_2e} vermieden werden. Die ausgewählten Vermeidungshebel im Wohngebäudebereich erreichen davon rund 60,5 Mt_{CO_2e}/a. Im Vergleich dazu trägt die verbrauchsabhängige Abrechnung im Durchschnitt zusätzlich 13,1 Mt_{CO_2e}/a bei. Eine entsprechende Übersicht zeigt Abbildung 4.10. Hier ist zu sehen, dass die Umsetzung der Heizkostenverordnung mit CO_2e-Vermeidungskosten von -201 EURO/($t_{CO_2e} \cdot a$) auch über einen längeren Zeitraum gesehen, sehr wirtschaftlich ist. Die vermeidbaren CO_2e-Emissionen werden, wie aus Abbildung 4.8 schon bekannt, allerdings geringer. Währenddessen steigt das CO_2e-Vermeidungspotential der 7L-Sanierung von 1- bis 2-Famlienhäusern auf 16,5 Mt_{CO_2e}/a. Im Vergleich mit anderen Vermeidungshebeln im Wohngebäudesektor ist das CO_2e-Vermeidungspotential der verbrauchsabhängigen Abrechnung weiterhin unerreicht.

Insgesamt konnten seit Einführung der Heizkostenverordnung 1981 unter Annahme einer Verbrauchsminderung von 20% durch die Anpassung des Nutzerverhaltens bis 2012 bereits 348 Mt_{CO_2e}vermieden werden. Im Vergleich mit den von [11] betrachteten Zeitspannen, wurden zwischen 1996 und 2010 236 Mt_{CO_2e} vermieden. Mit den in dieser Arbeit angenommenen Randbedingungen kann bis 2030 ein zusätzliches CO_2e-Vermeidungspotential von 223 Mt_{CO_2e} erwartet werden. Eine weitere Einschätzung gibt die Tabelle 4.7:

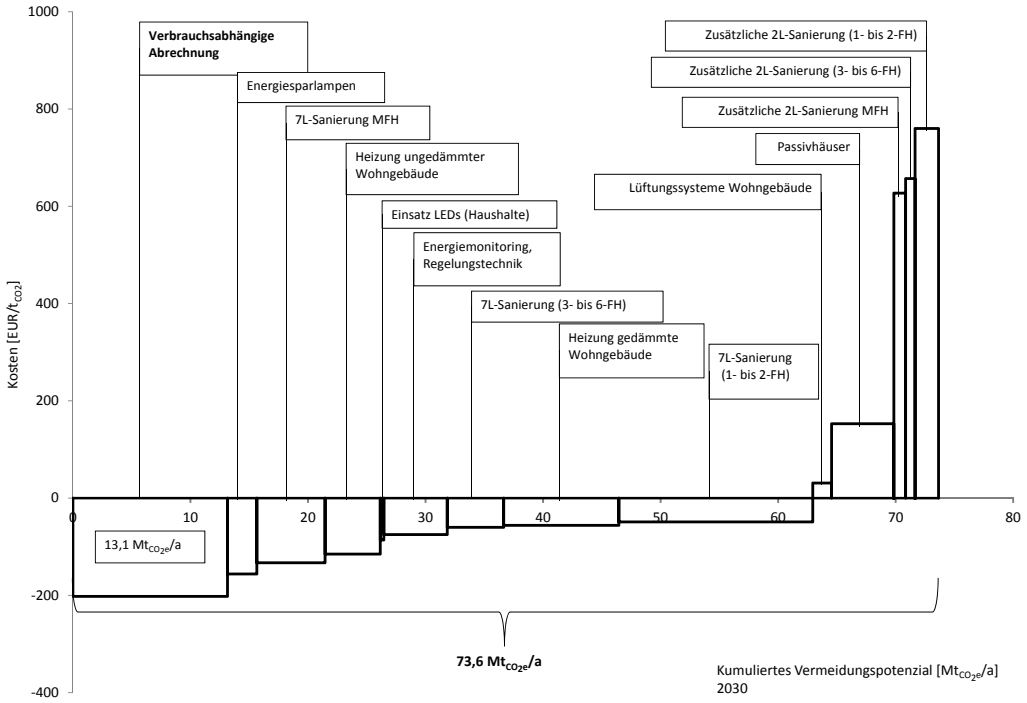


Abbildung 4.10: Vermeidungskostenkurve Deutschland 2030 im Wohngebäudesektor [11] mit verbrauchsabhängiger Abrechnung

