



# Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands

Beuth Hochschule für Technik  
Berlin

ifeu - Institut für Energie- und  
Umweltforschung Heidelberg GmbH

Prof. Dr.-Ing. Patrick Jochum  
Julia Lempik, B.A.  
Melanie Kulka, B.A.  
Thomas Blachut, B.A.  
Jürgen Wolff, B.A.  
Tim Wallstab, B.A.

Dipl.-Ing. (FH) Peter Mellwig  
Dr. Amany von Oehsen  
Dr. Martin Pehnt  
Johannes Fehr, M.Sc.  
Anne Fortuniak, B.A.

Endbericht

Juli 2015

Gefördert durch:





## Inhalt

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Kurzfassung .....                                                    | 5         |
| Summary .....                                                        | 9         |
| <b>1 Hintergrund.....</b>                                            | <b>13</b> |
| <b>2 Methodik.....</b>                                               | <b>16</b> |
| 2.1 Betrachtungshorizont der Analyse .....                           | 16        |
| 2.2 Gebäudemodell GEMOD .....                                        | 17        |
| 2.3 Validierung des Modells .....                                    | 22        |
| <b>3 Ableitung der Eingangsgrößen .....</b>                          | <b>23</b> |
| 3.1 Gebäudebestand .....                                             | 23        |
| 3.1.1 Wohngebäude.....                                               | 24        |
| 3.1.2 Nichtwohngebäude .....                                         | 38        |
| 3.1.3 Entwicklung bis 2050.....                                      | 47        |
| 3.2 Warmwasser .....                                                 | 48        |
| 3.3 Lüftungswärmeverluste .....                                      | 51        |
| 3.3.1 Luftwechselrate .....                                          | 52        |
| 3.3.2 Infiltration .....                                             | 53        |
| 3.3.3 Wärmerückgewinnung .....                                       | 53        |
| 3.4 Verbrauchs/Bedarfsabgleich .....                                 | 54        |
| 3.4.1 Beschreibung der Problematik.....                              | 54        |
| 3.4.2 Stand des Wissens .....                                        | 56        |
| 3.4.3 Empirische Ergebnisse .....                                    | 57        |
| 3.5 Einfluss der Sozioökonomie auf den Energieverbrauch.....         | 63        |
| <b>4 Bestimmung der minimalen Wärmedurchgangskoeffizienten .....</b> | <b>68</b> |
| 4.1 Wärmedämmmaterialien .....                                       | 69        |
| 4.1.1 Marktübliche Dämmstoffe.....                                   | 69        |
| 4.1.2 Entwicklungstendenzen.....                                     | 70        |
| 4.2 Extrapolation der Trends historischer U-Werte .....              | 72        |
| 4.3 Bestimmung des gesamtenergetischen Minimums.....                 | 75        |
| 4.4 Kostenoptimale Wärmedurchgangskoeffizienten .....                | 78        |
| 4.4.1 Spezifische Kosten von Dämmstoffen .....                       | 78        |
| 4.4.2 Exkurs: Marktpotenzial von Dämmstoffen in Deutschland .....    | 83        |

|          |                                                                 |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.3    | Bestimmung des wirtschaftlichen Minimums auf Bauteilebene ..... | 86         |
| 4.4.4    | Bestimmung des wirtschaftlichen Minimums auf Gebäudeebene ..... | 96         |
| 4.5      | Ergebnisse für den minimalen Wärmedurchgangskoeffizienten ..... | 99         |
| <b>5</b> | <b>Szenarien zum Nutzenergieverbrauch.....</b>                  | <b>100</b> |
| 5.1      | Trendszenario .....                                             | 100        |
| 5.1.1    | U-Wert-Szenarien.....                                           | 100        |
| 5.1.2    | Sanierungstiefe .....                                           | 101        |
| 5.1.3    | Anteil Wärmerückgewinnung .....                                 | 102        |
| 5.1.4    | Neubau und Abriss .....                                         | 102        |
| 5.1.5    | Ergebnisse des Trendszenarios .....                             | 104        |
| 5.1.6    | Vergleich mit anderen Studien .....                             | 106        |
| 5.2      | Engagierter Klimaschutz.....                                    | 107        |
| 5.2.1    | U-Wert-Szenarien.....                                           | 107        |
| 5.2.2    | Sanierungstiefe .....                                           | 108        |
| 5.2.3    | Sanierungsrate .....                                            | 108        |
| 5.2.4    | Anteil Wärmerückgewinnung .....                                 | 109        |
| 5.2.5    | Neubau und Abriss .....                                         | 109        |
| 5.2.6    | Ergebnisse des Szenarios „engagierter Klimaschutz“ .....        | 110        |
| 5.2.7    | Vergleich mit anderen Studien .....                             | 112        |
| 5.2.8    | Sensitivitätsanalysen .....                                     | 113        |
| 5.3      | Sockelanalyse.....                                              | 120        |
| 5.3.1    | Methodisches Vorgehen.....                                      | 121        |
| 5.3.2    | Sockel Trinkwarmwasser .....                                    | 122        |
| 5.3.3    | Sockel Transmission in der Fläche und an Wärmebrücken .....     | 123        |
| 5.3.4    | Sockel Lüftungswärmeverluste .....                              | 125        |
| 5.3.5    | Entwicklung der solaren und inneren Gewinne.....                | 126        |
| 5.3.6    | Resultierende Entwicklung des Gesamtheizwärmebedarfs .....      | 128        |
| 5.4      | Zusammenstellung der Ergebnisse .....                           | 130        |
|          | <b>Literaturverzeichnis.....</b>                                | <b>134</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>                               | <b>139</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis.....</b>                                 | <b>145</b> |
|          | <b>Anhang .....</b>                                             | <b>148</b> |

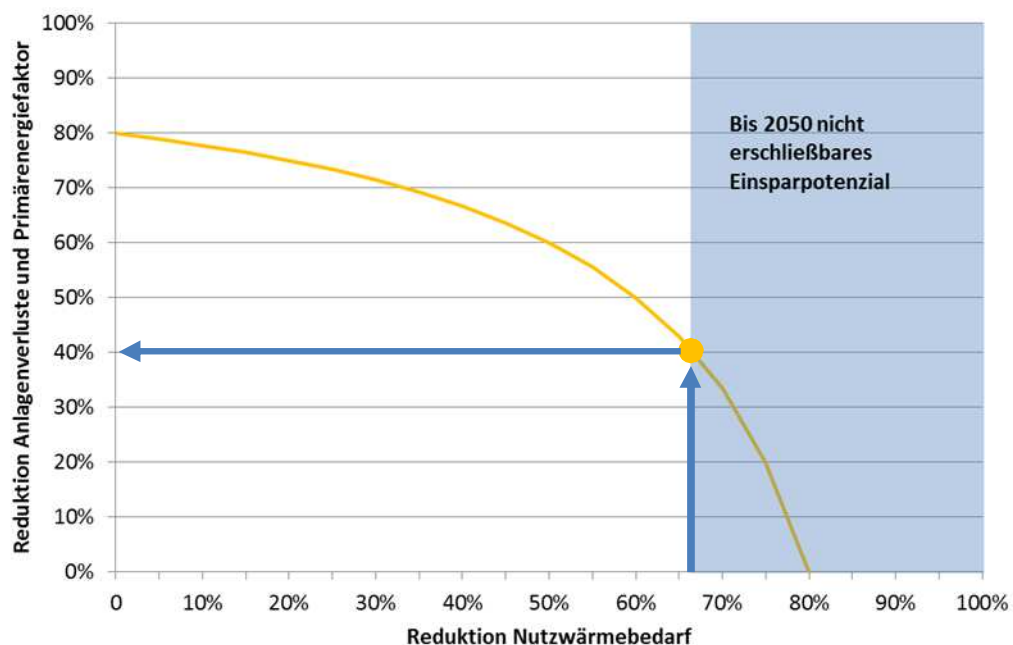


## Kurzfassung

Ziel dieser Studie ist es, die Einsparpotenziale für den Nutzwärmeverbrauch in Gebäuden zu quantifizieren. Deren Kenntnis ist substanziell, um die möglichen Pfade für die Erreichung der Klimaschutzziele zu konkretisieren. Die Potenzialgrenzen besagen, dass der Nutzwärmeverbrauch nur bis zu einem bestimmten Maß gesenkt werden kann. Dies kann durch Dämm-Maßnahmen ebenso geschehen wie durch Abdichtung der Gebäude oder Wärmerückgewinnungsanlagen. Wieviel Wärme dabei eingespart werden kann, hängt von den vorhandenen und neu zu errichtenden Gebäuden ab. Einige Gebäude können aufgrund von Restriktionen nicht beliebig gedämmt, abgedichtet oder mit Wärmerückgewinnungsanlagen ausgestattet werden. Aber auch die effizientesten Gebäude haben weiterhin Wärmeverluste, wenn auch in geringem Maß. Die Summe dieser Wärmeverluste – zuzüglich des Wärmebedarfs für die Warmwassererzeugung - bildet einen Sockel, der durch technische Maßnahmen nicht weiter zu reduzieren ist. Dieser Sockel repräsentiert das theoretische Potenzial von Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich. Er ist nur sehr schwach von der Zeit abhängig, da hier der Transformationspfad der Effizienzmaßnahmen nicht berücksichtigt wird, wohl aber die Veränderung des Gebäudebestands durch Neubau und Abriss.

Der Transformationspfad bringt zusätzliche Restriktionen im zeitlichen Verlauf in den Bilanzraum ein. Die maximale Transformationsgeschwindigkeit, ausgedrückt durch Sanierungsrate und -tiefe, bestimmt, ob das theoretische Potenzial innerhalb des Betrachtungszeitraums überhaupt erreicht werden kann. Der Transformationspfad bei maximaler Geschwindigkeit stellt also das realisierbare Potenzial dar.

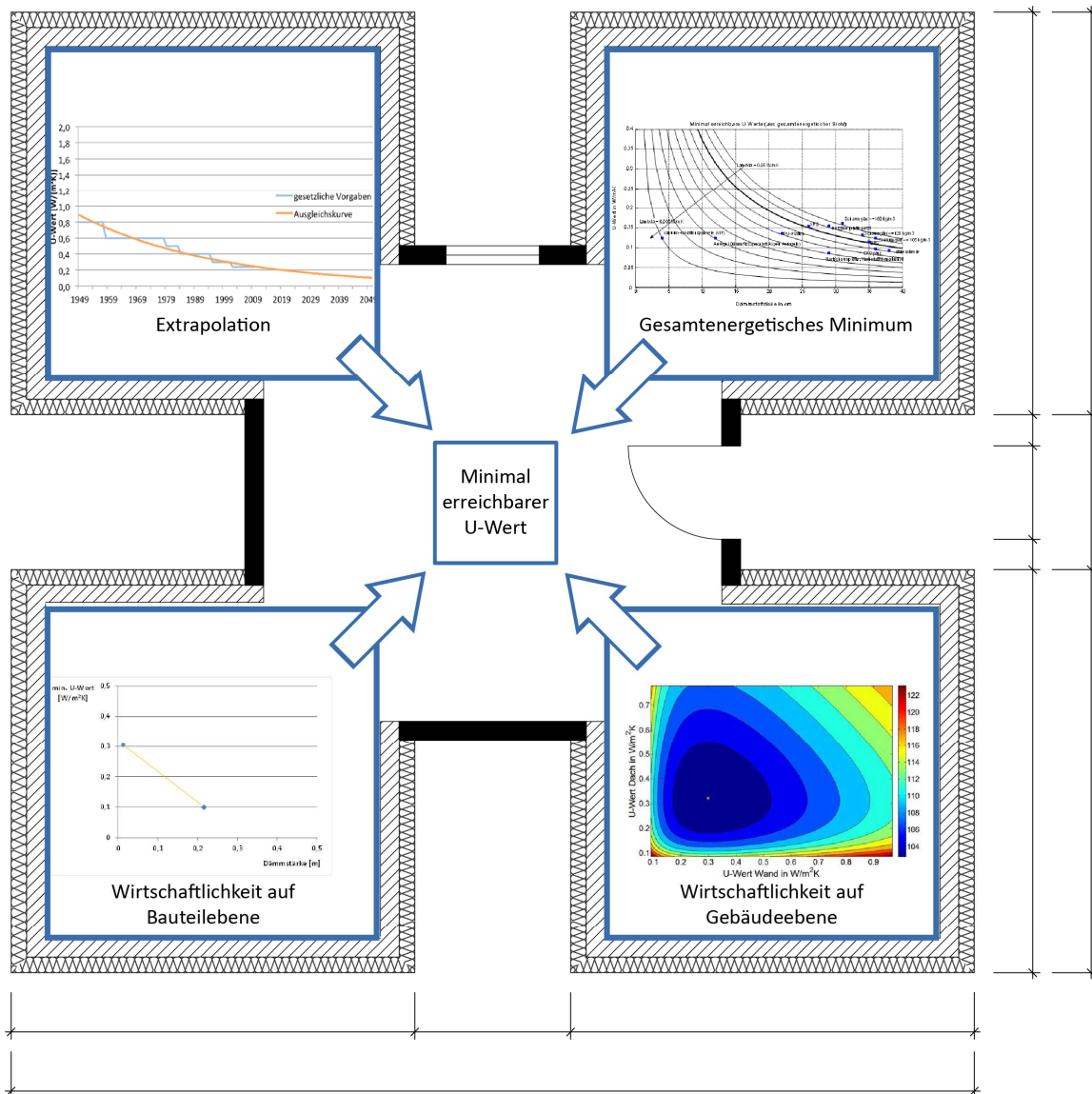
Die Potenzialgrenzen engen den Handlungsspielraum bei der Reduktion des Primärenergieverbrauchs ein. Dies muss durch zusätzliche Anstrengungen bei der Senkung der Anlagenverluste und Primärenergiefaktoren abgefangen werden.



**Abbildung 0.1:** Zielkurve für eine Primärenergieeinsparung von 80 % und bis 2050 realisierbares Einsparpotenzial des Nutzwärmeverbrauchs

In diesem Projekt wurde das Gebäudemodell GEMOD weiterentwickelt. Es bildet den Nutzenergieverbrauch im Wohn- und Nichtwohngebäudebestand in Deutschland in 234 Typgebäuden ab und simuliert die künftige Entwicklung bis 2050 durch Sanierungen, Neubau und Abriss.

Die Dämmpotenziale werden stark durch die zukünftig minimal erreichbaren U-Werte bestimmt. Daher leiten vier verschiedene Analysen Grenzen und bestimmende Faktoren für künftige U-Werte ab.



**Abbildung 0.2: Vier Analysepfade zur Bestimmung der minimal erreichbaren U-Werte**

Mit dem Gebäudemodell GEMOD wurden zwei Szenarien berechnet, die die Extrempfade des künftigen Nutzwärmeverbrauchs darstellen. Der tatsächliche künftige Pfad wird voraussichtlich zwischen den gezeigten Szenarien „Trend“ und „engagierter Klimaschutz“ liegen. Abbildung 0.3 zeigt außerdem den Nutzwärmesockel. Er ändert sich in der Zeit durch den Zuwachs an Wohnfläche, durch den Klimawandel, sich wandelnde innere Gewinne und durch Änderungen am Gebäudebestand durch Abriss und Neubau. Die Änderungen sind jedoch vergleichsweise gering.

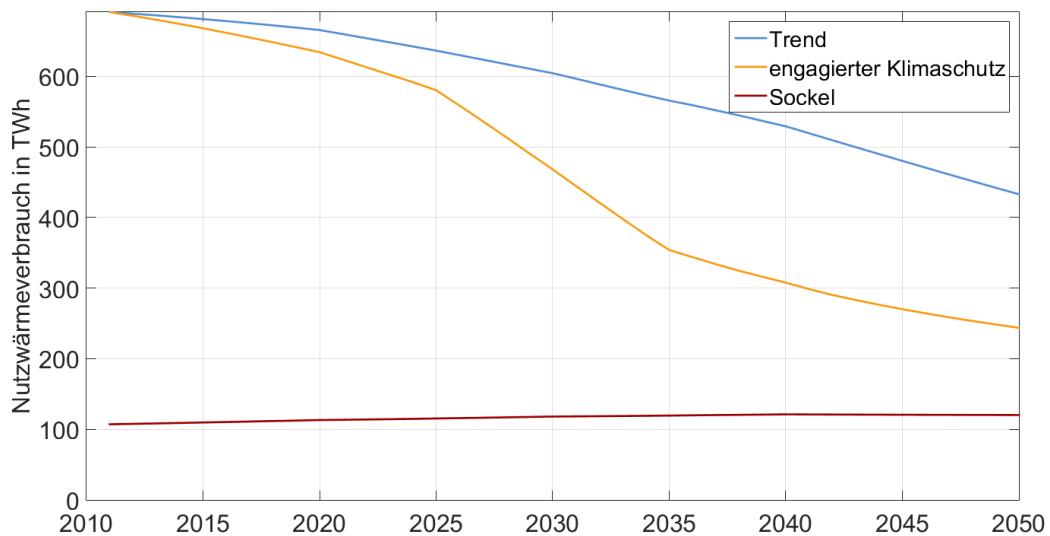
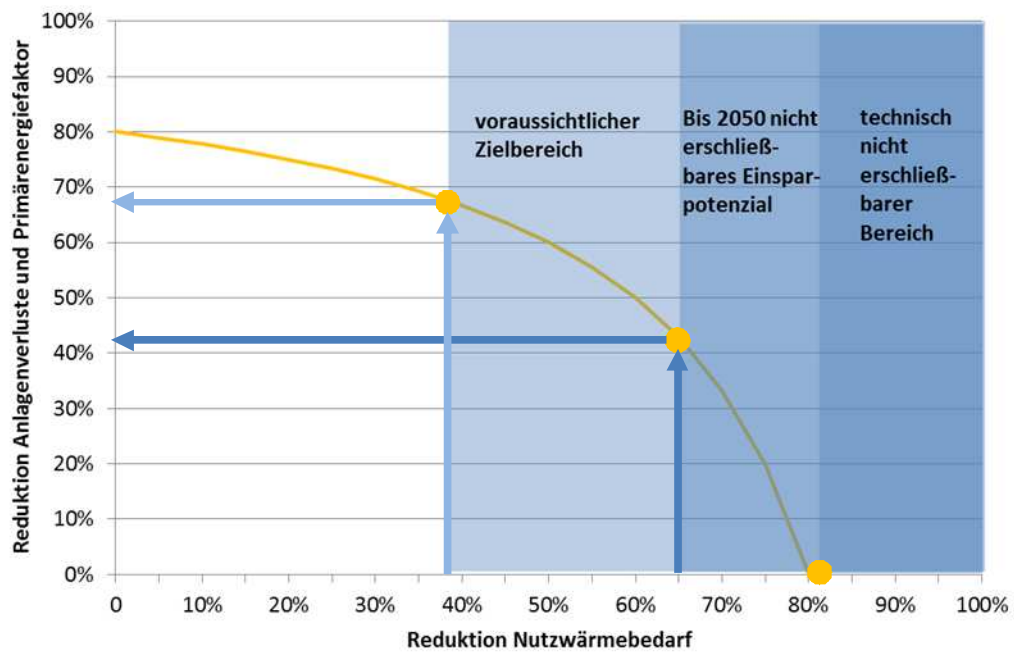


Abbildung 0.3: Vergleich der Szenarien „Trend“ und „engagierter Klimaschutz“ sowie der „Sockelanalyse“

- Trendszenario**  
 Die Entwicklung von Sanierungsrate und -tiefe sowie von Neubau und Abriss wird auf dem bisherigen Ambitionsniveau in die Zukunft fortgeschrieben. Das Trendszenario stellt die Obergrenze für den Verlauf des Nutzwärmeverbrauchs dar. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass der Ambitionsgrad in Zukunft nicht weiter sinken wird. Der Nutzwärmeverbrauch inklusive des Warmwasserverbrauchs für Wohn- und Nichtwohngebäude sinkt bis 2050 um 37 %
- Szenario engagierter Klimaschutz**  
 Der Nutzwärmeverbrauch wird mit maximalem Ambitionsniveau reduziert. Dennoch werden alle Randbedingungen innerhalb eines – gerade noch – realistisch erscheinenden Bereichs angenommen. Dieses Szenario repräsentiert das realisierbare Potenzial, das durch Dämm- und Dichtungsmaßnahmen sowie durch Wärmerückgewinnung unter aus heutiger Sicht sehr ambitionierten Annahmen erschlossen werden kann. Dabei werden eine maximale Umsetzungsgeschwindigkeit sowie Rebound- und Lock-In-Effekte berücksichtigt. Die Nutzungsdauern der Bauteile wurden innerhalb einer realistischen Bandbreite durch deutliche Vorzieheffekte verkürzt. In diesem Maximalszenario beträgt die Einsparung an Nutzwärme 65 % gegenüber dem Startjahr 2011.
- Sockelanalyse**  
 Berechnung des Nutzwärmeverbrauchs, der durch technische Maßnahmen nicht weiter gesenkt werden kann. Für alle Gebäude wird bereits im Startjahr der bestmögliche Wärmeschutz, die höchstmögliche Dichtheit und die größtmögliche Verbreitung von Wärmerückgewinnungsanlagen angenommen. Entsprechende Restriktionen gehen in die Berechnung ein. Die Sockelberechnung bildet das theoretische Potenzial der Nutzwärmereduktion ab. Es liegt bei einer Einsparung von 81 % gegenüber 2011.

Es wird deutlich, dass das realisierbare Potenzial innerhalb des Zeitrahmens bis 2050 nicht bis auf das theoretische Potenzial absinken kann, da selbst die maximale Umsetzungsgeschwindigkeit hierfür nicht ausreicht.



**Abbildung 0.4: Vergleich der Szenarien „Trend“ und „engagierter Klimaschutz“ sowie der „Sockelanalyse“ und jeweiligen Auswirkungen auf die erforderliche Reduktion der Anlagenverluste und Primärenergiefaktoren**

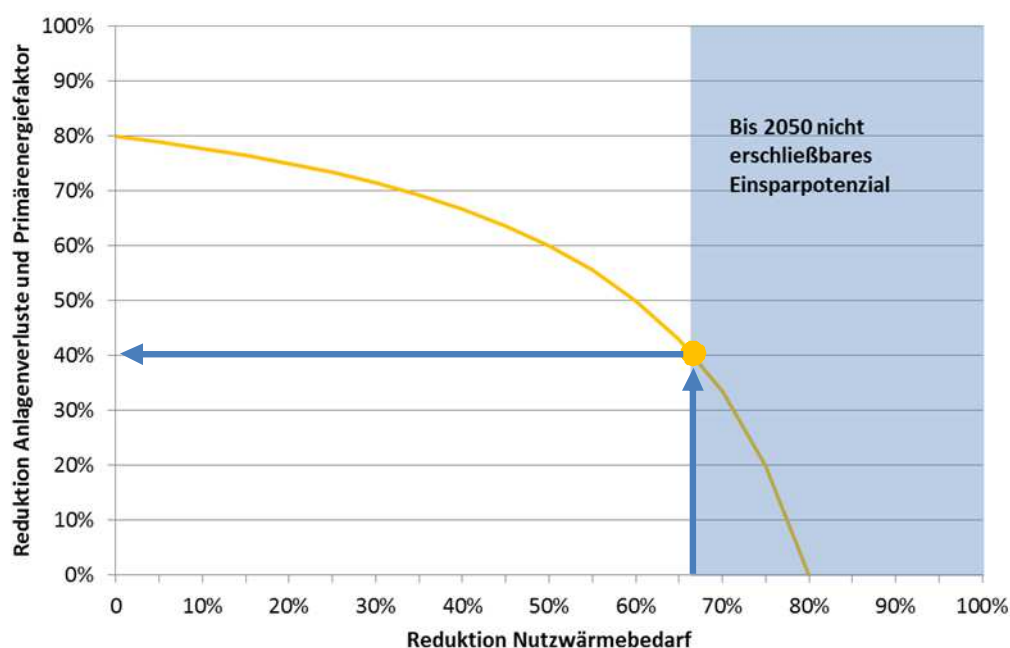
Die Ergebnisse wirken sich unmittelbar auf die erforderliche Reduktion der Anlagenverluste und Primärenergiefaktoren aus: sie muss entsprechend in einem Bereich zwischen 43 und 68 % liegen.

## Summary

This study is aiming to quantify the savings potentials of useful heat consumption. These potentials are substantial to identify possible paths leading to attainment of the climate goals. The limited potential shows that heat consumption can be reduced only to a certain amount. This is done by insulation measures, air tightness and heat recovery systems. The amount of energy savings depends on the stock of existing and new buildings yet to be built. There are buildings that cannot be insulated, made air-tight or equipped with heat recovery systems due to certain restrictions. And even the most effective building causes energy losses, albeit at a very low range. The sum of these heat losses – including hot water consumption – defines a baseline which cannot be reduced by technical means. This is the theoretical potential. It does not depend on time, as the transformation path is not considered.

The transformation path adds a further restriction to the balance: the maximum speed of transformation, which is made up of renovation rate and depth. It determines whether the theoretical potential can be reaped at all within the regarded time. Thus the transformation path at maximum speed represents the achievable potential.

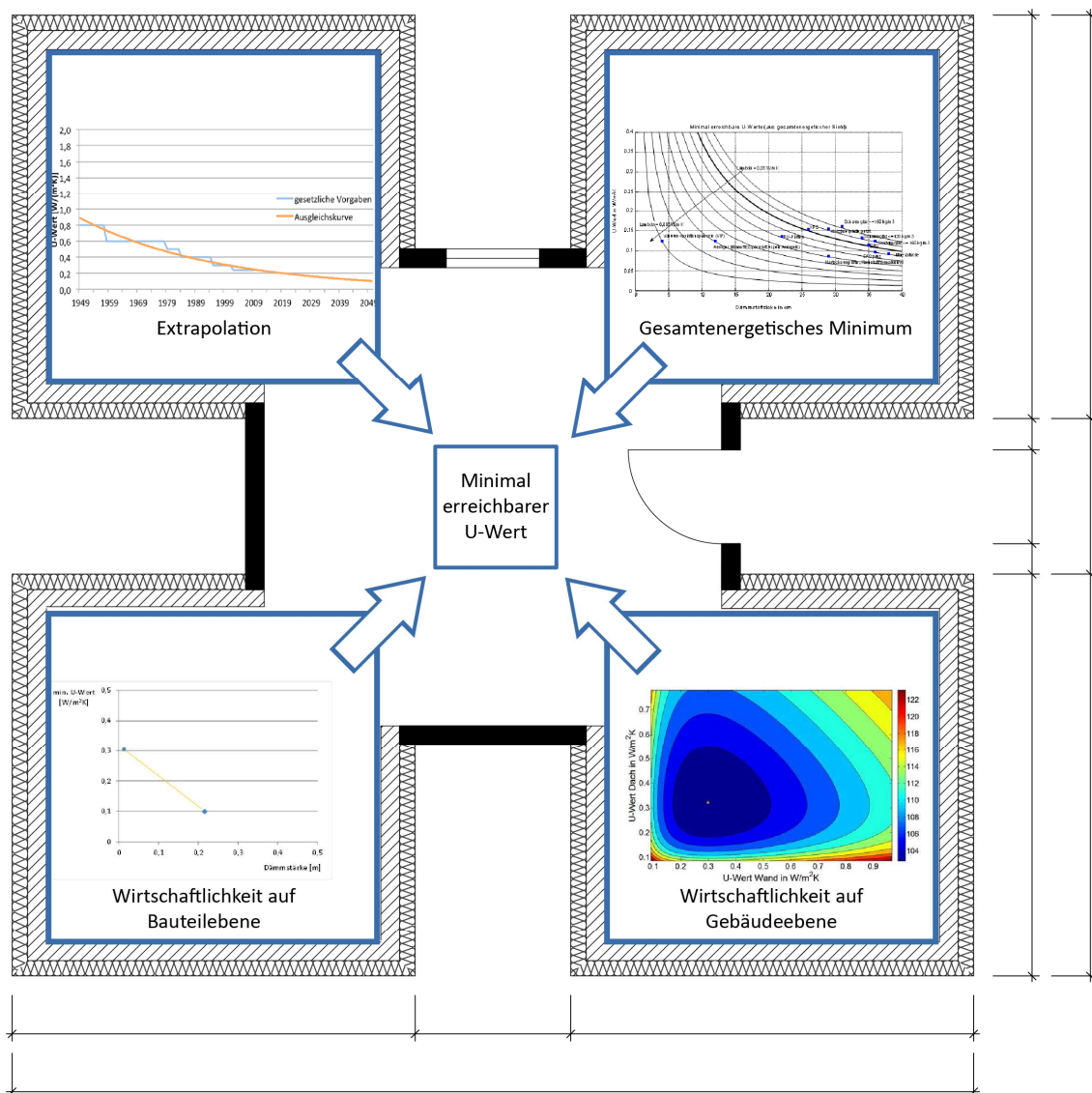
The potential limits narrow the scope for the reduction of primary energy consumption. This can only be compensated by additional efforts to reduce system losses and primary energy factors.



**Figure 0.1:** Graph showing the primary energy target (-80 % by 2050) and savings potential of useful heat consumption

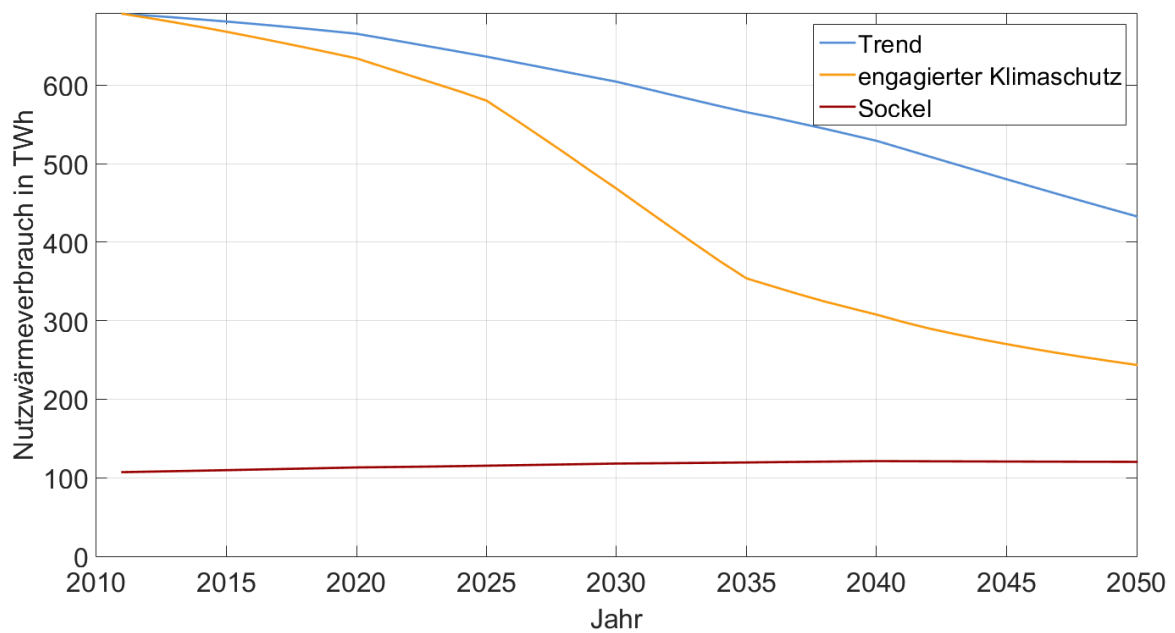
The building model GEMOD has been improved as a part of this project. It documents the German stock of residential and non-residential buildings using 234 building types and simulates future developments until 2050 by refurbishment, new buildings, and demolition.

The insulation potentials are strongly determined by the minimum U-values that can be reached in the future. Therefore there are four different ways in this project to analyze future U-values and their major influences.



**Figure 0.2:** Four paths to analyze the minimum U-values

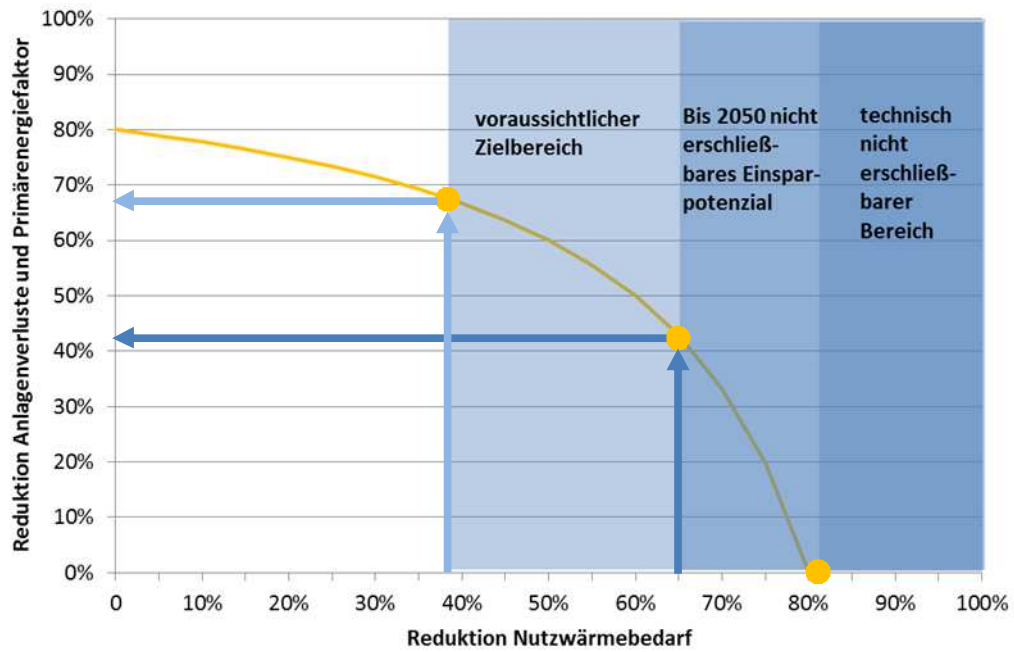
Two scenarios have been calculated with the building model GEMOD: a 'business-as-usual-scenario' on the one hand and a scenario that focusses on ambitious climate protection. They show the estimated border lines for the future development of the useful heat consumption. Figure 0.3 also shows the base line of useful heat. It develops over time driven by changes in living space, interior heat gains, building stock, and the climate change. However, the overall variations of the base line are comparably small.



**Figure 0.3:** Comparison of the scenarios 'business-as-usual', 'ambitious climate protection', and 'base line'

- **Business-as-usual**  
Extrapolation of renovation rate and depth to the future on a constant level of ambition as well as the development of new buildings and demolition. This scenario shows the upper limit of the future useful heat consumption, under the assumption that the level of ambition will not decrease. The useful heat consumption is lowered by 37 % until 2050.
- **Ambitious climate protection**  
Maximum ambitions to reduce the useful heat consumption. All relevant influences are set to their realistic limits. This scenario represents the realistic potential of useful heat savings. Nevertheless it considers the maximum speed of renovations, rebound and lock-in-effects. The life time of building components were shortened within the given realistic spread and even additional considerable pull-forward effects. The savings in this maximum scenario amount to 65 % compared to 2011.
- **Base-line**  
Useful heat consumption that cannot be lowered further by technical measures. All buildings are set to the best insulation, air tightness and heat recovery possible. Specific restrictions are taken into consideration, too. The base line represents the theoretical potential of useful heat savings. It accounts for 81 % of the 2011 consumption.

This study shows that the realistic potential does not reach the theoretical potential within the given time because the maximum speed of renovations is insufficient.



**Figure 0.4:** Comparison of the scenarios 'business-as-usual', 'ambitious climate protection', and 'base line' and their specific impact on the necessary reduction of system losses and primary energy factors

The results influence the necessary reduction of system losses and primary energy immediately: they are supposed to range from 43 to 68 %.

## 1 Hintergrund

Der Beschluss der Bundesregierung, den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf bis 2050 um 80 % zu senken (Deutsche Bundesregierung, 2010), impliziert, dass dem Gebäudesektor eine hohe Bedeutung beim Klimaschutz zufällt. Dies zeigt Abbildung 1.1 mit den jeweiligen Größenordnungen der Endenergieverbraucher und dem großen Anteil der Raumwärme. Bei gleichbleibend niedrigen Abriss- und Neubauraten werden in 2050 noch rund 80 % der heutigen Gebäude genutzt werden, so dass obiges Ziel die massive energetische Ertüchtigung des heutigen Gebäudebestandes zugrunde legt.

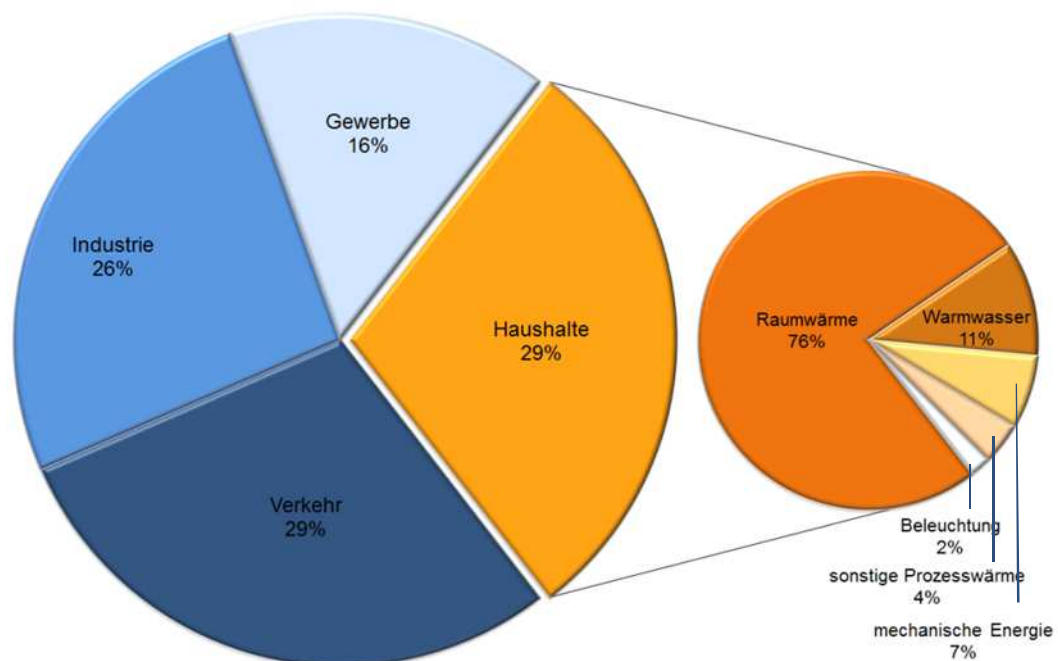


Abbildung 1.1: Endenergieverbrauch in Haushalten (BMWi, 2010)

Die Bundesregierung hat im Nationalen Klimaschutzkonzept festgelegt, die Emission von Kohlendioxid bis 2020 um 40 % gegenüber 1990 zu senken. Im Gebäudesektor fallen rund 40 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen an und 75 % der in Gebäuden verbrauchten Energie dienen der Raumwärme und Brauchwassererwärmung (BMWi, 2014). Gleichzeitig ist geplant, den (prozentualen) Anteil der auf erneuerbaren Energien beruhenden Wärmeherzeugung weiter zu erhöhen. Dieser bezieht sich auf den Gesamtwärmebedarf, wie die Gleichung zeigt:

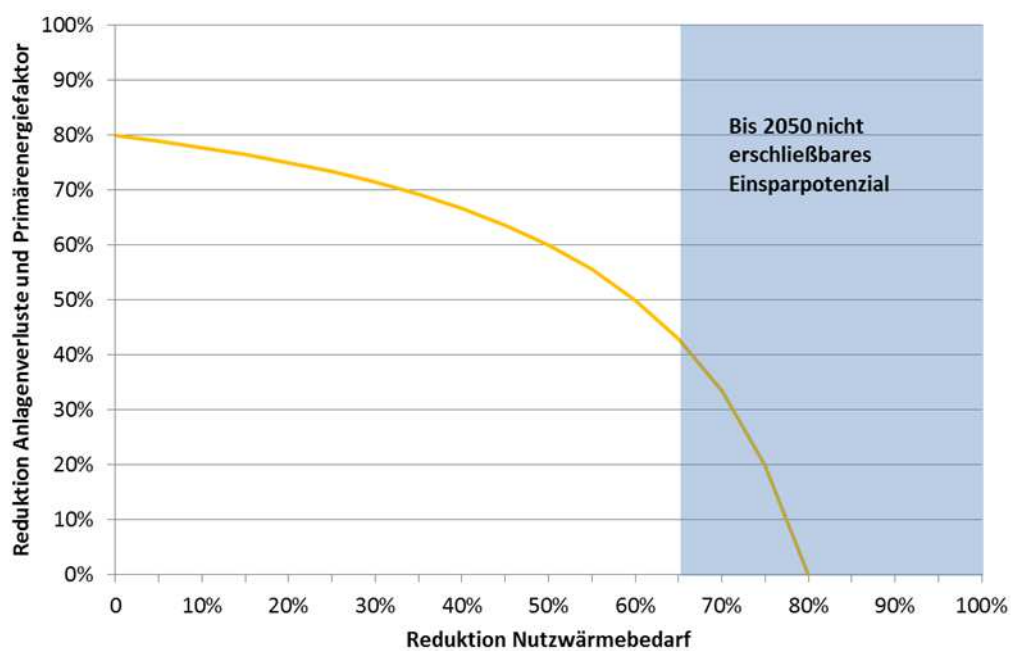
$$\text{Erneuerbare Wärme in \%} = \frac{\text{durch erneuerbare Energie erzeugte Nutzenergie}}{\text{Gesamtwärmebedarf}}$$

Langfristszenarien zur Entwicklung des (prozentualen) Anteils der erneuerbaren Wärme bedürfen daher zwingend Informationen zum Verlauf der insgesamt benötigten Nutzwärme von Gebäuden. Von besonderer Bedeutung ist es dabei, den zukünftigen Restwärmebedarf in einem (angenommenen) weitgehend durchsanierten Gebäudebestand zu kennen. Dieser Wärmebedarfssockel ist gleichzeitig ein Maß für das Einsparpotenzial, das maximal durch Dämmmaßnahmen erschlossen werden kann. In Kenntnis dieses Sockelwerts können die Ausbaupfade

einzelner Wärmebereitstellungstechnologien genauer als bislang formuliert und verfolgt werden. Im Kontext der Klimaschutzziele betrifft dies insbesondere den Ausbau der Erneuerbaren Energien.