Tabelle 4.7: CO_2e-Vermeidungspotenzial der verbrauchsabhängigen Abrechnung bei 20% Verbrauchsminderung

Betrachteter Zeitraum	**Bezugsjahr ab 1981 Einführung der HKVO** $[Mt_{CO_2e}]$	**Bezugsjahr ab 1996 Vergleich mit** [11] $[Mt_{CO_2e}]$
... bis 2010	-	236
... bis 2012	348	-
... bis 2020	443	357
... bis 2030	545	459

Die hier gezeigten Werte beruhen auf Unsicherheiten, da die zukünftige Entwickung von:

- Endenergieverbräuchen für die Wärmeversorgung von Wohneinheiten,
- Energiepreisen,
- Anteilen der Energieträger an der Wärmeversorgung, und damit auch (vorallem auf Grund des hohen Anteils fernwärmeversorgter Gebäude im Mietwohnbereich gegenüber Einfamilienhäusern)
- den Emissionsfaktoren

zum jetzigen Zeitpunkt nicht exakt vorausgesagt, sondern nur unter bestimmten Annahmen näherungsweise nachgebildet werden kann. Mit den hier unterstellten Randbedingungen ergibt sich, dass die verbrauchsabhängige Abrechnung vor allem im Vergleich mit den in [11] bewerteten Maßnahmen auch in Zukunft noch einen wichtigen und nicht zu unterschätzenden Beitrag zur CO_2e-Emissionsvermeidung in Deutschland leisten wird.

Für den Zeitraum seit Inkrafttreten der Heizkostenverordnung am 1.Juli 1981 bis zum Jahre 2012 wurden durch die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heizkosten Emissionen von schätzungsweise $348 Mt_{CO_2e}$ vermieden. Grundlage dieser Schätzung sind folgende Annahmen:

- Die Nachrüstung der Verbrauchserfassung erfolgte innerhalb der Übergangszeit bis 1984 schrittweise. Demzufolge kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein entsprechende Energieeinsparpotenzial von 20% über die gesamte Zeitperiode angesetzt werden kann. Es wurde für die Jahre von 1981-1985 ein mittlerer Einspareffekt von 12 % zugrunde gelegt.
- Die spezifischen Emissionen sind über den gesamten Zeitraum konstant, d.h. die in der Vergangenheit veränderliche Energieträgerstruktur (z.B. Öl anstelle von Erdgas) wurde nicht berücksichtigt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass keine verlässlichen Informationen über die historische Energieträgerstruktur der mit Verbrauchserfassung aus- oder nachgerüsteten Liegenschaften vorliegen. Die hieraus resultierenden Ungenauigkeiten liegen aber innerhalb des Genauigkeitsanspruchs der gesamten Schätzung.

Ungeachtet dieser Unsicherheiten und teilweisen Vereinfachungen in den Annahmen ist die Größenordnung des Einspareffektes beträchtlich und entspricht den in Tabelle 4.7 auf die Zukunft hin ausgerichteten Werten.

5 Zusammenfassung

Die verbrauchsabhängige Abrechnung von Heizkosten für Raumheizung und Trinkwassererwärmung ist eine sehr effektive Maßnahme zur Energieeinsparung und Emissionsvermeidung im Wohngebäudesektor. Erfahrungen zeigen, dass durch die verbrauchsabhängige Abrechnung signifikante Energieeinsparungen von 20% zu erreichen sind. Aus Sicht des Wärmekonsumenten in abrechnungsrelevanten Zwei- und Mehrfamilienhäusern sichert die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heizkosten zudem ein Mindestmaß an Abrechnungsgerechtigkeit, so dass verschwenderisches Verhalten nachweislich mit entsprechenden Mehrkosten belegt werden kann. Die Tendenz zu verschwenderischem Verhalten ist insbesondere aus energiesparenden Gebäuden bekannt.

In dem vorgezeichneten Kontext war es ein Anliegen der vorliegenden Studie, einen möglichen Zusammenhang zwischen dem für den Heizwärmeverbrauch maßgeblichen Nutzerverhalten und den bauphysikalischen Eigenschaften von Wohngebäuden herauszuarbeiten. Grundlage dafür bilden die von den in der Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung organisierten Messdienstunternehmen zahlreich zur Verfügung gestellten Messdaten aus der Verbrauchserfassung. Die in anonymisierter Form vorliegenden Messdaten wurden zu einer einheitlichen Datenbank zusammengefasst und repräsentieren die Heizwärmeverbrauchswerte von etwa 3,3 Mio. Nutzeinheiten. Aus den Messwerten konnten mit Hilfe geeigneter Simulationsrechnungen Korrelationen zwischen der energetischen Gebäudequalität und dem Nutzerverhalten abgeleitet werden. Charakteristische Kenngrößen für das Nutzerverhalten sind die mittlere Raumtemperatur, der Außenluftwechsel und der Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung. Während für die ersten beiden Größen die gesuchten Zusammenhänge erarbeitet werden konnten, muss festgestellt werden, dass sich anhand der Messdaten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Trinkwarmwasserbedarf und energetischer Gebäudequalität erkennen lassen. Vielmehr zeigt sich eindrucksvoll, dass der flächenbezogene Wärmebedarf zur Trinkwassererwärmung unabhängig vom Gebäudezustand nahezu konstant bleibt jedoch der relative Anteil am Gesamtwärmeverbrauch mit zunehmender Gebäudequalität zunimmt. Für Neubauten beträgt der Anteil schnell über 30%. Aus dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial konnte ein durchschnittlicher Energieverbrauch von 26 $\mathrm{kWh/(m^2 \cdot a)}$ für die Trinkwassererwärmung identifiziert werden. Dieser Verbrauchswert liegt deutlich über dem in DIN V 18599-10 angenommenen Energiebedarf von $12,5$ $\mathrm{kWh/(m^2 \cdot a)}$. Dies sollte bei der Bearbeitung der DIN V 18599 berücksichtigt werden.

Die Korrelationen zwischen der energetischen Gebäudequalität und dem Nutzerverhalten belegen, dass in Gebäuden hoher energetischer Qualität (Baualtersklasse 10 entsprechend EnEV 02 und neuer) die real zu beobachtenden Energieverbrauchswerte ein verschwenderisches Nutzerverhalten implizieren, d.h. höhere Raumtemperaturen und höhere Außenluftwechselraten. Die Bemühungen zum energiesparenden Bauen werden dadurch in gewisser Weise konterkariert und lassen sich nicht allein mit dem Argument eines höheren thermischen Komforts begründen. Vielmehr werden Maßnahmen zur Energieeinsparung auf der Bau- und Anlagenseite durch das veränderte Nutzerverhalten überkompensiert. Die Erfahrungen hinsichtlich der aus dem Nutzerverhalten begründbaren z.T. deutlichen Unterschiede zwischen dem unter normativen Standardbedingungen berechneten Energiebedarf und dem tatsächlichen Verbrauch belegen diesen Zusam-

menhang, ohne dies aufgrund der Vielfältigkeit der Gebäudeeigenschaften quantitativ verallgemeinern zu können.

In der Schlussfolgerung ergibt sich aus dem Wunsch zur Begrenzungen des Verschwendungspotenzials die Notwendigkeit zum Einsatz der verbrauchsabhängigen Abrechnung auch für den Fall, dass eine ausschließlich an der Rentabilität der Maßnahme (Investition im Vergleich zur Energieeinsparung) ausgerichtete Entscheidung den Einsatz der verbrauchsabhängigen Abrechnung unter den gegenwärtigen wirtschaftlichen Randbedingungen als nicht sinnvoll erscheinen lässt.

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme sind die sogenannten CO_2-Vermeidungskosten interessant. Es konnte anhand aktueller und historischer Energiedaten nachgewiesen werden, dass der verbrauchsabhängigen Abrechnung eine im Vergleich zu anderen Energieeinsparmaßnahmen im Wohngebäudesektor herausragende Bedeutung zukommt. Keine im Ansatz vergleichbare Maßnahme (z.B. zusätzliche Wärmedämmung) weist derart geringe Vermeidungskosten auf wie die verbrauchsabhängige Abrechnung. Für das Jahr 2010 wurden Vermeidungskosten von -195 EURO/t_{CO_2e} und damit finanzielle Gewinne errechnet. Auch das gesamte CO_2-Vermeidungspotenzial ist im direkten Vergleich mit den anderen Energieeinsparmaßnahmen an Gebäuden beeindruckend. Es wurde abgeschätzt, dass seit Einführung der Heizkostenverordnung im Jahr 1981 bis zum jetzigen Zeitpunkt 348 $MtCO_2e$ allein durch verbrauchsabhängige Abrechnung eingespart werden konnten.