In Abbildung 1.2 ist das Ziel der 80 prozentigen Primärenergieeinsparung als orangefarbene Kurve dargestellt. Jeder Punkt auf der Kurve stellt einen Zustand der Zielerreichung dar. Er repräsentiert eine Kombination aus Reduktion des Nutzwärmeverbrauchs und Reduktion der Anlagenverluste und Primärenergiefaktoren. Wenn zum Beispiel hohe Einsparungen des Nutzwärmeverbrauchs erreicht werden, reichen geringere Einsparungen auf Seiten der Anlagenverluste und Primärenergiefaktoren. Rechts oberhalb der Kurve liegt der Bereich der Zielübererfüllung, links unterhalb die Zielverfehlung.

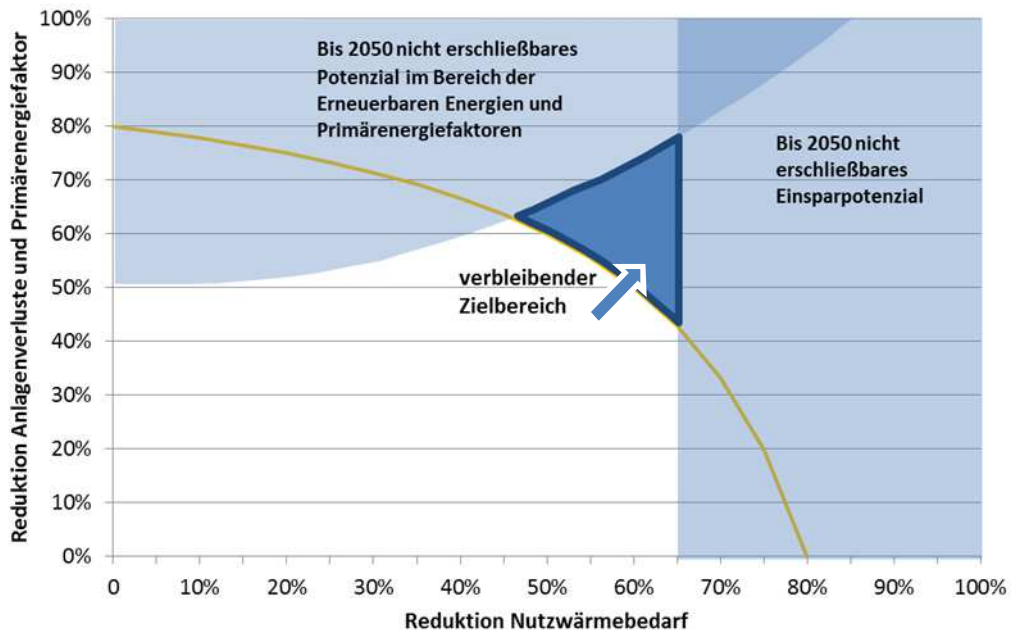
In diesem Projekt werden die Potenziale für die Reduzierung des Nutzwärmeverbrauchs quantifiziert – also die Lage des blauen Feldes auf der rechten Seite.



**Abbildung 1.2: Zielkurve für eine Primärenergieeinsparung von 80 % und Einsparpotenzial des Nutzwärmeverbrauchs**

Die Höhe des Potenzials schränkt den Handlungsspielraum für die Zielerreichung ein und hat somit auch Rückwirkungen auf den erforderlichen Ausbau der Erneuerbaren Energien. Diese unterliegen ihrerseits auch spezifischen Restriktionen. Die Restriktionen für den Ausbau der Erneuerbaren Energien sind nicht konstant, sondern hängen wiederum vom erreichten Wärmeschutz ab. Daher steigt die – hier nur qualitativ eingezeichnete Kurve – nach rechts an. Dadurch bleibt nur ein – von zwei Seiten begrenzter - Bereich als potenzieller Zielbereich übrig (dunkelblaues Dreieck in Abbildung 1.3).

Während über die Klimaschutzziele und ihre Notwendigkeit weitgehend Einigkeit herrscht, werden die Wege zum Erreichen der Ziele kontrovers diskutiert: In welchem Maß sollen die Anforderungen an Neu- und Altbauten verschärft werden? Wie weit lässt sich der Wärmeverbrauch der einzelnen Gebäude überhaupt senken? Diese Fragen seien hier nur beispielhaft aufgeführt.



**Abbildung 1.3: Zielkurve für eine Primärenergieeinsparung von 80 % und Einsparpotenzial des Nutzwärmeverbrauchs**

Die grundsätzliche „Dämmbarkeit“, also das wärmeverbrauchsmindernde Potential von Verbesserungen an der Gebäudehülle, stellt im politischen Raum eine höchst wichtige Grenzlinie dar, ab der Investitionen in nachhaltige Anlagentechniken zwingend erforderlich werden.

Um die Vorhersagegenauigkeit der Raumwärmeszenarien zu steigern, werden die Bevölkerungsentwicklung und die Entwicklung der pro Kopf zur Verfügung stehenden Wohnfläche berücksichtigt. In der Vergangenheit führte der letztgenannte Aspekt trotz vielseitiger Energieeinsparbemühungen durch die Gebäudedämmung lange Zeit zu einer Neutralisierung dieser Einsparungen, da der Pro-Kopf-Flächenbedarf gleichzeitig anstieg.

Die Sensitivitätsanalysen beziehen sich auf den minimal erreichbaren U-Wert, auf die Sanierungstiefe und auf den Einfluss des Reboundeffekts.

Derartige Zukunftsszenarien basieren naturgemäß auf einem mathematischen Rechenmodell mit den ihnen zugrunde liegenden, auf Normen basierenden Annahmen. In Kenntnis der Unschärfe dieser Berechnungen werden diese durch empirische Auswertungen gestützt bzw. auch korrigiert. Verhaltensbedingte Einflüsse der Nutzer werden statistisch und gebäudetypscharf berücksichtigt. Dies geschieht durch Auswertung vorhandener Kenntnisse zur bekannten Bedarfs-/Verbrauchs-Problematik und deren Fortschreibung in die Zukunft.

Durch die Modellintegration der Bedarfs-/Verbrauchsdiskrepanzen wird der „zukünftige Heizwärmeverbrauch“ dargestellt. Die Verwendung des Begriffs „Heizwärmeverbrauch“, hier gar noch im Kontext des „zukünftigen Heizwärmeverbrauchs“, ist mehr als unüblich, da dieser, entgegen des allgemeinen Verständnisses von „Verbrauch“ als messbarer Größe, de facto kaum messbar ist und zudem als „zukünftiger Verbrauch“ ein noch weiter gesteigertes Paradoxon darstellt. Dennoch geht es genau um die Ermittlung dieses zu erwartenden Wertes, da nur auf dieser Basis die Frage beantwortet werden kann, wie weit das politisch gesetzte Ziel einer Primärenergiebedarfsreduktion um 80 % bis 2050 auch tatsächlich durch bauliche Effizienzmaßnahmen umsetzbar ist.

## 2 Methodik

### 2.1 Betrachtungshorizont der Analyse

Zum Verständnis von Energieszenarien, von Prognosen zum Energiebedarf oder von Annahmen zur energetischen Modernisierung ist es notwendig, die zu Grunde liegenden Randbedingungen und Begrifflichkeiten zu erläutern.

Eine notwendige Abgrenzung bezieht sich auf den Energiebegriff. In der gängigen Nomenklatur unterscheidet man die Begriffe

- Heizwärmebedarf,
- Endenergie und
- Primärenergie.

Im Rahmen dieses Projektes stellt der Heizwärmebedarf die eigentliche Zielgröße dar. Dieser umfasst den Transmissionswärmeverlust über die Gebäudehülle, den Lüftungswärmeverlust sowie die solaren und internen Gewinne (siehe Abbildung 2.1). Der Heizwärmebedarf entspricht demnach der Wärmemenge, die von den Heizkörpern abgegeben wird. Zusätzlich wird hier der Warmwasserwärmebedarf berücksichtigt. Warmwasserwärmebedarf und Heizwärmebedarf stellen den gesamten Nutzenergiebedarf im Gebäude dar. Dieser ist nicht zu verwechseln mit der Erzeugernutzwärmeabgabe gemäß DIN V 18599, da die Verluste für Speicherung, Verteilung und Übergabe nicht enthalten sind. Es wird bewusst nicht mit weitergehenden Energiegrößen wie Endenergiebedarf oder Primärenergiebedarf gerechnet. Diese berücksichtigen neben den Eigenschaften der Gebäudehülle auch die Anlagentechnik und die Vorketten der Energiegewinnung anhand von pauschalen Faktoren, welche somit einen hohen Einfluss auf das Gesamtergebnis bekämen und die Ergebnisse dieser Studie überlagern würden.

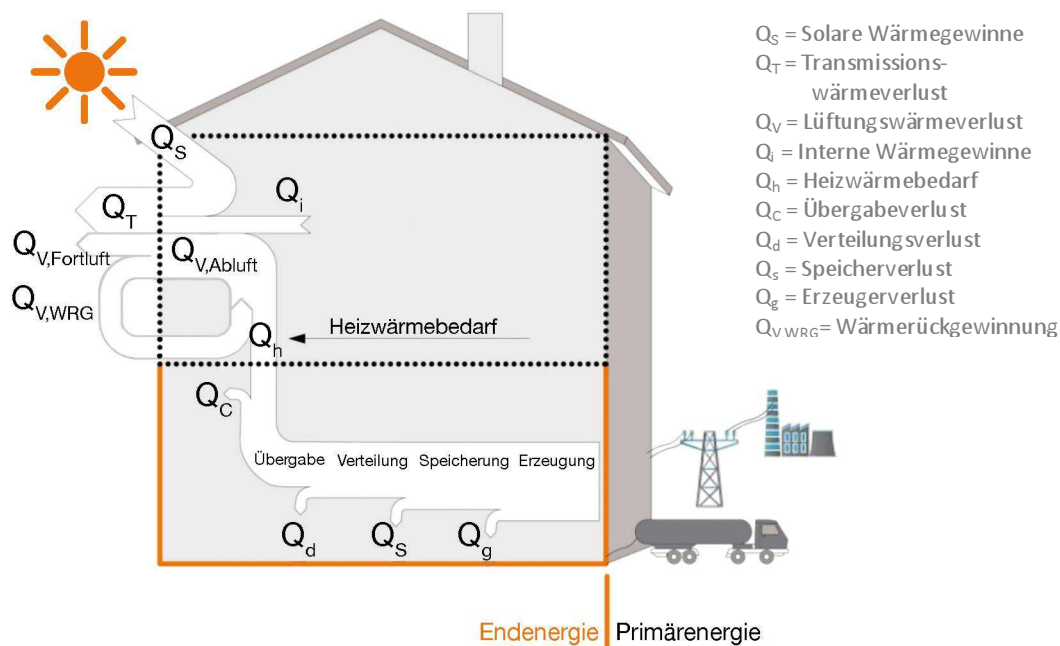


Abbildung 2.1: Energieflüsse im Gebäude in Anlehnung an DIN V 4701-10

Eine Besonderheit weist in diesem Zusammenhang die Berücksichtigung der durch Wärmerückgewinnungsanlagen gewonnenen Wärme auf. Diese fließt in die Heizwärmebedarfsszenarien mit ein, da diese die notwendige Wärmeabgabe der Heizflächen mit beeinflusst.

## 2.2 Gebäudemodell GEMOD

Die Vielzahl und Vielfalt der benötigten Daten erfordert den Einsatz eines datenbasierten Modells. Hierzu wird das Gebäudebestandsmodell GEMOD erweitert und modifiziert. GEMOD wurde in einer grundsätzlich ähnlichen, jedoch noch nicht so weit entwickelten Version bereits im Dämmrestriktionsprojekt (Beuth Hochschule, IFEU, 2012) verwendet. Im Kern umfasst das Modell die Informationen über alle Bauteile des deutschen Gebäudebestands, woraus sich ein auf Gebäudekohorten basierendes und bauteilscharfes Modell zur Abbildung des gesamten Heizwärmebedarfs sowie des Warmwasserwärmebedarfs ergibt. Dieses Modell ermöglicht die Abbildung der zeitlichen Entwicklung der gesuchten Zielgrößen unter vorzugebenden konstanten oder auch variierenden Randbedingungen.

Abbildung 2.2 zeigt die grundsätzliche Struktur des Gebäudemodells GEMOD. Ausgehend von dem Mengengerüst des Gebäudebestands werden die gezeigten Aspekte berücksichtigt.

### Gebäudebestand

Der deutsche Gebäudebestand wird in GEMOD mit Hilfe von 234 Gebäudetypen abgebildet. Diese gliedern sich in vier Wohngebäude- und 14 Nichtwohngebäudearten, die wiederum nach insgesamt 13 Baualtersklassen unterschieden werden. Die Einteilung der Wohngebäude basiert in weiten Teilen auf der Gebäudetypologie des IWU (Tabula, 2012). Die Baualtersklassen sind nach typischen Baukonstruktionen bzw. dem Inkrafttreten relevanter Verordnungen eingeteilt. Zusätzlich wurden drei weitere Baualtersklassen angelegt, um künftige Gebäudestandards abbilden zu können. Das Startjahr des Modells ist 2011. Alle relevanten Eingangsdaten sind auf dieses Jahr bezogen. Die Gesamtanzahl der Gebäude ist mit statistischen Daten und aktuellen Studien abgeglichen (Fraunhofer ISI et al., 2013).

Eine weitere Einflussgröße auf zukünftige Entwicklungen im Wärmesektor stellen die Abriss- und Neubauraten dar. Diese hängen von vielerlei Randbedingungen wie der Bevölkerungsentwicklung, dem Energiepreisniveau, stadtplanerischen Aspekten oder von subjektiven Vorstellungen der Nutzer oder Investoren ab. Der Einfluss unterschiedlich angenommener Abriss- und Neubauraten wird dargestellt, indem zum einen die Trends der vergangenen Jahre fortgeschrieben werden und zum anderen die Raten in einem realistischen Bereich variiert werden.

### Thermische Eigenschaften

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile entsprechen weitgehend der IWU-Gebäudetypologie (IWU, 2013). Sie wurden teilweise durch Informationen aus anderen Quellen ergänzt z.B. (Institut für Bauforschung e.V., 1983), (Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., 2009). Sanierungen, die bereits vor dem Startjahr durchgeführt wurden, werden gebäudetypscharf berücksichtigt. Neben den Anteilen der nachträglich gedämmten Bauteilflächen und den typischen U-Werten früherer Sanierungen gehen auch die unterschiedlichen Maßnahmenkombinationen in die Berechnung ein. Die Angaben fußen auf den Daten der Datenbasis des IWU (IWU, 2013). Zusätzlich zu den Auswertungen durch IWU wurden eigene Auswertungen des Datenrohmaterials durchgeführt.

Die Wohnflächen, Bruttovolumina und Bauteilflächen der Gebäudetypen basieren für die Wohngebäude ebenfalls auf der Gebäudetypologie des IWU. Diese Daten wurden jedoch in einem zusätzlichen Schritt mit der statistischen Summe der beheizten Wohnfläche in Deutschland abgeglichen. Das Mengengerüst der Nichtwohngebäude dagegen wurde durch eigene Analysen weiter modifiziert.

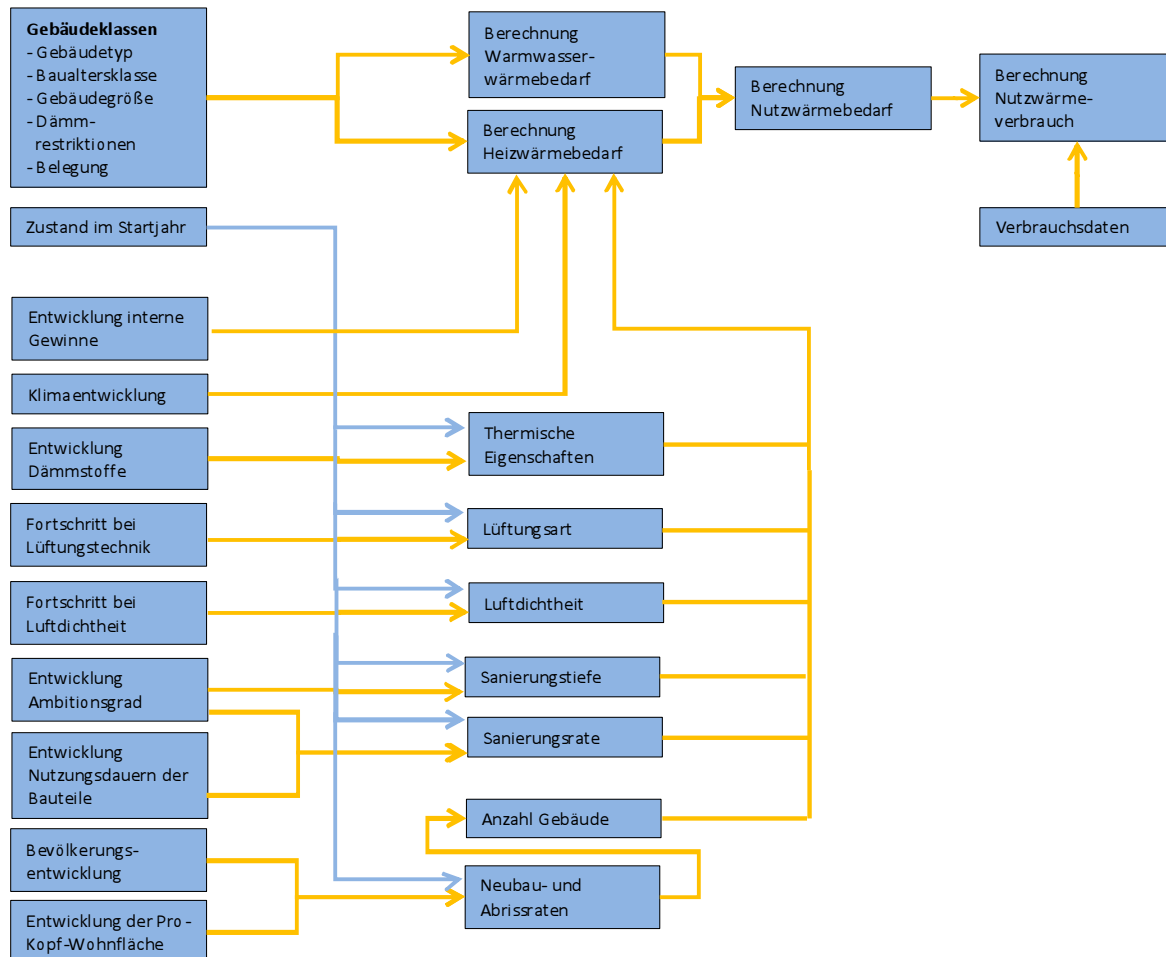


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Gebäudemodells GEMOD

### Berechnung des Heizwärmebedarfs

Der Heizwärmebedarf wird bauteilscharf berechnet. Grundlage der Berechnung ist das Monatsbilanzverfahren in DIN V 4108-6. Dieses Verfahren wird in der Praxis für Nachweise im Wohngebäudebereich überwiegend angewandt. Der Norm-Berechnungsgang wird in GEMOD – mit kleineren Vereinfachungen – vollständig umgesetzt. Die Vereinfachungen betreffen insbesondere die Orientierung der Fensterflächen, die Nachtabsenkung und die Fugenlüftung. Das Modell rechnet grundsätzlich mit Standardrandbedingungen gemäß EnEV. Andere Randbedingungen – wie z.B. regionale Klimabedingungen – können aber auch vorgegeben werden. Der Heizwärmebedarf wird aus den Transmissionswärmeverlusten, dem Lüftungswärmeverlust, den internen und den solaren Gewinnen bilanziert. Die so ermittelten Energiebedarfswerte können mit Hilfe von Verbrauchsfaktoren, die gesondert ermittelt wurden, korrigiert werden, so dass der tatsächliche Energieverbrauch sowohl für Einzelgebäude als auch für den Gesamtbestand dargestellt werden kann.

## Lüftungswärmeverluste

Lüftungswärmeverluste werden in Gebäuden, die nicht über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung verfügen, mit Hilfe der pauschalen Luftwechselraten gemäß EnEV in Abhängigkeit von der Luftdichtheit der Gebäudehülle berechnet. Die Luftdichtheit der Gebäudehülle wird in GEMOD abhängig vom Transmissionswärmeverlust angenommen. Dahinter steht die Grundannahme, dass Gebäude mit einem besseren Wärmeschutz grundsätzlich auch über eine dichtere Hülle verfügen.

## Maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Wenn eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung vorhanden ist, so wird der Lüftungswärmeverlust aus dem Wärmerückgewinnungsgrad, dem Nennluftwechsel und dem  $n_{50}$ -Wert berechnet.

Der Nennluftwechsel wird für Wohngebäude nach DIN V 4701-10 pauschal mit  $0,4 \text{ h}^{-1}$  angesetzt. Der Nennluftwechsel hängt bei Nichtwohngebäuden von deren Nutzung ab. Der geforderte Nennluftwechsel sowie die Betriebsdauer der Lüftungsanlagen werden aus den Standardnutzungsprofilen der DIN V 18599-10 entnommen.

Der  $n_{50}$ -Wert, der ein Maß für die gemessene Dichtheit der Gebäudehülle ist, wird in Abhängigkeit vom Transmissionswärmeverlust der Gebäude ermittelt. Auch hier gilt die Annahme, dass gut gedämmte Gebäude grundsätzlich auch luftdichter sind als schlecht oder nicht gedämmte Gebäude.

## Trinkwasserwärmebedarf

Der Trinkwasserwärmebedarf wird gemäß den Regelungen der EnEV berechnet. Dabei werden die Vorgaben aus DIN V 18599 für Wohn- und Nichtwohngebäude verwendet.

## Verbrauch/Bedarf

Die Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Verbrauch und dem Verfahren nach DIN V 4108-6 wurden in mehreren empirischen Studien untersucht (IWU, 2013), (ARGE-SH, 2011)). Mit diesen Daten wurde das Verhältnis von Verbrauch zu Bedarf als Funktion des Heizwärmebedarfs ermittelt. Mit Hilfe dieser empirischen Verbrauchsfaktoren können auch mittlere Verbrauchswerte für künftige Gebäudezustände vorausberechnet werden. Auf diese Weise können Szenarien für den Heizenergieverbrauch erstellt werden.

Das Modell wird um einen Verbrauchs-Bedarfsabgleich erweitert. Die berechneten Nutzwärmebedarfswerte werden mit einem Verbrauchsfaktor in typische Wärmeverbräuche umgerechnet. Der Verbrauchsfaktor ist abhängig vom berechneten Wärmebedarf. Der Berechnungsalgorithmus wurde vom IWU empirisch ermittelt (IWU, 2013). Das Verfahren wird durch eine Reihe anderer Erhebungen bestätigt, was in Kapitel 3.4 näher erläutert wird.

## Sozioökonomische Einflüsse

In GEMOD können den Wohngebäuden bestimmte Bewohner-Milieus zugeordnet werden. Sie entsprechen den Milieus, die vom Sinus-Institut erstellt und untersucht wurden (Sinus Sociovision GmbH, 2009). Jedem Wohngebäudetyp wurde statistisch ein spezifischer Mix von Milieus zugeordnet. Für jedes Milieu wurden außerdem spezifische Verbrauchsfaktoren errechnet. So kann der Einfluss einzelner Nutzergruppen auf den Gesamtverbrauch dargestellt werden. Weiterhin kann die Wirkung von milieuspezifischen Instrumenten modelliert werden.

## Wohnflächenentwicklung

Die Entwicklung der Wohnflächen wird durch die Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung und die Prognosen zur Entwicklung der Pro-Kopf-Wohnfläche hergeleitet. Beide Werte sind für die aktuellen Berechnungen dem Trendszenario (Prognos et al., 2014) entnommen. Neubau- oder Abrissraten können im Modell angepasst werden. Die Anpassung geschieht jedoch stets so, dass die gesamte Wohnfläche den Vorgaben entspricht.

## Entwicklung des Gebäudebestands

Der Gebäudebestand entwickelt sich durch Sanierungstätigkeit, Neubau und Abriss. Das Gebäudemodell GEMOD berücksichtigt, dass Gebäude bzw. ihre Komponenten eine typische Nutzungsdauer aufweisen, während der weder eine weitere Sanierung noch ein Abriss ansteht. Um eine möglichst realistische Abbildung der zeitlichen Verteilungsbreite der Nutzungsdauern zu erreichen, berechnet GEMOD die Verteilung der Nutzungsdauern nach einer Weibull-Verteilung. Diese beschreibt typische Verläufe von Ausfallraten technischer Produkte und besagt, dass zum Zeitpunkt der höchsten Austauschrate einer Komponente 60 % der Gesamtanzahl dieser Komponente saniert wurden.

Wenn Bauteile als sanierungsbedürftig eingestuft werden, können sie drei verschiedenen Sanierungsoptionen zugeordnet werden:

- „Pinselsanierung“  
Das Bauteil wird saniert ohne die energetischen Eigenschaften zu verändern – es steht für die Nutzungsdauer der Sanierung nicht für weitere Sanierungen zur Verfügung
- Konventionelle Sanierung  
Das Bauteil wird in Anlehnung an die rechtlichen Mindestanforderungen saniert – diese können in der Zukunft verschärft werden. Die Mindestanforderungen entsprechen hier den maximalen U-Werten aus Anlage 3 der EnEV. Sie werden um einen Zuschlag erhöht, um nicht-EnEV-konforme Sanierungen ebenfalls abzubilden.
- Ambitionierte Sanierung  
Das Bauteil wird auf einen besonders hochwertigen Dämmstandard saniert - dieser orientiert sich am technisch Machbaren und entwickelt sich im Modell in Zukunft weiter. Im Startjahr entspricht dies dem Standard der KfW-Einzelmaßnahmenförderung.

Jedes Bauteil jeden Gebäudetyps wird nach Ablauf seiner vorzugebenden Nutzungsdauer, die sich durch die Weibull-Verteilung zeitlich verteilt, nach bestimmten Kriterien modernisiert. Es wird dabei wie oben beschrieben zwischen Pinselsanierungen, konventionellen und ambitionierten Sanierungen unterschieden. Vor dem Startjahr 2011 durchgeführte energetische Sanierungen werden erst ab der ersten Ölkrise im Jahr 1973 berücksichtigt. Die Sanierungszyklen und der Anteil der Sanierungsarten sind in Abbildung 2.3 exemplarisch für ein bestimmtes Bauteil (zum Beispiel das Dach) von Einfamilienhäusern der Baualtersklasse 1919 – 1948 dargestellt (EFH\_C). Die Sanierungsanteile wurden dabei frei angenommen und dienen hier nur der Erläuterung des Vorgehens. Der erste Sanierungszyklus erstreckt sich hier über einen Zeitraum von rund 40 Jahren. Die energetischen Sanierungen haben zunächst nur einen geringen Anteil. In den folgenden zwei Sanierungszyklen steigt zunächst der Anteil der konventionellen, später der der ambitionierten Sanierungen stark an.

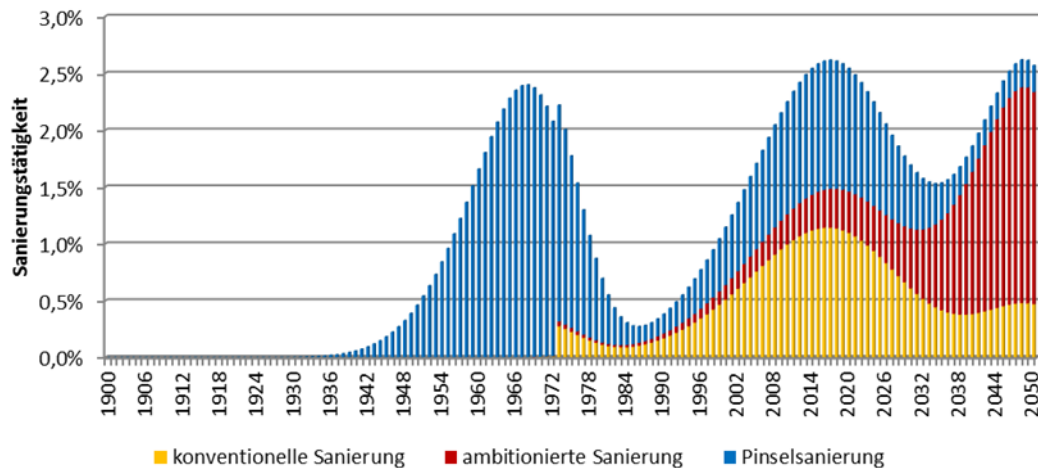


Abbildung 2.3: Sanierungszyklen für Dächer im Gebäudetyp EFH\_C nach Art der Sanierung

In Abbildung 2.4 ist dargestellt, wie sich der gesamte Bestand dieses Bauteils entwickelt. Während des Errichtungszeitraums von 1919 bis 1948 wird ein linearer Zubau angenommen. Nach Ablauf einer Mindestnutzungsdauer setzt eine Abrisstätigkeit mit einer vorgegebenen Quote ein (hier 0,1 % ab 1989). Es werden nur Gebäude aus dem unsanierten Anteil abgerissen oder sanierte Gebäude, wenn die Nutzungsdauer der Sanierung abgelaufen ist. Pinselsanierungen werden nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer wieder zu unsanierten Bauteilen (Abfall des dunkelblauen Anteils ab ca. 1989). Sanierte Bauteile werden nach Ablauf der Nutzungsdauer nicht wieder zu unsanierten Bauteilen, sondern bleiben auf dem erreichten Niveau oder verbessern sich (Verschlechterungsverbot).

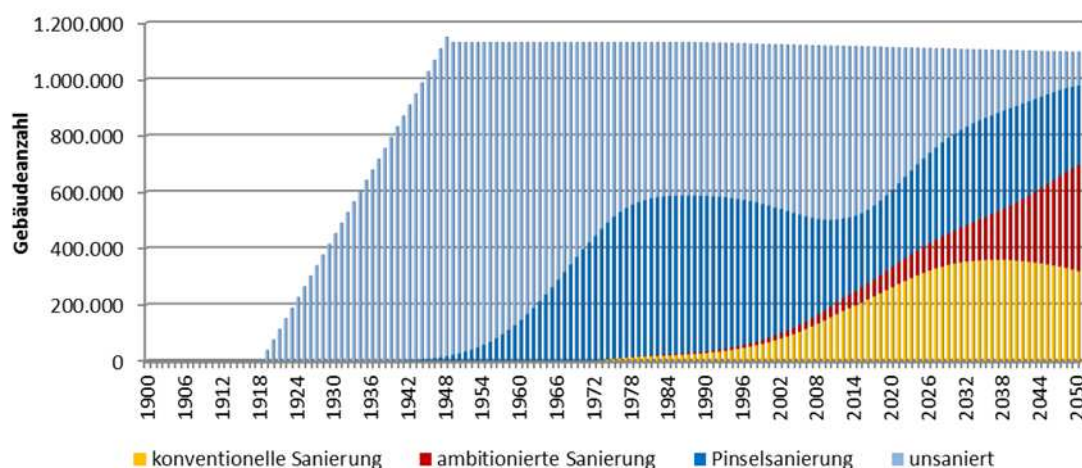


Abbildung 2.4: Entwicklung des Bestands der Dächer im EFH\_C nach Art der Sanierung

Die gezeigte Methodik wird für sämtliche Bauteile und Gebäudetypen des Mengengerüsts analog angewandt.

## Klimadaten

GEMOD rechnet standardmäßig mit den Klimarandbedingungen gemäß EnEV bzw. DIN V 18599. Darüber hinaus wird von einem Temperaturanstieg um 1 K bis 2050 ausgegangen, der durch den Klimawandel verursacht wird. Es ist ebenso möglich, die Werte der solaren Einstrahlung im

Zeitverlauf zu ändern. Dies wird jedoch in den aktuellen Berechnungen nicht getan, da hier kein eindeutiger Trend zu erkennen ist.

## 2.3 Validierung des Modells

### Einzelgebäude

Auf der Ebene der Einzelgebäude wurden die Berechnungsergebnisse aus GEMOD mit Rechenergebnissen des Programms „Energieberater 18599“ des Anbieters Hottgenroth Software verglichen. Die Vergleichsberechnungen wurden für alle Gebäudegrößen (EFH, RH, MFH, GMH) und jeweils für unterschiedliche Effizienzstandards (ungedämmter Altbau, Referenzstandard EnEV, Hocheffizienzstandard) durchgeführt. Die Randbedingungen waren jeweils der EnEV entnommen. Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen von GEMOD und Hottgenroth betrugen maximal 3 %. Sie resultierten aus Vereinfachungen im Rechenverfahren gegenüber DIN V 4108-6, insbesondere bei der Berechnung der Nachtabenkung und von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Bei Rechengängen ohne Nachtabenkung und Wärmerückgewinnung betrug die Abweichung der Ergebnisse stets unter 1 %. Diese Rechengenauigkeit wird angesichts der Unsicherheiten bezüglich anderer Eingangsdaten für hinreichend erachtet.

### Gesamtbestand

Auf der Ebene des gesamten Gebäudebestands wurden die Rechenergebnisse mit statistischen Zahlen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB, 2015) abgeglichen. Der statistisch erfasste Endenergieverbrauch für Raumwärme für das Jahr 2011 wurde klimabereinigt und mit einem durchschnittlichen Anlagenverlust von 20 % in einen Nutzwärmeverbrauch umgerechnet wurde. Zusätzlich wurden die Verbräuche der Jahre 2008 bis 2012 klimabereinigt, um einen längerfristigen Durchschnitt als Referenz zu erhalten.

Der Abgleich erfolgte getrennt nach Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie separat auch für Raumwärme und Brauchwassererwärmung. Die Abweichungen betrugen in allen Bereichen weniger als 2 %. Zum Kalibrieren wurden mehrere energetische Eigenschaften der Gebäudetypen innerhalb eines plausiblen Bereichs angepasst. Abweichungen, die danach noch vorhanden waren, wurden durch eine Anpassung des Verbrauchsfaktors minimiert. Der Verbrauchsfaktor wurde dabei so kalibriert, dass die Änderung vor allem Gebäude mit hohem Energiebedarf betrifft. Die Rechenergebnisse für künftige Jahre sind dadurch von dieser Anpassung kaum betroffen.

Bei der Umrechnung der Endenergieverbräuche für Brauchwassererwärmung in Nutzwärme wurde eine Erzeugeraufwandszahl von 1,2 angesetzt. Verluste bei Speicherung, Verteilung und Übergabe fanden zusätzlich mit 35 % der Erzeugernutzwärmeabgabe Berücksichtigung. Der kalibrierte Gesamt-Warmwasser-Nutzenergie-Verbrauch aller Nichtwohngebäude weicht um weniger als 1,8 % von den Top-Down-Verbräuchen der AGEB ab.

### 3 Ableitung der Eingangsgrößen

#### 3.1 Gebäudebestand

Der Bestand an Wohn- (WG) und Nichtwohngebäuden (NWG) wird gemäß dem Wissensstand vorliegender Studien und Forschungsergebnisse in GEMOD abgebildet. Hierzu wird die bereits entwickelte Datenbank des Dämmrestriktionsmodells (Beuth Hochschule, IFEU, 2012) weiter detailliert und aktualisiert. Neben der Anzahl der jeweiligen Gebäudetypen werden diesen auf Basis statistischer Auswertungen Bauteilflächen sowie thermische Bauteilqualitäten zugewiesen. Dieser Datenbestand umfasst somit alle einzelnen Bauteile aller thermischen Hüllflächen in Deutschland mit ihrer Anzahl, Fläche, ihren Schichtaufbauten und Dämmstandards. Diese Daten stellen die Grundlage dar, um den heutigen, aber auch den zukünftigen Heizwärmebedarf bauteilscharf zu berechnen.

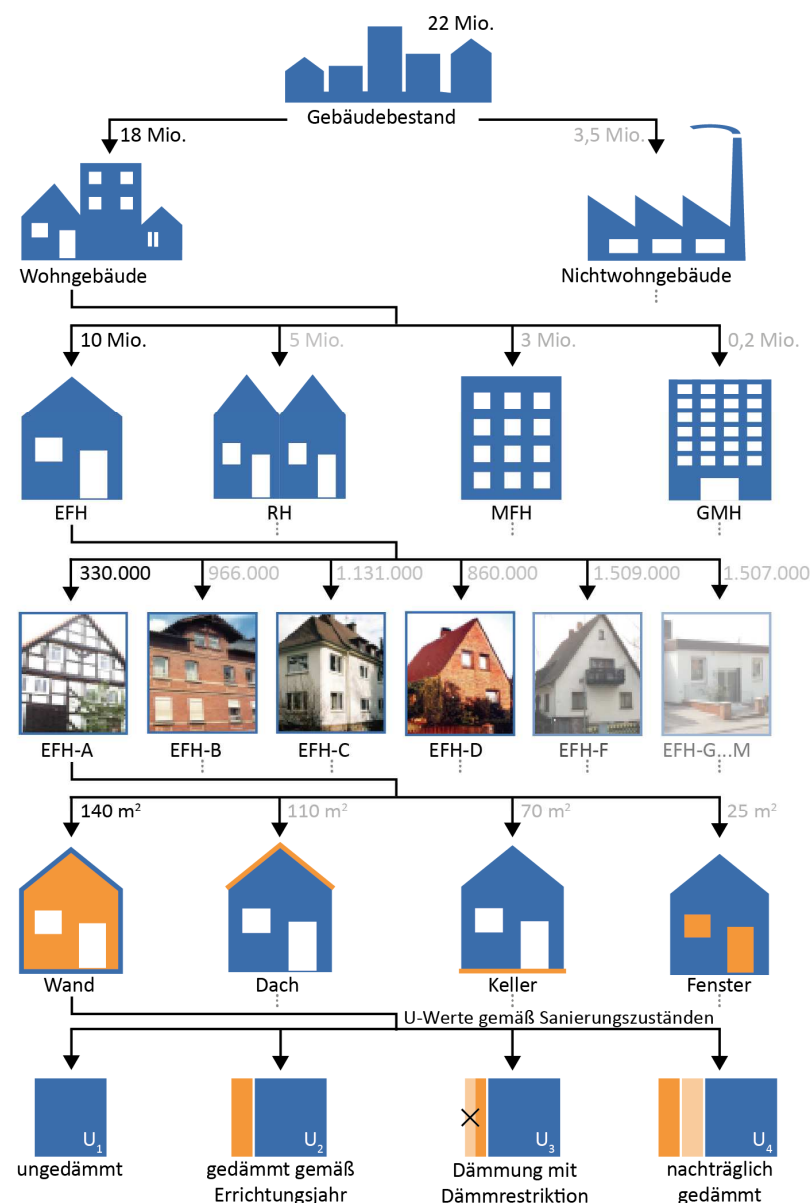


Abbildung 3.1: Detaillierungsgrad des Bottom-Up-Modells GEMOD

Die Daten des Wohngebäudebestands in Deutschland werden zu großen Teilen aus dem aktuellen Tabula-Projekt übernommen (Tabula, 2012) und mit anderen Erhebungen (Zensus, 2011) abgeglichen. Im Bereich der Nichtwohngebäude bestehen große Unsicherheiten hinsichtlich der Mengengerüste. Die in der Dämmrestriktionsstudie eruierten Werte wurden durch detaillierte Auswertungen neuer maßgeblicher Studien weiter konkretisiert und untermauert (Fraunhofer ISI et al., 2013; BMVBS, 2012; dena, 2013).