Literatur

[1] http://www.dbu.de

[2] *Der Gebäudebestand in Deutschland*. http://energieundbau.de/altbausanierung/wissen/Der-Gebaeudebestand-in-Deutschland-20081217.html

[3] *Gemis 4.7*. Öko-Institut e.V.,

[4] *Verordnung über die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten (Verordnung über Heizkosten - HeizkostenV)*. Bundesgesetzblatt 2009 Teil I Nr. 66,

[5] *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung 1977)*. Bundesgesetzblatt, 1977

[6] *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung 1995)*. Bundesgesetzblatt, August 1994

[7] *Gesetz zur Durchführung einer Repräsentativstatistik über die Bevölkerung und den Arbeitsmarkt sowie die Wohnsituation der Haushalte (1. MZG)*. BGBl I, S. 34, Januar 1996

[8] *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung 2002)*. Bundesgesetzblatt Nr. 59, November 2001

[9] *Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche (Wohnflächenverordnung - WoFlV)*. Bundesgesetzblatt, November 2003

[10] *Gesetz zur Durchführung einer Repräsentativstatistik über die Bevölkerung und den Arbeitsmarkt sowie die Wohnsituation der Haushalte (2. MZG)*. BGBl. I, S. 1350, Juni 2004

[11] McKinsey Company Inc.: Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. 2007. – Forschungsbericht

[12] *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung 2009)*. Bundesgesetzblatt Nr. 23, April 2009

[13] *Bauen und Wohnen - Bestand an Wohnungen 31. Dezember 2009*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, August 2010

[14] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Wohnungsmärke im Wandel - Zentale Ergebnisse der Wohnungsmarktprognose 2025. 2010. – Forschungsbericht

[15] *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Energiedaten. Zahlen und Fakten. Nationale und internationale Entwicklung*. 2011

[16] *Pressemitteilung Nr. 232: 0,5% mehr Wohnungen im Jahr 2010 fertig gestellt*. Statistisches Bundesamt Deutschland, Juni 2011

[17] *Gradtagzahlen-Deutschland.xls*. Institut Wohnen und Umwelt, Januar 2012

[18] Bundesamt, Statistisches: *Statistisches Jahrbuch 2011*

[19] Diefenbach ; Cischinsky ; Rodenfels ; Clausnitzer: Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand / Bremer Energie Institut und IWU Darmstadt. 2010. – Forschungsbericht

[20] Energieberatung, Haustechnik und ökologische Konzepte G.: *Gebäudetypologie der Stadt Dortmund - Hausdatenblätter*. Stadt Dortmund Umweltamt, 2005

[21] Fritsche, Uwe R. ; Rausch, Lothar: Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme / Öko-Institut e.V. 2007. – Forschungsbericht

[22] Greller, Martin ; Schröder, Franz ; Bögelein, Tobias ; Güttler, Peter ; Hundt, Volker: Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 3: Spezifischer Energieverbrauch für zentrale Warmwasserbereitung und Relation zum Heizenergieverbrauch. In: *Bauphysik* 32 (2010), Nr. 3, S. 154–159

[23] Greller, Martin ; Schröder, Franz ; Hundt, Volker ; Mundry, Bernhardt ; Papert, Olaf: Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 2: Verbrauchskennzahlentwicklung nach Baualtersklassen. In: *Bauphysik* 32 (2010), Nr. 1, S. 1–6

[24] Ingenieure, Verein D.: *VDI 2077 Verbrauchskostenabrechnung für die Technische Gebäudeausrüstung*

[25] Kähler, A. ; Klein, J. ; Ohl, J. ; F., Pawellek: *Energiekennwerte 2011. Hilfen für den Wohnungswirt*. Techem Energy Services GmbH, 2011

[26] Klein, S.A. ; Beckman, W.A. ; Mitchell, J.W. ; Duffie, J.A. ; Duffie, N.A. ; Freeman, T.L. ; Mitchell, J.C. ; Braun, J.E. ; Evans, B.L. ; Kummer, J.P. ; Urban, R.E. ; Fiksel, A. ; Thornton, J.W. ; Blair, N.J.: *TRNSYS - A Transient System Simulation Program, Version 14.2*. ASHRAE Trans 82, S. 623, 1976

[27] Loga, T. ; Großklos, M. ; Knissel, J.: *Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten - Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung*. INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH, Juli 2003