Eine weitere Einflussgröße auf die Entwicklungen im Wärmesektor stellen die Abriss- und Neubauraten dar. Diese hängen von vielerlei Randbedingungen wie der Bevölkerungsentwicklung, dem Energiepreisniveau, stadtplanerischen Aspekten oder den subjektiven Vorstellungen der Nutzer und Investoren ab. Der Einfluss unterschiedlich angenommener Abriss- und Neubauraten wird dargestellt, indem zum einen die Trends der vergangenen Jahre fortgeschrieben werden und zum anderen die Raten in einem ambitionierten, aber realistischen Bereich so variiert werden, dass deren Einfluss auf die Gesamtentwicklung deutlich wird.

### 3.1.1 Wohngebäude

#### 3.1.1.1 Einführung

Das Projekt (Tabula, 2012) bietet eine weithin anerkannte Typologie für die energetische Analyse von Wohngebäuden und ist eine revidierte Fassung der vom IWU erarbeiteten und kontinuierlich weiter entwickelten Deutschen Gebäudetypologie.

Im Ergebnis werden die Gebäude nach Baualter und Größe systematisiert und jeder Gebäudetyp mit einem Beispielgebäude beschrieben. Daraus ergibt sich eine Einteilung des Wohngebäudebestands in Deutschland in 40 repräsentative Gebäudetypen. Die üblichen Konstruktionsweisen, Baustoffe und wärmetechnischen Standards einzelner Epochen werden für jede Baualtersklasse angegeben. Die Bauteilflächen der thermischen Gebäudehülle und die Kompaktheit des Baukörpers werden, wie weiter unten im Detail beschrieben, aus der kennzeichnenden Größe der jeweiligen Gebäudetypen ermittelt.

#### Gebäudetypologie – Baualtersklassen

Bereits 2007 entwickelte das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU, 2007) zehn Baualtersklassen (BAK), in die die Gebäudetypen eingeteilt werden. Diese orientieren sich an energetisch relevanten Entwicklungen im Gebäudebestand, beispielsweise an den Weltkriegen oder der Einführung der Wärmeschutzverordnungen. In der nachfolgend weiterentwickelten Deutschen Gebäudetypologie (IWU, 2011) wurden die Sonderfälle, die in der ursprünglichen Typologie vorhanden waren, jedoch entfernt.

Die Gebäudetypologie, die Wohnungszahl, die Wohnflächen und die Gebäudezahl für die einzelnen Gebäudetypen wurden 2012 im Rahmen des EU-Projekts TABULA überarbeitet. In der Neufassung der Gebäudetypologie (siehe Anhang, Tabelle 0.1) wurden die Ergebnisse des Zensus 2011 berücksichtigt (IWU, 2013). IWU selbst gibt aber zu bedenken, dass die Werte der einzelnen Gebäudetypen statistische Fehler aufweisen können, die sich vor allem bei Typen mit geringen Anzahlen bemerkbar machen. So sind zum Beispiel die Daten für große Mehrfamilienhäuser (GMH) mit höheren Unsicherheiten behaftet.

#### Gebäudeanzahl / Wohngebäude

Vergleicht man die Gesamtanzahl der Wohneinheiten der aktualisierten Gebäudetypologie (IWU, 2013) mit den Angaben des statistischen Bundesamtes (destatis, 2013), so ist eine Abweichung von

5,3% zu erkennen (siehe Tabelle 3.1). Die einzelnen Baualtersklassen lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Einteilung nicht im Detail vergleichen und müssen daher hier zusammengefasst werden. Die Unterschiede innerhalb der BAK sind bis 1978 nicht besonders hoch, weichen aber in den Jahren 1979 bis 1995 und 1996 bis 2009 stärker ab.

| Baualtersklassen        | destatis 2013 | IWU 2013   | Abweichung in % |
|-------------------------|---------------|------------|-----------------|
| Wohneinheiten insgesamt | 41.298.747    | 39.228.000 | 5,3             |
| bis 1918                | 5.787.523     | 5.339.000  | 8,4             |
| 1919 bis 1948           | 4.445.946     | 4.265.000  | 4,2             |
| 1949 bis 1978           | 17.742.862    | 17.057.000 | 4,0             |
| 1979 bis 1995           | 8.034.571     | 7.013.000  | 14,6            |
| 1996 bis 2009           | 4.894.922     | 5.555.000  | -11,9           |

**Tabelle 3.1: Vergleich der Anzahl der Wohneinheiten nach Baualtersklasse**

Die Daten der Tabula-Studie stellen die Wohngebäudesituation in Deutschland dar (Tabula, 2012) und werden seit 2013 fortlaufend durch (IWU, 2013) aktualisiert. Auf der Homepage des Projekts Episcopo wird jeweils die neueste Fassung ([www.episcopo.eu](http://www.episcopo.eu)) dokumentiert.

### Definition der Bezugsfläche

Sowohl zur Ermittlung der Einzelflächen der thermischen Hülle (Dach, Wand, Fenster usw.) als auch zur Darstellung der üblichen und besonders anschaulichen flächenbezogenen Energiewerte (in kWh/m<sup>2</sup>a) ist eine eindeutige Definition der Bezugsfläche unabdingbar. In Deutschland stehen vier Regelwerke zur Bestimmung dieser Bezugsfläche zur Wahl:

- die DIN 277,
- die Wohnflächen-Verordnung (WoFIV),
- die Ergebnisse aus der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 des statistischen Bundesamtes sowie
- die Vorgaben der EnEV.

Am Beispiel der Flächenanalyse einer einfachen Wohnung lassen sich die Auswirkungen der verschiedenen Ansätze leicht verdeutlichen (FFE, 2013). Vergleicht man beispielsweise die Wohnflächen-Verordnung (WoFIV) mit der Nutzflächenverordnung nach DIN 277, so weichen diese beim spezifischen Raumwärmebedarf um 5% voneinander ab (gemäß DIN 277 ist der Wohnungsflur unbeheizt). Je nach angewendeter Rechenvorschrift können diese sogar um bis zu 20 % differieren. Die EnEV hingegen berechnet die beheizte Nutzfläche aus dem Volumen der Gebäude, sofern dieses zusammen mit der Raumhöhe bekannt ist. Ansonsten wird bei Einfamilienhäusern mit beheiztem Keller das 1,35-fache der Wohnfläche (nach WoFIV) bzw. bei sonstigen Wohngebäuden das 1,2-fache angesetzt. Bei Nichtwohngebäuden wird die Nettogrundfläche zugrunde gelegt.

| Alle Flächen<br>in m <sup>2</sup>                    | Grund-<br>fläche | Wohnfläche            |         |         |          | Nutzfläche |        | Nettogrundfläche |       | Gebäude-<br>nutzfläche |
|------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|---------|---------|----------|------------|--------|------------------|-------|------------------------|
|                                                      |                  | Wohnflächenverordnung |         |         | Destatis | DIN 277    | EnEV   | DIN 277          | EnEV  | EnEV                   |
|                                                      |                  | 100 % GF              | 50 % GF | 25 % GF |          |            |        |                  |       |                        |
| Wohnzimmer                                           | 33               | 30                    | 3       |         | 33       | 33         | 33     |                  |       |                        |
| Küche                                                | 14               | 13                    | 1       |         | 14       | 14         | 14     |                  |       |                        |
| Bad                                                  | 10               | 10                    |         |         | 10       | 10         | 10     |                  |       |                        |
| Gang                                                 | 13               | 13                    |         |         | 13       | -          | -      |                  |       |                        |
| WC                                                   | 5                | 5                     |         |         | 5        | 5          | 6      |                  |       |                        |
| Schlafzimmer                                         | 17               | 15                    | 2       |         | 17       | 17         | 17     |                  |       |                        |
| Terasse                                              | 8                |                       |         | 8       | 8        | 8          | -      |                  |       |                        |
| Bezugsfläche-<br>Summe                               | 100              | 86                    | 3       | 2       |          |            |        |                  |       |                        |
|                                                      |                  |                       | 91      |         | 100      | 87         | 79     | 100              | 92    | 109                    |
| Abweichung ggü. Fläche nach WoFIV                    |                  |                       |         |         | + 10 %   | - 4 %      | - 13 % | + 10 %           | + 1 % | + 20 %                 |
| Spezifischer Raumwärmebedarf in kWh/m <sup>2</sup> a |                  |                       |         |         | 91       | 105        | 115    | 91               | 99    | 83                     |
| Abweichung auf Basis WoFIV                           |                  |                       |         |         | - 9 %    | + 5 %      | + 15 % | - 9 %            | - 1 % | - 17 %                 |

**Tabelle 3.2:** Vergleich der Berechnungsmethoden und deren Einfluss auf den spezifischen Raumwärmebedarf (FFE, 2013)

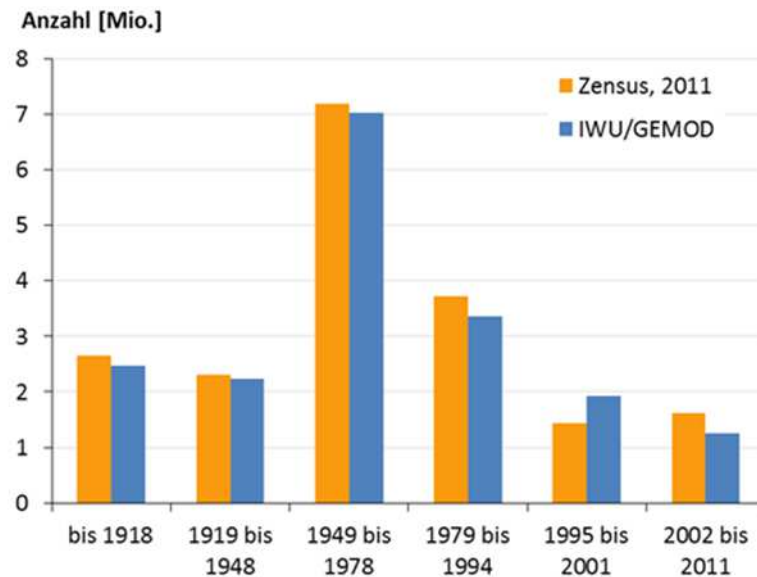
Den Berechnungen der Wohnflächenentwicklung in GEMOD liegen die Wohnflächen nach (IWU, 2013) und (Zensus, 2011) zugrunde, die sich beide auf die DIN 277 stützen. Wenn der spezifische Energieverbrauch in kWh/m<sup>2</sup>a ausgegeben wird, bezieht er sich wegen der Vergleichbarkeit mit der EnEV stets auf die Nutzfläche nach EnEV.

#### Aktualisierung der Datensätze (Bauteilflächen, Volumen, BAK)

Das Mengengerüst in GEMOD basiert auf der Typologie von (Tabula, 2012) und (IWU, 2013). In (IWU, 2013) stellen die Gebäudetypen jeweils typische Vertreter für ihr Baujahr und ihre Gebäudegröße dar. Im Rahmen der hier vorliegenden Studie werden die Größen dieser Typgebäude so umgerechnet, dass die gesamte Wohnfläche des Bestandes mit (Zensus, 2011) übereinstimmt. Dabei wurden neben den Wohnflächen der Typgebäude auch ihre Bauteilflächen und Volumina entsprechend angepasst.

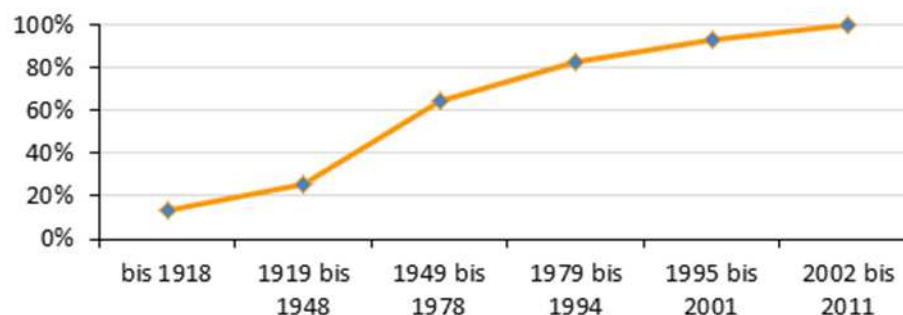
##### 3.1.1.2 Ist-Zustand

In diesem Unterkapitel werden die Wohngebäude quantifiziert. Der Gesamtbestand umfasst 18,24 Mio. (IWU) bzw. 18,93 Mio. (Zensus) Wohngebäude in Deutschland. Diese verteilen sich wie nachfolgend gezeigt auf die hier grob zusammengefassten Baualtersklassen bis 1918, 1919 bis 1948 (Ende des 1. Weltkrieges bis kurz nach Ende des 2. Weltkrieges), 1949 bis 1978 (Nachkriegszeit bis zur Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung), 1979 bis 1994 (erste bis dritte Wärmeschutzverordnung), 1995 bis 2001 (Phase der WSchV95 bis zur EnEV) sowie 2002 bis 2011 (EnEV bis Bezugsstartjahr). Die Ergebnisse von IWU und Zensus variieren leicht. So beziehen sich die Daten des Zensus auf „Gebäude mit Wohnraum“ (mind. 50 % Wohnnutzung), hingegen analysiert IWU „Wohngebäude“, was die leichten Differenzen mit verursachen kann. Auch die Bezugsjahre variieren leicht. Aufgrund der detaillierteren Datenlage von IWU wurden die dort angegebenen Gebäudeanzahlen auch in der hier vorliegenden Studie übernommen.



**Abbildung 3.2: Verteilung der Baualtersklassen des Wohngebäudebestandes im Jahr 2011**

Das Diagramm veranschaulicht den Wiederaufbau nach dem 2. Weltkrieg, der bis heute den deutschen Gebäudebestand prägt. Motiviert durch die überaus hohe Wohnungsnot in den 50er und 60er Jahren wurden im Zeitraum 1949 bis 1978 so viele Gebäude errichtet, dass sie noch heute rund 35 % des Gesamtbestandes ausmachen. Besonders eindrücklich werden obige Zahlen, wenn man die heute noch in Nutzung befindlichen Gebäude vergangener Dekaden kumuliert und auf den heutigen Gesamtbestand von 18,24 Mio. bezieht.



**Abbildung 3.3: Prozentuale Darstellung der kumulierten Baualtersklassenvertreter (im Jahr 2011): 93 % aller Wohngebäude in 2011 wurden vor 2001 errichtet.**

Rund 93 % der in 2011 genutzten Wohngebäude wurden vor der Energieeinspar-Verordnung von 2002 bzw. 61 % wurden vor der ersten Wärmeschutzverordnung von 1978 errichtet. Bezogen auf die einzelnen Gebäudetypen sind dies 63 % der Einfamilienhäuser (EFH), 60 % der Reihenhäuser (RH), 74 % der Mehrfamilienhäuser (MFH) und 66 % der großen Mehrfamilienhäuser (GMH), die vor 1978 errichtet wurden.

Die folgende Abbildung zeigt die von IWU übernommene Verteilung der Wohngebäude auf die einzelnen Gebäudetypen. In dieser Darstellung weisen die Einfamilienhäuser eine klare Dominanz auf, diese machen rund 55 % des gesamten Wohngebäudebestandes aus.

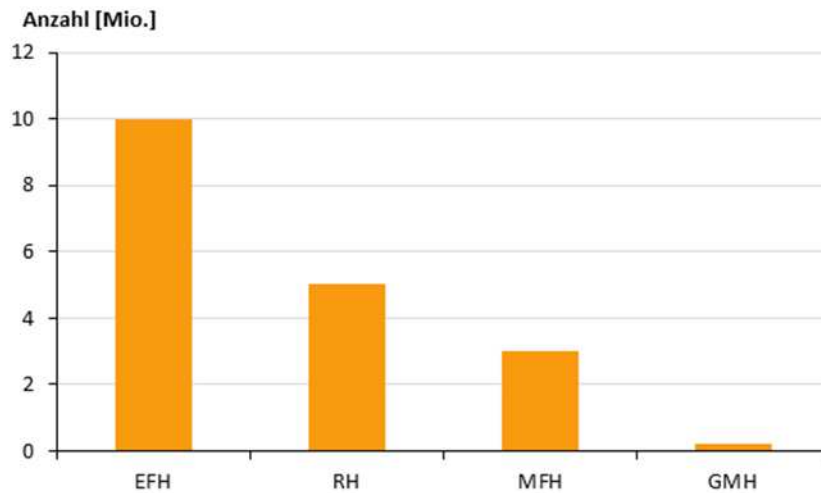


Abbildung 3.4: Verteilung der Wohngebäude (IWU) auf die verschiedenen Wohngebäudetypen im Jahr 2011

Obige Aussage relativiert sich naturgemäß, wenn die Aufteilung der Wohnfläche auf die Gebäudetypen analysiert wird. Dennoch ist sie von gewisser Bedeutung, da das Diagramm gute Rückschlüsse auf die Akteure zulässt. Einerseits kann man davon ausgehen, dass es sich bei den Einfamilienhaus-Besitzern um einen vergleichsweise hohen Bevölkerungsanteil handelt, dessen Einzelindividuen tendenziell eher motiviert sein werden, Dämmmaßnahmen zu ergreifen. Andererseits ist anzunehmen, dass es sich hier in der Regel um selbstgenutztes Eigentum handelt, was die bekannte Vermieter-Mieter-Problematik für diesen Sektor stark vereinfachen dürfte. Aber auch die nachfolgende Darstellung, die die Wohnflächen der Gebäudetypen zeigt, macht die immer noch sichtbare Dominanz der Einfamilienhäuser mit 42 % deutlich.

Auch die Darstellung der mittleren Flächen der thermischen Hülle der einzelnen Gebäudetypen bestätigt die Dominanz der Einfamilienhäuser an der gesamten wärmeabgebenden Fläche. Die Einfamilienhäuser verfügen über 48 % der Summe aller thermischen Hüllflächen des Wohnsektors.

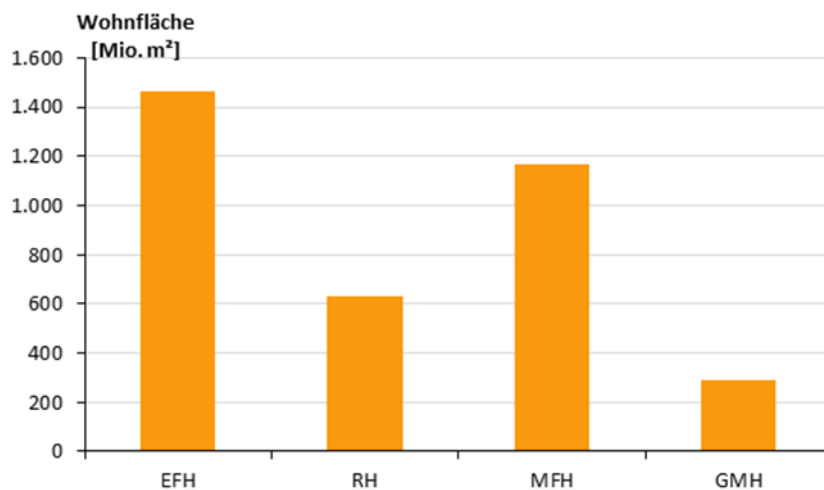


Abbildung 3.5: Verteilung der Wohnflächen auf die verschiedenen Gebäudetypen im Jahr 2011

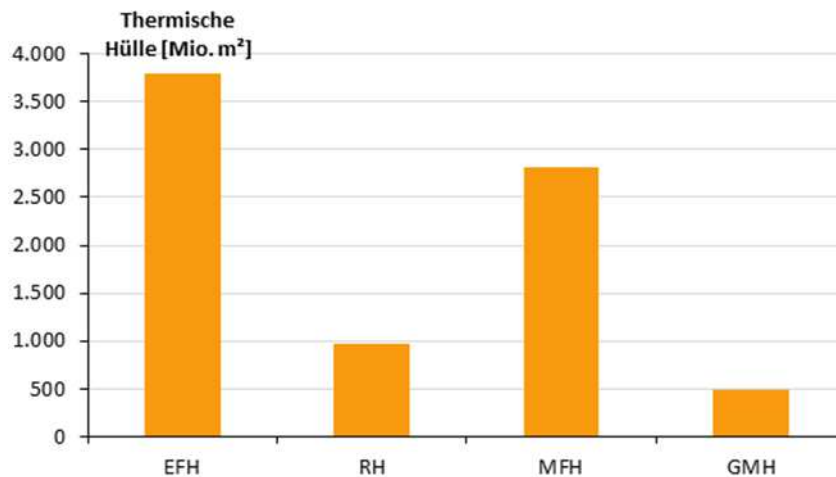


Abbildung 3.6: Summe der Flächen der thermischen Hüllen der jeweiligen Gebäudetypen im Jahr 2011

Bezieht man die Einzelflächen der hier untersuchten vier zentralen Bauteile (diese inkludieren weitere nach sinnvollen Gesichtspunkten definierte Bauteile; so wurden z.B. den Außenwänden Bauteile mit Außenluftkontakt von unten zugeordnet) auf die vollständige Fläche aller thermischen Einzelhüllen der 18,24 Mio. Wohngebäude, so ergibt sich die in Abbildung 3.7 gezeigte Verteilung der Einzelflächen. Auch hier werden die besonderen Flächenanteile der Ein- und Mehrfamilienhäuser sichtbar.