[28] Normung e.V., DIN Deutsches I.: *DIN V 4108: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juni 2003

[29] Normung e.V., DIN Deutsches I.: *DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 2007

[30] Normung e.V., DIN Deutsches I.: *DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 2007

[31] Normung e.V., DIN Deutsches I.: *DIN V 4108: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juni 2007

[32] Normung e.V, DIN Deutsches I.: *DIN EN ISO 10456: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2010

[33] Perschk, A.: *Gebäude-Anlagen-Simulation unter Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden*. Dissertation, TU Dresden Fakultät für Maschinenwesen, 2000

[34] Richter, Wolfgang ; Ender, Thomas ; Hartmann, Thomas ; Kremonke, andre ; Oschatz, Bert ; Seifert, Joachim: *Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Niedrigenergie- und Passivhäusern*. Fraunhofer IRB Verlag, 2003

[35] Schröder, F. ; Ohlwärter, Chr. ; Hundt, V. ; Mundry, B.: Reale Raumtemperaturen in Mehrfamilienhäusern und Implikationen für die Einschätzung des Heizenergiebedarfs. In: *Sonderdruck EnEV aktuell* 1 (2010)

[36] Schröder, F. ; Reiß, J. ; Erhorn, H. ; Ohlwärter, C.: Reale Raumtemperaturen in Mehrfamilienhäusern - Korrelationen mit Gebäudeenergiekennzahlen. In: *EnEV aktuell* (2/2010), Juni

[37] Schröder, Franz ; Altendorf, Lars ; Greller, Martin ; Boegelein, Tobias: Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 4: Spezifischer Heizenergieverbrauch kleiner Wohnhäuser und Verbrauchshochrechnung für den Gesamtwohnungsbestand. In: *Bauphysik* 33 (2011), Nr. 243-253

[38] Schröder, Franz ; Greller, Martin ; Hundt, Volker ; Mundry, Bernhardt ; Papert, Olaf: Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 1: Differenzierte Kennzahlverteilungen nach Energieträger und wärmetechnischem Sanierungsstand. In: *Bauphysik* 31 (2009), Nr. 6, S. 393–402

[39] Wien, Joachim: *Verbrauchsergebnisse für Niedrigenergiehäuser - Abweichungen zu berechneten Höhen und Verbrauchsspreizungen*. Heizungsjournal, Dezember 2000

A Studien zur Heizkostenabrechnung

Autor	Titel	Einsparungen
Behrens, H.; Berlin	Der Bau und Betrieb von Zentralheizungen; Nr. 17/1929, Reichsforschungsgesellschaft für Wirtschaftlichkeit im Bau- und Wohnungswesen	ca. 20%
Schiller, S.; Berlin	Untersuchungsergebnisse mit Wärmemessern (Heizkostenverteilern) bei Zentralheizung; HR 12/1956	im Mittel 23%
Adamson, B., Reijner, E.; Stockholm	Wärmeverteilungszählung in Wohnhäusern; Gesundheits-Ingenieur Nr. 1/1958	10-25%
Goepfert, J.; Hamburg und Forster, R.; Zürich	Herstellung- u. Betriebskosten sowie Art der Betriebskostenabrechnung von Zentralheizungen, Sanitäre Technik, Nr. 2/1962	20-40%
Jacobi, E.; Düsseldorf	Vertretbare und erreichbare Heizungsbetriebskosten im Wohnungsbau; Bundes Bau Bl., Heft 2/1962	15-25%
Raiß, W.; Berlin	Einsparung an Heizenergie durch wärmedichtes Bauen und Wärmeverbrauchsmessung; HLH, Nr. 12/1964	15%
Navrátil, L..; CSSR	Versuche und Erfahrungen mit Wärmemessern in der CSSR; Energetika Nr. 5/1969	23-37%
Neue Heimat	Heizungs- u. Warmwasserkosten und ihre Abrechnung; Z 50-ka-115, April 1975	15-20%
Kraus, E.; Wien	Erfahrungen mit der Wärmemessung u. -abrechnung auf Basis von Heizkostenverteilern im Bereich der Wohnungsanlagen der Stadt Wien; Referat, Sept. 1975 in Berlin	ca. 20%
Ackermann, F.; Reckel, G.; Wolfsburg	Erfahrungen mit einer Verbrauchsvariante der Fernwärmeabrechnung, FWI, Nr. 3/1976	20%
Kunde, W.; Hamburg	Energieeinsparung durch rationelle Wärmeerzeugung und objektbezogene Wärmeabrechnung, BGW-Schriftenreihe, Heft 7/1976	15-18%
Kolar, J.; EWAG	Fernwärme und Endenergie in Nürnberg, Heizkostenverteiler - optimales Mittel zum Energiesparen; FWI, Heft 2/1978	15-20%
FAVORIT; Hamburg	Energeieinsparungen in Demonstrativbaumaßnahmen (Hagen) über 7 Jahre	20-30%
Wohnbau Mainz GmbH	Energieeinsparungen in gesellschaftseigenen Wohnanlagen über 4 Jahre	15-30%
Heizbetriebe Wien GmbH	Energieeinsparungen in fernversorgten Wohnanlagen (März 1984)	25-40%
GEWOS, Hamburg	Durchführung der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung und ihre Auswirkung auf den Energieverbrauch, Endbericht, August 1986	im Mittel 13%
Kuppler, F.	Erste Heizkostenabrechnung nach Verbrauch in Chemnitz, in: Heizungsjournal, 3.NT-Sonderausgabe 1991	im Mittel 20%
Ademe	Maîtrise de la demande d'énergie par les services d'individualisation du chauffage, 2006	10-20%