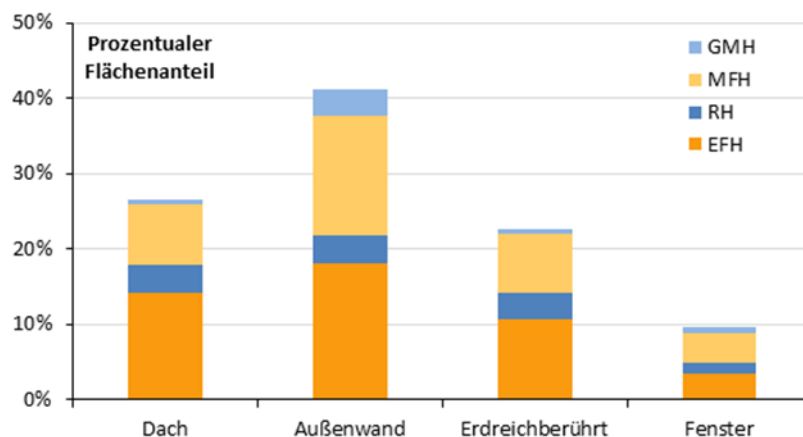


Abbildung 3.7: Prozentuale Verteilung der gesamten thermischen Hüllfläche auf die Bauteile Dach, Außenwand, erdbreichberührte Bauteile und Fenster im Jahr 2011, zusätzlich Differenzierung zwischen den Gebäudetypen

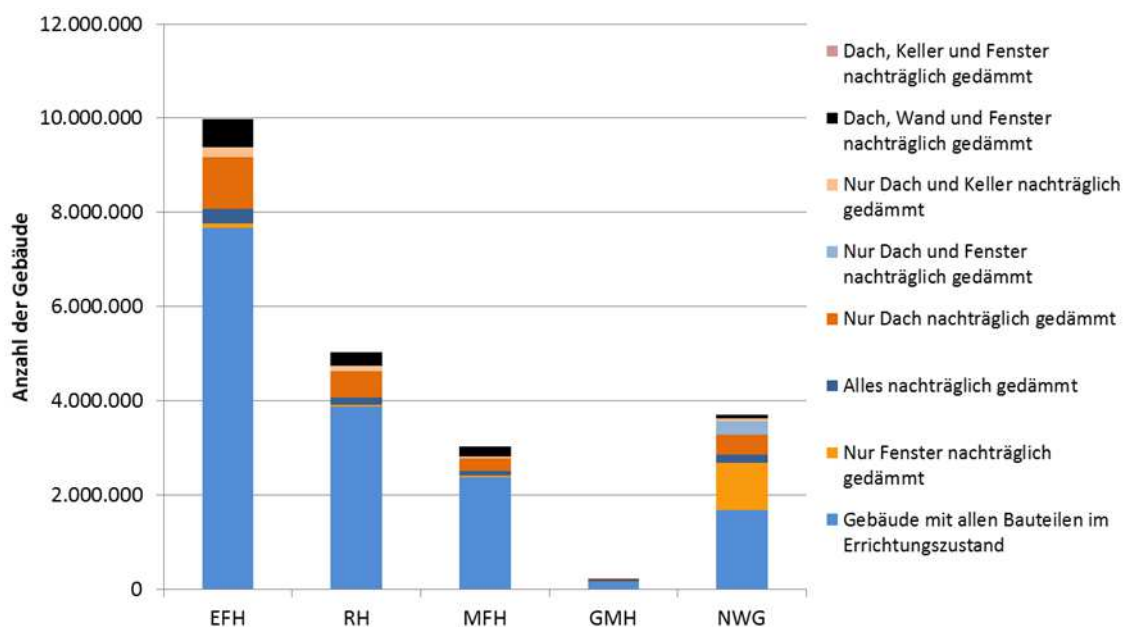
Neben der rein mengenmäßigen Beschreibung des Ausgangszustandes im Jahr 2011 bedarf es weitergehender Annahmen zum energetischen Zustand der einzelnen Bauteile der thermischen Hüllen. Grundsätzlich kann sicherlich davon ausgegangen werden, dass der energetische Zustand von Bauteilen entweder den zum Errichtungszeitpunkt üblichen Bauweisen (vor 1978) bzw. ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen (ab 1978) oder aber den zum ggf. erfolgten Sanierungszeitpunkt üblichen Bauweisen entspricht. Daher ist es von großem Interesse, ob - und wenn ja wann - ein Bauteil bereits modernisiert wurde. Der diesbezügliche Wissensstand fußt im Wesentlichen auf (IWU/BEI, 2010), wo im Rahmen empirischer Analysen umfangreiche Daten erhoben wurden. Die Verteilung der nachträglich gedämmten Bauteile und deren Kombinationen wurde in einer eigenen Untersuchung mit den zur Verfügung gestellten Daten von (IWU/BEI, 2010)

berechnet. Die nachfolgenden Grafiken unterscheiden verschiedene „Dämmzustände“ der Gebäude. Es sind dies:

- Dach, Außenwände und Fenster wurden bereits energetisch saniert
- nur Dach und Keller wurden bereits energetisch saniert
- nur das Dach wurde bereits energetisch saniert
- Dach, Keller, Außenwände und Fenster wurden bereits energetisch saniert (Vollsanierung)
- nur Fenster wurden bereits energetisch saniert
- Gebäude ist in allen Bauteilen noch im Errichtungszustand

Abbildung 3.8 zeigt in Analogie zu oben wiederum die Anzahl der einzelnen Gebäudetypen, hier ergänzt um die Anzahl der Nichtwohngebäude. Zusätzlich wurden hier die zugrunde gelegten Sanierungszustände aufgenommen. Deutlich sichtbar sind die erstaunlich hohen Anteile der Gebäude im Errichtungszustand, die bei den Einfamilienhäusern rund 77 % ausmachen. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass es sich um eine Darstellung über alle Baualtersklassen handelt, die neben den alten Gebäuden auch die in den letzten Jahren errichteten Gebäuden enthält, die naturgemäß noch nicht saniert wurden.

Die weitere Differenzierung der unsanierten Gebäude beispielsweise in die beiden Altersklassen bis 1978 und nach 1978, ist aufgrund der Datenlage nicht ohne weiteres möglich. Zwar ist es mit den zur Verfügung stehenden Daten möglich, die jeweilige Anzahl (oder den Anteil) alter Gebäude zu bestimmen (beispielsweise gilt für Einfamilienhäuser, dass 63 % vor 1978 errichtet wurden). Unklar bleibt aber, ob tatsächlich ausschließlich die älteren Gebäude energetisch saniert wurden, oder ob auch schon Gebäude der 80er oder 90er Jahre in die Sanierungszyklen aufgenommen wurden. Anzunehmen ist sicherlich, dass vornehmlich die älteren Gebäude energetisch saniert wurden.

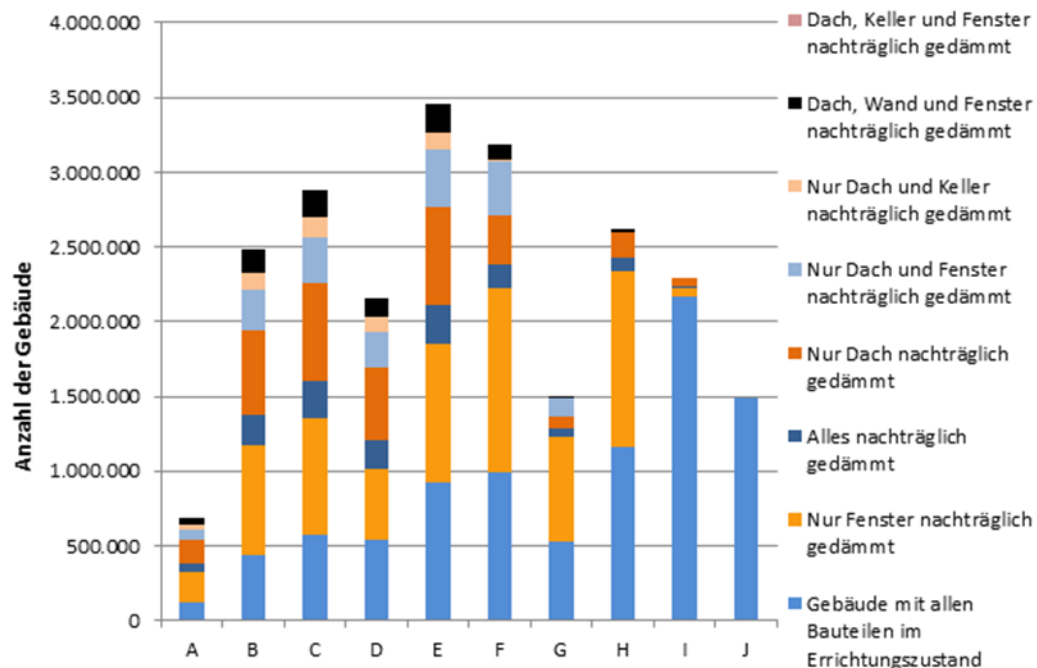


**Abbildung 3.8: Qualitative Darstellung der Sanierungszustände der Bauteile sortiert nach Gebäudetypen für das Jahr 2011; Zahlenwerte auf Basis eigener Analysen und (IWU/BEI, 2010)**

Im Extremfall sind ausschließlich die älteren Gebäude saniert worden. Dann gilt, dass abzüglich der 23 % der Einfamilienhäuser, an denen schon mindestens eine Sanierungsmaßnahme stattfand, sich noch 40 % aller Einfamilienhäuser, die vor 1978 errichtet wurden, im Errichtungszustand befinden.

Die entsprechenden Werte für die weiteren Wohngebäudetypen betragen 37 % für RH, 53 % für MFH und 45 % für GMH.

Die zuvor beschriebenen Überlegungen spiegeln sich ebenfalls in Abbildung 3.9 wider. Hier ist der Gebäudebestand nach Baualtersklassen und den jeweiligen Sanierungsgraden sortiert. Erwartungsgemäß wird sichtbar, dass die neueren Gebäude (noch) nicht saniert wurden, die älteren dagegen umso mehr.



**Abbildung 3.9: Qualitative Darstellung der Sanierungszustände der Bauteile sortiert nach Baualtersklassen (von A: vor 1918 bis J: bis 2011) für das Jahr 2011; Zahlenwerte auf Basis eigener Analysen und (IWU/BEI, 2010)**

### 3.1.1.3 Entwicklung der Wohnflächen bis 2050 – Herangehensweise

Grundlage der soziodemografischen Betrachtung ist die Bevölkerungsvorausberechnung durch das Statistische Bundesamt (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014) sowie eine Studie zur bewohnten Gesamtwohnfläche der Prognos AG (Prognos et al., 2014).

Die Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamts unterscheidet zwischen 12 unterschiedlichen Szenarien, welche durch verschiedene Annahmen zur Geburtenhäufigkeit, der Lebenserwartung und dem Wanderungssaldo gebildet werden. „mittlere“ Bevölkerung/Untergrenze: Konstante Geburtenhäufigkeit, durchschnittliche Lebenserwartung und geringes Wanderungssaldo

Für die Betrachtung innerhalb dieser Studie werden vier Szenarien berücksichtigt:

- „mittlere“ Bevölkerung/Obergrenze: Konstante Geburtenhäufigkeit, durchschnittliche Lebenserwartung und hohes Wanderungssaldo
- „relativ junge“ Bevölkerung: hohe Geburtenhäufigkeit, durchschnittliche Lebenserwartung und hohes Wanderungssaldo
- „relativ alte“ Bevölkerung: niedrige Geburtenhäufigkeit, durchschnittliche Lebenserwartung und hohes Wanderungssaldo
- 

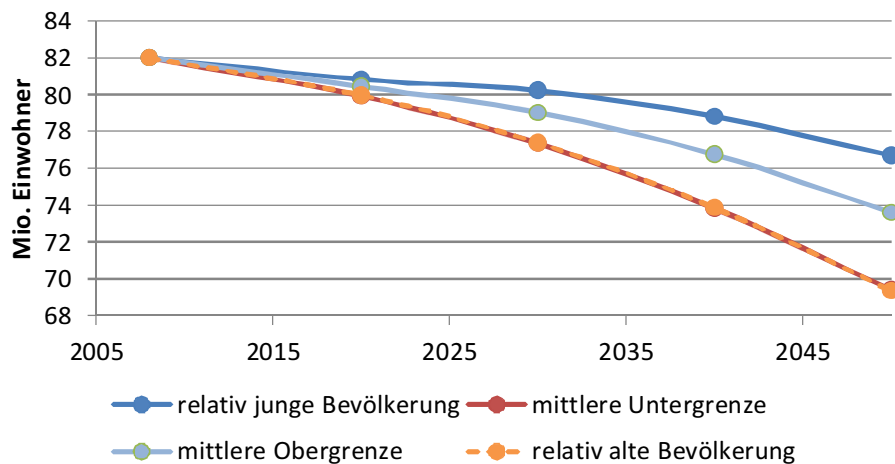


Abbildung 3.10: Bevölkerungsprognose des Statistischen Bundesamtes (destatis, 2009)

| Szenario                  |      | Einwohner in 1000 |        |        |        |        |
|---------------------------|------|-------------------|--------|--------|--------|--------|
|                           |      | 2008              | 2020   | 2030   | 2040   | 2050   |
| relativ junge Bevölkerung | 3-W2 | 82.002            | 80.831 | 80.227 | 78.805 | 76.703 |
| mittlere Untergrenze      | 1-W1 | 82.002            | 79.914 | 77.350 | 73.829 | 69.412 |
| mittlere Obergrenze       | 1-W2 | 82.002            | 80.437 | 79.025 | 76.757 | 73.608 |
| relativ alte Bevölkerung  | 6-W1 | 82.002            | 79.963 | 77.382 | 73.868 | 69.353 |

Tabelle 3.3: Bevölkerungsprognose des Statistischen Bundesamtes (destatis, 2009)

Die Vorausberechnungen der Einwohnerzahlen für das Jahr 2050 bewegen sich zwischen 69,4 und 76,7 Millionen. Der höhere Wert entstammt dem Szenario, welches eine „relativ junge“ Bevölkerung prognostiziert, der kleinere Wert unterstellt eine „relativ alte“ Bevölkerung. Die Kurve der „mittleren“ Untergrenze ist deckungsgleich mit der Kurve der „relativ alten“ Bevölkerung. Die „mittlere“ Obergrenze bewegt sich mit 73,6 Millionen im durchschnittlichen Bereich.

Die vergleichende Betrachtung der Gesamtwohnfläche aus „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ (Prognos et al., 2014) und den Erkenntnissen des (Mikrozensus, 2010) ergab leichte Differenzen, die durch die neue Erhebung im (Zensus, 2011) verursacht wurden. Auch die Leerstandsquoten fanden Berücksichtigung, so dass sich im Ergebnis eine Aussage über die Entwicklung der bewohnten und beheizten Gesamtwohnfläche ergibt, wie sie in folgender Grafik zu sehen ist.

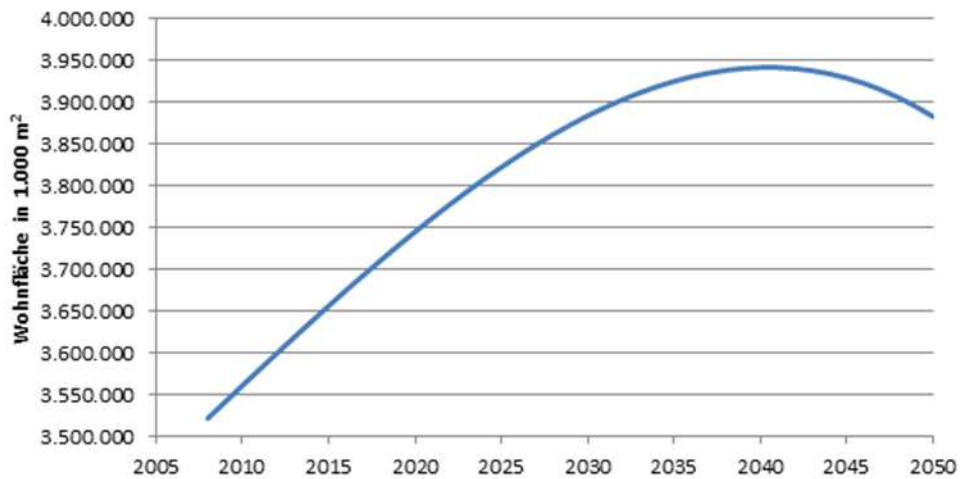


Abbildung 3.11: Prognose der bewohnten Gesamtwohnfläche in Wohn- und Nichtwohngebäuden durch Zusammenführung der Erkenntnisse aus (Prognos et al., 2014) und (Zensus, 2011)

Die Werte steigen bis zum Jahr 2040 an und fallen danach langsam wieder ab. Die bewohnte Gesamtwohnfläche im Jahr 2050 liegt hierbei mit 3,65 Milliarden Quadratmetern um zirka 350 Millionen oberhalb des Wertes von 2008.

Dass trotz anhaltendem Bevölkerungsrückgang in den nächsten Jahren ein deutlicher Anstieg der Gesamtwohnfläche prognostiziert wird, folgt aus der nach wie vor zunehmenden Pro-Kopf-Wohnfläche. Ausgehend von einem heutigen Wert von knapp 43 m²/Einwohnern wird dieser in allen Szenarien auf über 50 m²/Einwohner, ja sogar im Szenario „relativ alte“ Bevölkerung auf bis zu 56 m²/Einwohner steigen.

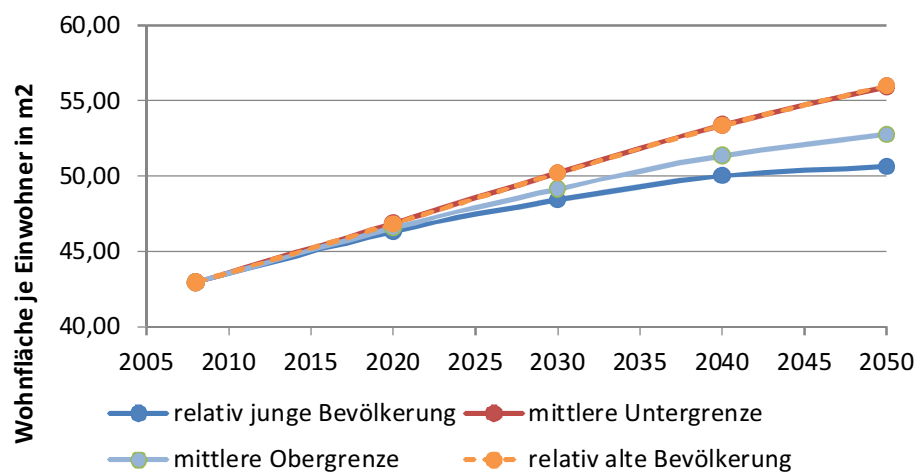
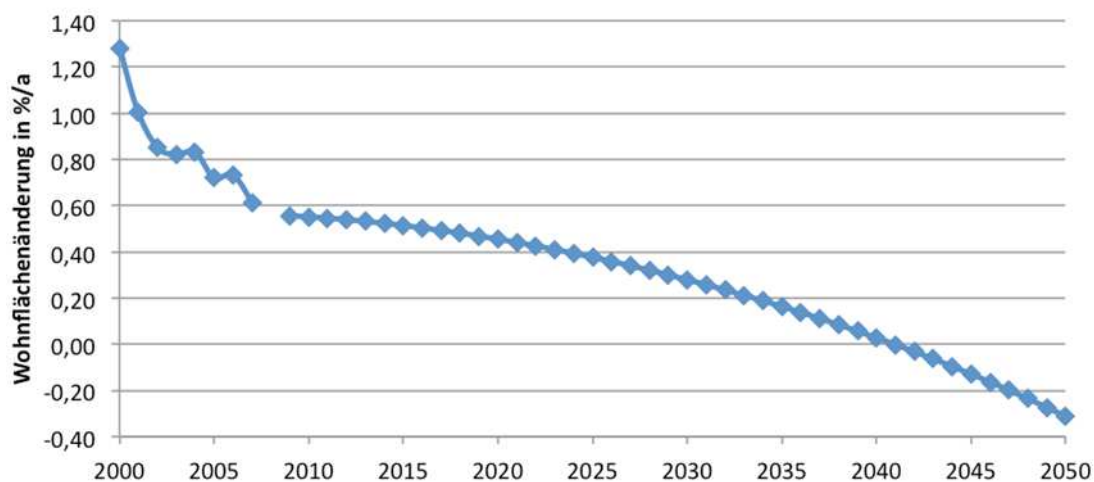


Abbildung 3.12: Entwicklung der Pro-Kopf-Wohnfläche für die kommenden Dekaden nach (Prognos et al., 2014) und (Zensus, 2011)

|                                     | Szenario                  |      | 2008      | 2020      | 2030      | 2040      | 2050      |
|-------------------------------------|---------------------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Wohnfläche in m <sup>2</sup>        |                           |      | 3.521.910 | 3.745.295 | 3.884.133 | 3.941.881 | 3.882.847 |
| WF / Einwohner<br>in m <sup>2</sup> | relativ junge Bevölkerung | 3-W2 | 42,95     | 46,33     | 48,41     | 50,02     | 50,62     |
|                                     | mittlere Untergrenze      | 1-W1 | 42,95     | 46,87     | 50,22     | 53,39     | 55,94     |
|                                     | mittlere Obergrenze       | 1-W2 | 42,95     | 46,56     | 49,15     | 51,36     | 52,75     |
|                                     | relativ alte Bevölkerung  | 6-W1 | 42,95     | 46,84     | 50,19     | 53,36     | 55,99     |

**Tabelle 3.4:** Entwicklung der Gesamtwohnfläche sowie der Pro-Kopf-Wohnfläche für die kommenden Dekaden nach (Prognos et al., 2014) und (Zensus, 2011)

Zwar nimmt die Gesamtwohnfläche bis zum Jahr 2040 durchaus noch zu. Betrachtet man jedoch die jährlichen Zuwachsraten der Gesamtwohnfläche, so nimmt diese auch heute schon ab. Die resultierende jährliche Wohnflächenveränderung (in %/a) ist das Resultat der Marktanpassungen, die durch Einwohneranzahl und Pro-Kopf-Fläche determiniert werden. Positive Wohnflächenveränderungen bedeuten, dass die Neubaurate größer als die Abrissrate ist, bei negativen Wohnflächenveränderungen übersteigt der Abriss zahlenmäßig die Neubauten.



**Abbildung 3.13:** Entwicklung der jährlichen Gesamtwohnfläche als Resultat von Neubau- und Abrissaktivitäten

### 3.1.1.4 Entwicklung der Wohnflächen bis 2050

Die oben beschriebenen statistischen Auswertungen stellen den Rahmen für die Gesamtentwicklung der bewohnten Flächen. Relativ unklar dagegen ist deren Einfluss auf die Entwicklung des Gebäudebestandes, der in erster Linie von den zukünftigen Abriss-, Neubau- und auch Leerstandsquoten geprägt ist. An dieser Stelle sei angemerkt, dass Gebäudeleerstand in dieser Analyse wie Abriss behandelt wird. Ein leerstehendes, unbewohntes und damit auch unbeheiztes Gebäude stellt im Sinne des Gesamtenergiebedarfs des Bestandes ein quasi nicht vorhandenes Gebäude dar, so dass diese Gebäude im Model den abgerissenen Gebäuden gleichgesetzt werden. Die zukünftige Zusammensetzung des Gebäudebestandes fußt sicherlich auf den oben beschriebenen bisherigen Trends.

Dennoch müssten zur exakten Abbildung der Entwicklung eine Vielzahl externer Faktoren berücksichtigt werden, die hier nicht Gegenstand der Untersuchungen sein können. Diese sind:

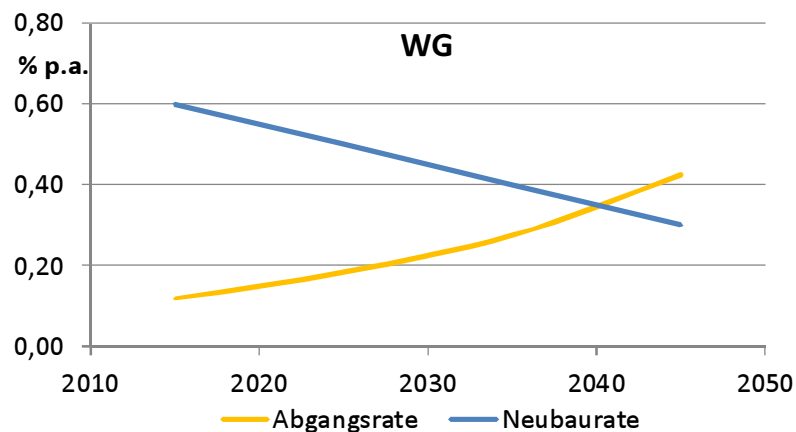
- **Entwicklung der Baukonjunktur**  
Eine hohe Bautätigkeit und das daraus resultierende hohe Angebot an Neubauten führt direkt zu einer erhöhten Abrissrate uninteressant gewordener Altbauten. Im Resultat kann die Gesamtwohnfläche gleich bleiben, aber der Bestand verjüngt sich, was mit einer energetischen Verbesserung einhergeht. Die Entwicklung der Baukonjunktur hängt u.a. von der volkswirtschaftlichen, ja auch von der weltwirtschaftlichen Lage ab.
- **Attraktivität des ländlichen Raumes**  
Unabhängig von der insgesamt zur Verfügung stehenden Wohnfläche kann ein Bedarf an Wohnfläche mit einer anderen örtlichen Verteilung entstehen. Die in Deutschland sehr unterschiedliche, regionalen und temporären Schwankungen unterliegende Entwicklung der Land- oder Stadtflucht führt zu variierenden Quoten für Leerstand, Abriss und Neubau. Das hier verwendete Gebäudemodell kann regionale Differenzierungen im derzeitigen Ausbaustand noch nicht berücksichtigen.
- **Nord/Süd-Gefälle der Einkommenssituationen in Deutschland**  
Unterschiedliche Einkommenssituationen können bundesweite Migrationstendenzen beeinflussen. Diese können in den Abzugsgebieten zu verstärktem Leerstand/Abriss sowie in den Soggebieten zu einem Verjüngungsschub des Gebäudebestandes führen.
- **Maß der Besinnung auf konservative (bewahrende) Werte**  
Seit den 70er Jahren hat sich gesellschaftsweit insbesondere bezüglich der vor dem 2. Weltkrieg errichteten Gebäude ein bis heute anhaltender Wunsch nach Erhaltung und Grundsanierung oder auch ggf. Restaurierung entwickelt. Aus heutiger Sicht kaum abschätzbar ist aber, inwieweit sich diese konservierende Tendenz in den kommenden Dekaden auch auf die Bauten der 50er, 60er, 70er oder 80er Jahre ausweiten wird oder ob sie bevorzugt abgerissen werden.
- **Entwicklung der Energiekosten**  
Sicherlich haben auch die Energiekosten bzw. die ggf. zukünftig mit dem Energieverbrauch einhergehenden Zusatzkosten wie eine CO<sub>2</sub>-Abgabe oder vergleichbare Malussysteme einen Einfluss auf die Bautätigkeit, da der Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen Alt- und Neubauten bei hohen Energiekosten tendenziell vermutlich eher zu Gunsten der Neubauten ausfallen wird; dies vielleicht sogar in Verbindung mit einer Tendenz zur kompakten, verdichteten Bauweise, was die Anzahl der (neuen) Mehrfamilienhäuser steigen ließe.

Veranlasst durch die oben genannten Unsicherheiten werden in der hier vorliegenden Analyse nur die Auswirkungen oberer und unterer Grenzzannahmen der Gebäudeentwicklungen auf den Gesamtenergiebedarf (siehe Kapitel 0) gezeigt, anstatt die Entwicklungen selbst im Detail zu prognostizieren.

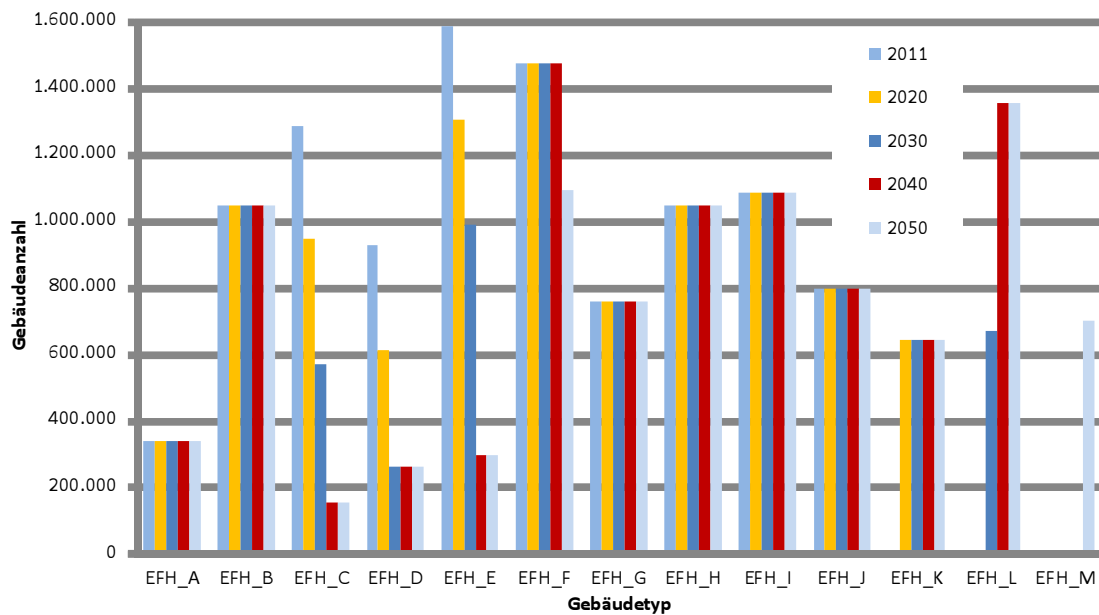
Die (derzeit möglichen) Grenzzannahmen beziehen sich auf

- die Neubaurate in den einzelnen Dekaden und damit auch auf die Abgangsraten, die sich zusammen mit der Neubaurate aus den notwendigen Wohnflächen ergeben (vgl. Abbildung 3.14)
- die Verteilung der Abgangsrate auf die einzelnen Baualtersklassen (bestimmte Baualtersklassen können bevorzugt abgerissen werden) wie z.B. in Abbildung 3.15 dargestellt.
- die Verteilung der Neubaurate auf EFH, RH, MFH oder GMH

Die nachfolgenden Diagramme zeigen exemplarisch die Konsequenzen dieser Einstellmöglichkeiten, die die Entwicklung der Gebäudeanzahlen über die Zeit abbilden. Die eingesetzten Zahlenwerte sind dabei exemplarisch und dienen in erster Linie der Dokumentation des Vorgehens.



**Abbildung 3.14: Variierende Abgangsraten bei vorgegebener Neubaurate. Die Abgangsrate ergibt sich aus dem jeweiligen Gesamtflächenbedarf der Bevölkerung. Im Resultat finden sich bei hoher Neubaurate in 2050 mehr energieeffiziente, neue Gebäude und weniger alte, oftmals ungedämmte Gebäude im Bestand. Bei den im Bestand verbleibenden Altbauten wird gleichzeitig von einer zunehmenden „Durchsanierung“ ausgegangen.**



**Abbildung 3.15: Beispielhafte Darstellung der EFH-Entwicklung bei einem ausschließlichen Abriss von der Baualtersklassen C, D und E. Deutlich sichtbar wird der geringe Einfluss der Neubautätigkeit in den Baualtersklassen nach 2012.**

Die Bestimmung der gesamten (Transmissions-)Wärmeverluste im sich über die Dekaden wandelnden Wohngebäudebestand erfordert neben den absoluten Gebäudeanzahlen auch die Kenntnis der U-Werte. Im Kontext dieser Ausarbeitung wird jedoch unterstellt, dass sich bis 2050 die U-Werte der bis dahin sanierten Altbauten den U-Werten des Neubaubereichs angenähert haben bzw. größtenteils identisch sein werden. Nachfolgend soll daher nur die unter variierenden Abriss- und Neubautätigkeiten resultierende Gesamtfläche der thermischen Hüllen gezeigt werden. Dabei wurden alle Werte mit dem Temperaturkorrekturfaktor  $F_x$  multipliziert, was sich hier nur bei den erdreichberührten Bauteilen und den obersten Geschossdecken auswirkt. Dargestellt ist die Neubaurate für Wohngebäude. In Ermangelung belastbarer Daten wurde die Neubaurate der Nichtwohngebäude zweimal so hoch wie die der Wohngebäude angesetzt, da hier kürzere Nutzungszyklen unterstellt werden.

| Thermische Hülle des Gesamtbestandes in Mio. m² (F <sub>x</sub> berücksichtigt) |                       |        |                  |                |                |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------|------------------|----------------|----------------|
| Abriss                                                                          | Neubau                | 2011   | 2050             |                |                |
|                                                                                 |                       |        | Neubaurate 0,5 % | Neubaurate 1 % | Neubaurate 2 % |
| real angenommen*                                                                | Geb.typen einheitlich | 13.255 | 14.679           | 14.985         | 18.345         |
| real angenommen*                                                                | nur kleine Gebäude    |        | 14.518           | 14.661         | 17.698         |
| real angenommen*                                                                | nur große Gebäude     |        | 14.841           | 15.308         | 18.992         |
| alle BAK einheitlich                                                            | Geb.typen einheitlich |        | 14.726           | 15.122         | 17.570         |
| nur BAK C-D-E                                                                   | Geb.typen einheitlich |        | 14.559           | 14.863         | 20.856         |
| alle BAK einheitlich                                                            | real angenommen*      |        | 14.675           | 15.019         | 17.363         |
| nur BAK C-D-E                                                                   | real angenommen*      |        | 14.507           | 14.757         | 20.749         |
| real angenommen*                                                                |                       |        |                  | 14.626         |                |

\* Abriss glockenverteilt mit Maximum 50er/60er Jahre, Neubau EFH/RH doppelte Bauaktivität ggü. MFH/GMH, Neubau NWG=2\*WG

**Tabelle 3.5: Entwicklung der Gesamtfläche der thermischen Hülle aller Gebäude (WG und NWG) unter den variierenden Randbedingungen Neubautätigkeit, Verteilung des Neubaus auf Gebäudetypen und Verteilung des Abrisses auf Gebäudealter. Die gesamte Wohn- bzw. Nutzfläche bleibt dabei für 2050 konstant und entspricht dem zuvor in hergeleiteten Wert.**

Interessanterweise ist der Einfluss der Abriss- und Neubautätigkeit auf die resultierenden wirksamen thermischen Hüllen in 2050 mit einer Schwankung von maximal 800 Mio. m<sup>2</sup> (entspricht ca. 5 %) relativ gering. Die für die Modellrechnungen in Kap. 5 gewählte Konfiguration mit einer glockenförmigen Abrissrate mit einem Maximum bei den Gebäuden der 50er und 60er Jahren und einem verstärkten Zubau von kleineren Wohngebäuden liegt dabei gut im Mittelfeld der in der Tabelle unterstellten Extremfälle. Lediglich bei einer (eher unrealistischen) Neubaurate in Höhe von 2 % (Nichtwohngebäude 4 %) ergeben sich nicht weiter zu vernachlässigende Einflüsse der untersuchten Randbedingungen. Hier können sich Situationen einstellen, bei denen die Fläche der thermischen Hülle um rund 30 % höher liegt als der hier angenommene Wert.

### 3.1.2 Nichtwohngebäude

#### 3.1.2.1 Ist-Zustand

Die korrekte Erfassung und energetische Beschreibung der Nichtwohngebäude stellt aufgrund ihrer vielseitigen Nutzung eine bislang nicht eindeutig gelöste Herausforderung dar. Diese Gebäude stellen mit einem Anteil von rund 20 % einen nicht unerheblichen Part des Gebäudebestandes dar. Bereits eine Reihe von Studien (s.u.) hatte es sich zum Ziel gesetzt, die Nichtwohngebäude in Gänze zu erfassen, jedoch erweisen sich immer wieder sowohl die Verschiedenartigkeit der Gebäude und ihrer Nutzung, als auch die Informationsbereitschaft der (Firmen-)Eigentümer als Hürden bei der statistischen Erfassung der Daten.

Der Bestand der Nichtwohngebäude wird u.a. auf Grundlage der Studien „Typologie beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland“ (Leibnitz-Institut, 2011) im Auftrag des BBSR und „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010“ (Fraunhofer ISI et al., 2013) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) abgeleitet. Wie weiter unten gezeigt wird, bieten diese - aber auch weitere renommierte - Studien keine umfassende und vollständige Darstellung der deutschen Nichtwohngebäude im hier benötigten Detaillierungsgrad. Daher werden die Ergebnisse dieser Studien im Folgenden identifiziert und miteinander verschnitten, um so eine eigene Gebäudetypologie – im Sinne einer „Meta-Typologie“ – zu erstellen, die möglichst viele der zur Verfügung stehenden Daten und Quellen nutzt. Die hier erstellte Meta-Typologie teilt die Nichtwohngebäude über geeignete Gruppen- und Untergruppen in einzelne Typen und Nutzungsstrukturen auf. Die folgenden grundlegenden Ansatzpunkte werden bei der Analyse der vorhandenen Studien untersucht und bewertet:

- Datengrundlage  
Analyse der Bestände hinsichtlich Gebäudetypen, Anzahlen, Flächen und Volumina
- Kohortenbildung  
Differenzierung hinsichtlich Nutzung, Kategorie, Baualtersklasse, Kubatur, Größe
- Wärmefluss  
Energetische Zustände von Gebäuden oder Bauteilen und Solltemperaturen sowie Soll-Luftwechselraten, Ausstattung mit Wärmerückgewinnungsanlagen
- Struktur der Typologie
- Zweckmäßigkeit der Darstellung der komplexen Daten

Bei der Auswahl der Quellen ging es prinzipiell darum, möglichst viele Daten für ein Mengengerüst des Bestands von Nichtwohngebäuden zu finden. Neben den hier aufgeführten Quellen wurden noch weitere Studien ausgewertet, sie enthielten allerdings nicht ausreichend kompatible Informationen und werden hier daher nicht weiter verfolgt.

DIN V 18599-10 teilt die Nichtwohngebäude in typische Nutzungskategorien ein und bietet Regeln zur Bestimmung der Gesamtenergieeffizienz. In diesem Rahmen bietet die Norm eine Sammlung von Nutzungsrandbedingungen für typische Nichtwohnnutzungen. Diese wurden für die Berechnung zu Grunde gelegt. Sie gibt keine Auskünfte über Mengengerüste des Bestandes.

(Leibnitz-Institut, 2011) beschreibt den Aufbau einer Typologie basierend auf funktionalen Kriterien. Darauf aufbauend entwickelt (Leibnitz-Institut, 2013) ein weiteres differenziertes Mengengerüst mit Unterstützung der geografischen Informationsdienste „Automatisierte Liegenschaftskarte“ (ALK) und „Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem“ (ALKIS). Für den sehr heterogenen Mengenbestand der Nichtwohngebäude wird auch hier ein Mengengerüst abgeschätzt. Eine Unterteilung erfolgt in acht Nutzungsgruppen. Daten und Informationen wurden mit Hilfe der Geoinformationsdienste ALK und ALKIS erstellt, die für die Bundesländer Baden-Württemberg, Brandenburg, Bremen und Sachsen-Anhalt bereits Daten vorhalten. Die in ALK und ALKIS unterschiedenen Nutzungsarten wurden auf die vom (Fraunhofer ISI et al., 2013) entwickelte Typologie übertragen. Damit wurden Abschätzungen getroffen über die Gebäudezahl, die Gebäudegrundflächen und die Nutzungsflächen, wobei in der Publikation nur beheizte Nichtwohngebäude berücksichtigt wurden. Mit Hilfe von ALK und ALKIS wurden die Hausumringe und Lagekoordinaten festgestellt. Diese Daten ergaben einen Flächenbestand der Nichtwohngebäude, der in einem Schätzverfahren auf Deutschland hochgerechnet werden konnte. Wohngebäude mit Mischnutzungen zählen, wegen der angenommen Mehrheit an Wohnen, zu den Wohngebäuden und finden daher bei den Nichtwohngebäuden keine Berücksichtigung.