Tabelle A.1: Bekannte Studien mit Angabe der Einsparungen durch Heizkostenverteilung

B Randbedingungen für Gebäudemodelle

B.1 Wandaufbauten

B.1.1 Baualtersklasse 6

Bauteil	Baustoff	d $[m^2]$	λ $[W/(mK)]$	U_{BT} $[W/(m^2K)]$
Außenwand	Innenputz	0,015	0,870	
	Hohlblockmauerwerk	0,240	0,350	
	Außenputz	0,020	1,400	
				1,13
Fenster				5,20
Dach	Innenputz	0,015	0,870	
	Mineralisierte Holzwolle	0,025	0,065	
	Luft	0,020	0,023	
	Dachziegel	0,010	0,890	
				1,68
Kellerdecke	Estrich	0,050	1,400	
	Steinwolle	0,035	0,045	
	Ortbeton	0,220	2,100	
				0,92
Oberste Geschossdecke	Estrich	0,050	1,400	
	Mineralfaserdämmung	0,030	0,060	
	Ortbeton	0,220	2,100	
				1,23

Tabelle B.1: Wandaufbau der BAK 6

B.1.2 Baualtersklasse 8

Bauteil	Baustoff	d $[m^2]$	λ $[W/(mK)]$	U_{BT} $[W/(m^2K)]$
Außenwand	Innenputz	0,015	0,870	
	Hochlochziegel	0,300	0,520	
	Außenputz	0,020	1,400	
				1,29
Fenster				2,8
Dach	Gipskarton	0,100	0,250	
	Mineralfaserdämmung	0,060	0,060	
	Luft	0,010	0,023	
	Dachziegel	0,010	0,890	
				0,50
Kellerdecke	Estrich	0,050	1,400	
	Polystyrol	0,035	0,041	
	Ortbeton	0,240	1,600	
0,83				
Oberste	Estrich	0,050	1,400	
Geschossdecke	Polystyrol	0,040	0,041	
	Ortbeton	0,240	1,600	
				0,75

Tabelle B.2: Wandaufbau der BAK 8

B.1.3 Baualtersklasse 9

Bauteil	Baustoff	d $[m^2]$	λ $[W/(mK)]$	U_{BT} $[W/(m^2K)]$
Außenwand	Innenputz	0,015	0,870	
	Hochlochziegel	0,300	0,320	
	Mineralfaserdämmung	0,040	0,040	
	Außenputz	0,020	1,400	
				0,50
Fenster				1,80
Dach	Ortbeton	0,240	0,870	
	Polystyrol	0,100	0,036	
	Estrich	0,040	1,400	
	Luft	0,025	0,023	
	Dachziegel	0,010	0,890	
				0,22
Kellerdecke	Estrich	0,040	1,400	
	Polystyrol	0,080	0,036	
	Ortbeton	0,240	0,550	
				0,35
Oberste Geschossdecke	Estrich	0,040	1,400	
	Polystyrol	0,040	0,036	
	Ortbeton	0,240	0,550	
				0,57

Tabelle B.3: Wandaufbau der BAK 9

B.1.4 Baualtersklasse 10, EnEV02

Bauteil	Baustoff	d $[m^2]$	λ $[W/(mK)]$	U_{BT} $[W/(m^2K)]$
Außenwand	Innenputz	0,015	0,870	
	Hochlochziegel	0,300	0,420	
	Mineralfaserdämmung	0,070	0,040	
	Außenputz	0,020	1,400	
				0,35
Fenster				1,40
Dach	Gipskartonplatte	0,100	0,210	
	Polystyrol	0,060	0,036	
	Mineralfaserdämmung	0,040	0,040	
	Luft	0,020	0,023	
	Dachziegel	0,010	0,890	
				0,30
Kellerdecke	Estrich	0,040	1,400	
	Polystyrol	0,080	0,036	
	Ortbeton	0,160	0,390	
				0,35
Oberste Geschossdecke	Estrich	0,040	1,400	
	Polystyrol	0,080	0,036	
	Ortbeton	0,160	0,390	
				0,35

Tabelle B.4: Wandaufbau der BAK 10 EnEV02

B.1.5 Baualtersklasse 10, EnEV09

Bauteil	Baustoff	d $[m^2]$	λ $[W/(mK)]$	U_{BT} $[W/(m^2K)]$
Außenwand	Innenputz	0,015	0,870	
	Porenbeton	0,365	0,210	
	Mineralfaserdämmung	0,060	0,040	
	Außenputz	0,020	0,100	
				0,28
Fenster				1,30
Dach	Gipskartonplatte	0,180	0,210	
	Polystyrol	0,120	0,030	
	Luft	0,020	0,023	
	Dachziegel	0,010	0,890	
				0,20
Kellerdecke	Anhydrit	0,050	1,200	
	Polystyrol	0,060	0,030	
	Ortbeton	0,200	0,300	
				0,35
Oberste Geschossdecke	Anhydrit	0,050	1,200	
	Polystyrol	0,120	0,030	
	Ortbeton	0,220	0,300	
				0,20

Tabelle B.5: Wandaufbau der BAK 10 EnEV09

Symbolverzeichnis

Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
A_N	Gebäudenutzfläche nach EnEV	m^2
A	Wärmeübertragende Umfassungsfläche	m^2
A_{wohn}	Wohnfläche nach WoFlV	m^2
A_{nutz}	Nutzfläche nach EnEV	m^2
A/V	Kompaktheitsgrad eines Gebäudes	-
CO_2	Kohlendioxid	
CO_2e	Kohlendioxid-Äquivalent	
d	Schichtdicke	m^2
e	Emissionsfaktor	g/kWh
H'_T	Spezifischer, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust	$W/(m^2K)$
K	Kosten	EUR bzw. EUR/a
$K_{HKV,DL}$	Gewichteter Gerätepreis für Miete und Dienstleistung (ink. Montage und Abrechung) des Heizkostenverteilers	EUR/a
U	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2K)$
$\widehat{v}_j$	Normierter Verbrauchsfaktor	-
v_j	flächenbezogener Verbrauch	kWh/m^2
$\overline{v}$	Mittelwert der flächenbezogenenverbrauchswerte einer Abrechnungseinheit	kWh/m^2
V_e	beheiztes Gebäudevolumen nach EnEV	m^3

Griechische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
β	Luftwechsel	1/h
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)

Indizes

Symbol	Bedeutung
therm	thermisch
BT	Bauteil
m	mittel

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
ARGE	Arbeitsgemeinschaft
BAK	Baualtersklasse
BJ	Baujahr
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
EFH	Einfamilienhaus
EHKV	Elektronischer Heizkostenverteiler
EnEV	Energieeinsparverordnung
FW	Fernwärme
GFH	Großes Mehrfamilienhaus
HKV	Heizkostenverteiler
HZG	Heizung
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
K	Kessel
LG	Liegenschaft
LW	Luftwechsel
MFH	Mehrfamilienhaus
NE	Nutzeinheit

RH	Reihenhaus
TRNSYS	Transient System Simulation Programm
TUD	Technische Universität Dresden
TWE	Trinkwassererwärmung
TWW	Trinkwarmwasser
VA	Verbrauchsabhängige Abrechnung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHKV	Heizkostenverteiler nach dem Verdunstungsprinzip
WG	Wohnung
WoFlV	Wohnflächenverordnung
WSchVO	Wärmeschutzverordnung
WW	Warmwasserbereitung
ZFH	Zweifamilienhaus