In (Fraunhofer ISI et al., 2013) wird der Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010 ermittelt. Die Daten wurden durch Interviews mit ausgewählten Unternehmen erhoben. Die Analyse erfasst Verbrauchs- und Strukturdaten im GHD-Sektor nach Energieträgern, Verbrauchergruppen, Verwendungszwecken sowie nach Art der jeweiligen Raumheizungs- und Warmwasserversorgungssysteme. Dadurch kann der Endenergieverbrauch nach Energieträgern bestimmt werden. Der gesamte GHD-Sektor wird in 14 Gruppen unterteilt und nach Wirtschaftszweigen sortiert. Mit Hilfe von Fragebögen, Vorortbegehungen und Tiefeninterviews wurden verschiedene Unternehmen bezüglich ihrer vorhandenen Gebäudestruktur zur betrieblichen Größe, Anzahl der Mitarbeiter/Parkplätze, Stromverbrauch, Brennstoffeinsatz oder Anlagenarten befragt und der Endenergiebedarf der einzelnen Betriebsgebäude ermittelt. Mischnutzungen und unbeheizte Fläche wurden bei den Flächenangaben der jeweiligen Unternehmen nicht berücksichtigt. Es wurde allerdings in einigen Tabellen die Art der Gebäude miteinbezogen (wie Verwaltungsbau, Fabrikhalle und sogar Wohngebäude).

In „Eigentümerstruktur des Immobilienbestandes von Nichtwohngebäuden“ (dena, 2013), die ebenfalls mittels einer Umfrage in verschiedenen Unternehmen ein Mengengerüst und eine Typologie der Nichtwohngebäude erstellt, soll die Datenlage im GHD-Sektor weiter verbessert werden und die Relevanz energetischer Sanierungen aus Sicht der Eigentümer erfasst werden. Die Nichtwohngebäude werden hier in 12 Gruppen unterteilt, für die jeweils Anzahlen, Flächen und Endenergieverbräuche angegeben werden.

Folgende Übersicht zeigt die in den Studien enthaltenen Aspekte. Es ist dabei zu beachten, dass nicht alle hier interessierenden Punkte untersucht wurden, da sie beispielsweise nur für wenige

Bundesländer oder nur für ausgewählte Gebäudetypen gelten. Die Tabelle zeigt die für die Modellentwicklung nutzbaren Aspekte.

|                              | Beispiel<br>(Kurzfassung)          | Beschreibungen                                                                                                         | DIN | Leibniz-Institut,<br>2011 | Leibniz-Institut,<br>2013 | Fraunhofer ISI et al.,<br>2013 | dena, 2013 |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------|
| Eigene Typologie             | Bildungsgebäude                    | Unterteilung in Haupt- und Unterkategorien mittels ähnlicher Merkmale wie z.B. Kubatur, Energieverbrauch, Nutzungsart. | X   | X                         | X                         | X                              | X          |
| Raumbezug                    | Sachsen-Anhalt                     | Deutschlandweit oder regional begrenzt?                                                                                |     | X                         | X                         | X                              | X          |
| Zeitbezug                    | 2010/2011                          | Verwendete Daten stehen in Abhängigkeit zu bestimmten Zeiten.                                                          |     | X                         | X                         | X                              | X          |
| Anzahl                       | Gebäudeanzahl                      | Anzahl der untersuchten Gebäude in einer Kategorie                                                                     |     | X                         |                           | X                              |            |
| Fläche                       | BGF/NGF                            | Angabe der jeweiligen Bezugsfläche der Daten.                                                                          |     | X                         | X                         | X                              | X          |
| Volumen                      | BRI                                | Gebäudevolumen, um Aussage zur Anzahl der Geschosse bzw. Höhe der Gebäude abzuleiten.                                  |     | X                         | X                         |                                |            |
| Altersklasse                 | ab 1988/1977-1990                  | Angabe verwendbarer und ineinander umrechenbarer Baualtersklassen.                                                     |     | X                         | X                         | X                              | X          |
| Nutzungs-kategorie           | Bürogebäude/<br>Werkhalle          | Gebäudeart, wie z.B. Mischnutzung im Wohngebäude oder Bürogebäude.                                                     |     |                           |                           | X                              |            |
| Nutzungsbedingungen          | Innenraumtemp.                     | Mischnutzung mit differenzierenden klimatischen Sollwerten                                                             | X   |                           | X                         |                                |            |
| Gebäude-oberfläche           | Fensterfläche                      | Detaillierte Daten zu Bauteilflächen.                                                                                  |     | X                         | X                         |                                |            |
| Konstruktion                 | Satteldach                         | grundsätzliche Gebäudekonstruktion (z.B. Satteldach, Mauerwerk oder Leichtbau)                                         |     | X                         | X                         |                                |            |
| Energiebedarf                | Bedarfs ausgelegt                  | Angabe des Endenergiebedarfs                                                                                           | X   | X                         | X                         |                                |            |
| Stromverbrauch               | Büroausstattung/<br>Beleuchtung    | Angabe des Stromverbrauchs                                                                                             |     |                           |                           | X                              |            |
| Anlagentechnik               | Brennwertkessel/<br>Lüftungsanlage | Anlagentechnik der Gebäudekategorien wie z.B. Lüftungsanlage etc.                                                      | X   | X                         | X                         |                                |            |
| Energieträger                | Öl/Gas                             | verwendeter Energieträger                                                                                              |     | X                         | X                         | X                              |            |
| Raumheizung                  | Energieverbrauch<br>für diese      | Größe des Energieverbrauchs für die Raumheizung                                                                        |     |                           |                           | X                              |            |
| Endenergieverbrauch          | Verbrauchs<br>ausgelegt            | Angabe des Endenergieverbrauchs                                                                                        |     |                           |                           | X                              | X          |
| Bezugseinheiten              | Parkplätze/<br>Erwerbstätige       | Datengenerierung durch Bezugseinheiten arbeiten (z.B. Erwerbstätige/m²)                                                |     |                           |                           | X                              |            |
| Vergleich zu anderen Studien | Inhaltlicher<br>Vergleich          | Vergleich mit anderen Studien                                                                                          |     |                           | X                         | X                              |            |
| Energetische Qualität        | Sanierungstiefe                    | Z.B. Sanierungstiefe oder Qualität der installierten Anlagentechnik                                                    | X   |                           | X                         |                                |            |
| Wärmeverluste                | Transmissions-<br>wärmeverluste    | Wärmeverluste, die z.B. durch Transmissionswärmeverluste der Bauteiloberflächen entstehen können                       |     |                           | X                         |                                |            |

Abbildung 3.16: Aspekte von Nichtwohngebäuden in den verschiedenen Studien

## Erstellen der Meta-Typologie

Um die vorhandenen Daten optimal nutzen zu können, werden die verschiedenen Typologien der Studien verglichen. Nichtwohngebäude werden klassifiziert und in Gruppen unterteilt.

Auffallend ist, dass es große Unterschiede bei der Einteilung in Gruppen und Untergruppen gibt. In (Fraunhofer ISI et al., 2013), die sich auf die Nutzungsarten Gewerbe, Handel und Dienstleistungen beschränkt, wird eine Unterteilung in 12 Hauptgruppen und zusätzliche Untergruppen vorgenommen. (Leibnitz-Institut, 2013) hat insgesamt acht Hauptgruppen und verschiedene Untergruppen, (Leibnitz-Institut, 2011) bildet dagegen 11 Hauptgruppen. Obwohl (Leibnitz-Institut, 2013) auf (Leibnitz-Institut, 2011) aufbaut, wurde deren Einteilung nicht übernommen. DIN V 18599 unterteilt in 22 Gruppen. In (dena, 2013) werden 12 nicht weiter untergruppierte Hauptgruppen beschrieben.

Ziel der nachfolgenden Analysen ist es, die vorliegenden Studien zusammenzuführen und ein möglichst realistisches Abbild des Bestands an Nichtwohngebäuden in GEMOD zu erstellen. Die Herausforderungen bestehen dabei in

- der Vermeidung von Dopplungen  
sind z.B. Gebäude des „Baugewerbes“ (dena, 2013) bereits in „Büro und Verwaltung“ (Leibnitz-Institut, 2013) enthalten?
- und in der Übertragung von Informationen einer Studie/Gebäudeart auf eine andere Gebäudeart  
können z. B. die Informationen der Gruppe Bildung (Leibnitz-Institut, 2013) auf die der Schulen (Fraunhofer ISI et al., 2013) übertragen werden?

Die Studien (Fraunhofer ISI et al., 2013), (Leibnitz-Institut, 2013) und (dena, 2013) werden für die Erstellung der neuen Meta-Typologie verwendet.

## Datenverarbeitung in der Meta-Typologie

Die Tabellen im Anhang zeigen, zu welchen Aspekten der Nichtwohngebäude Daten in den Studien vorhanden sind. Dabei unterscheiden sich die Zahlenwerte der drei zentralen Studien im Detail nur in der Gebäudeanzahl. Nutzflächen und Endenergiebedarfswerte sind weitestgehend vollständig enthalten. Zu einigen Details lassen sich jedoch keine allgemeingültigen Aussagen treffen, da sie sich nur auf spezielle Gebäude beziehen, die z.B. in den ausgeführten Interviews untersucht wurden und somit eine zu geringe Aussagekraft für eine deutschlandweite Betrachtung haben. Zu den Bauteilflächen der Nichtwohngebäude sind grundsätzlich nur wenige Angaben vorhanden. Keine der Studien ist hinsichtlich des hier benötigten Informationstiefgrades aussagekräftig genug, um in das GEMOD-Modell abschließend eingepflegt zu werden.

Daher wird an (Beuth Hochschule, IFEU, 2012) angeknüpft und dort bereits getätigte Annahmen zu Flächen und U-Werten einzelner Bauteile übernommen. Auf die Geschossigkeit geht (Leibnitz-Institut, 2013) ein, was als Indiz für die Gebäudegeometrie verwendet werden kann. Die Studie stützt sich mit ihren Informationen dabei auf vier ausgesuchte Bundesländer. Dennoch konnte mit Hilfe dieser Angaben auf eine deutschlandweite Geschossigkeit der einzelnen Gebäudetypen geschlossen und somit in Verbindung mit der Nutzfläche eine Aussage über das Volumen der Gebäude getroffen werden.

Die komplette Typologie ist im Anhang (Tabelle 0.4) aufgeführt. (Fraunhofer ISI et al., 2013) gibt Auskunft über die Anzahl der Nichtwohngebäude, die Nettogrundfläche und den Endenergieverbrauch. (Leibnitz-Institut, 2013) gibt keine deutschlandweite Auskunft über den

Endenergieverbrauch. (dena, 2013) enthält Daten zu Fläche und Endenergieverbrauch, jedoch nicht zur Anzahl der Gebäude. Die Ampel-Bewertung neben der Tabelle zeigt an, inwieweit keine, noch unschlüssige oder alle Daten vorhanden sind.

In (Fraunhofer ISI et al., 2013) wurden die Angaben zu den Nichtwohngebäuden mit Mischnutzungen - also hauptsächlich Wohngebäude - addiert. Mischnutzungen wurden bei den anderen Studien außer Acht gelassen. Um eine vergleichbare Zahlenreihe zu erhalten, werden die Anzahl und die Fläche der Wohngebäude vom Gesamtbestand der Nichtwohngebäude subtrahiert (Anhang Tabelle 0.5). In (dena, 2013) werden keine Angaben über die Anzahl der Nichtwohngebäude gemacht, was einen genauen Vergleich aller drei Studien erschwert. In Tabelle 0.6 im Anhang zeigen die grauen Spalten die mittlere Nutzfläche pro Gebäude an. Allerdings weichen die Werte bei Bädern (Fraunhofer ISI et al., 2013), bei Sport (Leibnitz-Institut, 2013) und bei Krankenhäusern (Fraunhofer ISI et al., 2013) bzw. Heilbehandlung (Leibnitz-Institut, 2013) sichtlich voneinander ab.

Tabelle 0.6 im Anhang zeigt die Summen der Nichtwohngebäudeflächen aus den drei Studien. Die Anzahl der Gebäude unterscheidet sich um 211.000, also um ca. 7 %. Dabei wird (Fraunhofer ISI et al., 2013) als Referenzwert angenommen. Die Gesamtfläche weicht um 231 Mio. m<sup>2</sup> (ca. 15 %) ab. Die Aufteilung unter den Gruppen ist allerdings nicht gleich. (dena, 2013) weicht mit ihrer Fläche für Nichtwohngebäude um 34 % ab.

Die Flächen und die Anzahlen der Nichtwohngebäude werden gegenübergestellt in (Tabelle 0.9 bis Tabelle 0.12) im Anhang. Mit plausiblen Annahmen werden die Werte der jeweiligen Einzel-Typologie ausgewertet und begründbar übernommen.

Im Folgenden werden die Gebäudetypen einzeln betrachtet und deren Ergebnisse ausgewertet:

#### **1. Baugewerbe:**

Die Werte aus (Fraunhofer ISI et al., 2013) werden übernommen. Die Flächenangaben decken sich mit den Werten der (dena, 2013). Die Kategorie Baugewerbe ist in (Leibnitz-Institut, 2013) nicht vorhanden. Die Flächenangaben ähneln sich stark, daher wird angenommen, dass die in (dena, 2013) nicht angegebene Gebäudeanzahl ähnlich wie in (Fraunhofer ISI et al., 2013) sein muss. Die Fläche wird gemittelt, während die Anzahl aus (Fraunhofer ISI et al., 2013) übernommen wird.

#### **2. Sport:**

Die Gruppe Bäder ist nicht vergleichbar mit der Gruppe Sport. Die Werte von (Leibnitz-Institut, 2013) erscheinen realistisch und werden daher gewählt. In (Leibnitz-Institut, 2013) wird der gesamte Sportbereich betrachtet, in (Fraunhofer ISI et al., 2013) nur die Bäder. Daher werden Anzahl sowie Fläche für den Bereich Sport aus (Leibnitz-Institut, 2013) übernommen.

#### **3. Beherbergung, Gastronomie, Heime:**

Aus Plausibilitätsgründen werden die Werte aus (Fraunhofer ISI et al., 2013) gewählt. In (Leibnitz-Institut, 2013) wird der Bereich der Heime nicht betrachtet, zudem ist der Bereich Gastronomie extra aufgeführt. Um keine unnötige Unschärfe in die Betrachtung mit aufzunehmen, wird das Ergebnis (Fraunhofer ISI et al., 2013) vollständig übernommen.

#### **4. Bildung:**

Die Werte aus (Fraunhofer ISI et al., 2013) und der (Leibnitz-Institut, 2013) werden gemittelt. Der Bereich der Bildung ist typologisch komplett in (Leibnitz-Institut, 2013) erfasst. (Fraunhofer ISI et al., 2013) befasst sich allein mit dem Bereich der Schulen. Es wird angenommen, dass der Typ Schulen im Bereich der Bildung enthalten ist. Jedoch ist die Anzahl der Schulen im Vergleich zum

Typ Bildung sehr hoch. Mangels genauerer Werte werden die Flächen und Anzahlen der Typen Bildung und Schulen gemittelt.

#### **5. Handel:**

Die Werte aus (dena, 2013) und (Fraunhofer ISI et al., 2013) stimmen beinahe überein, wenn die einzelnen Handelsgruppen der (dena, 2013) zusammengezogen werden. Die Angaben in (Fraunhofer ISI et al., 2013) unterscheiden sich um ca. 50% von (Leibnitz-Institut, 2013). Es stellt sich die Frage, welche der Werte für die Typologie übernommen werden können. Die Kategorie in (Fraunhofer ISI et al., 2013) wird „Handel“ genannt, während in (Leibnitz-Institut, 2013) von „Handel und Dienstleistungen“ gesprochen wird. Auch in diesem Fall wurden Mittelwerte zugrunde gelegt, um den statistischen Fehler möglichst klein zu halten.

#### **6. Flughäfen und 7. Gartenbau:**

Keine der Studien enthält diesbezüglich verwertbare Informationen. Sie können daher nachfolgend nicht betrachtet werden.

#### **8. Gewerbe und Industrie:**

Die Werte aus (Leibnitz-Institut, 2013) werden übernommen. Der Bereich Industrie ist nur in dieser Typologie enthalten. Systematisch bedingt liegt die Fokussierung von (Fraunhofer ISI et al., 2013) auf Gewerbegebäuden. Es wird daher angenommen, dass wenn die Gewerbegebäude der (Fraunhofer ISI et al., 2013) von der Gruppe „Gewerbe und Industrie“ subtrahiert werden, die Werte für die Gruppe „Industriegebäude“ übrig bleiben. Daher wird im Weiteren nur noch von der Gruppe „Industrie“ gesprochen.

#### **9. Herstellungsbetriebe:**

Die Werte aus (Fraunhofer ISI et al., 2013) werden übernommen. Andere Studien machen hier keine Angaben.

#### **10. Krankenhäuser:**

Die Werte aus (Fraunhofer ISI et al., 2013) werden übernommen. Die Zahl der Krankenhäuser bzw. die Gruppe „Heilbehandlung“ wirkt dabei erstaunlich hoch. Bei (destatis) liegt diese Anzahl bei ca. 2.000 Gebäuden. Daher wird angenommen, dass in (Fraunhofer ISI et al., 2013) unter der Gruppe „Krankenhäuser“ auch Heilbehandlungsstätten sowie ähnliche Gebäude enthalten sind

#### **11. Kultur:**

Die Werte aus (Leibnitz-Institut, 2013) werden übernommen, da diese ausschließlich dort angegeben werden.

#### **12. Landwirtschaft:**

Mit Hilfe der Online-Plattform (statista, 2014) konnte die Anzahl an landwirtschaftlichen Gebäuden eingegrenzt werden. Diese wird mit den Flächenangaben der (dena, 2013) ergänzt.

#### **13. Nahrungsmittelgewerbe:**

Die Werte aus (Fraunhofer ISI et al., 2013) werden übernommen.

#### **14. Textil, Bekleidung, Spedition:**

Die Werte aus (Fraunhofer ISI et al., 2013) werden übernommen.

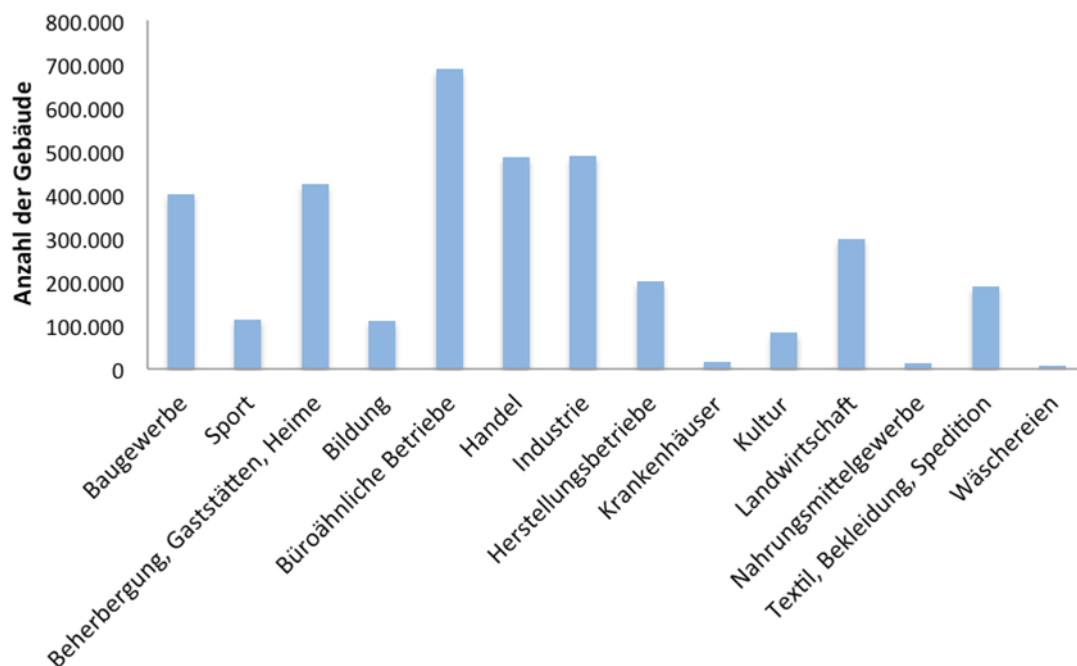
#### **15. Wäschereien:**

Die Werte aus (Fraunhofer ISI et al., 2013) werden übernommen, da in den anderen Studien keine Aussagen dazu gemacht werden.

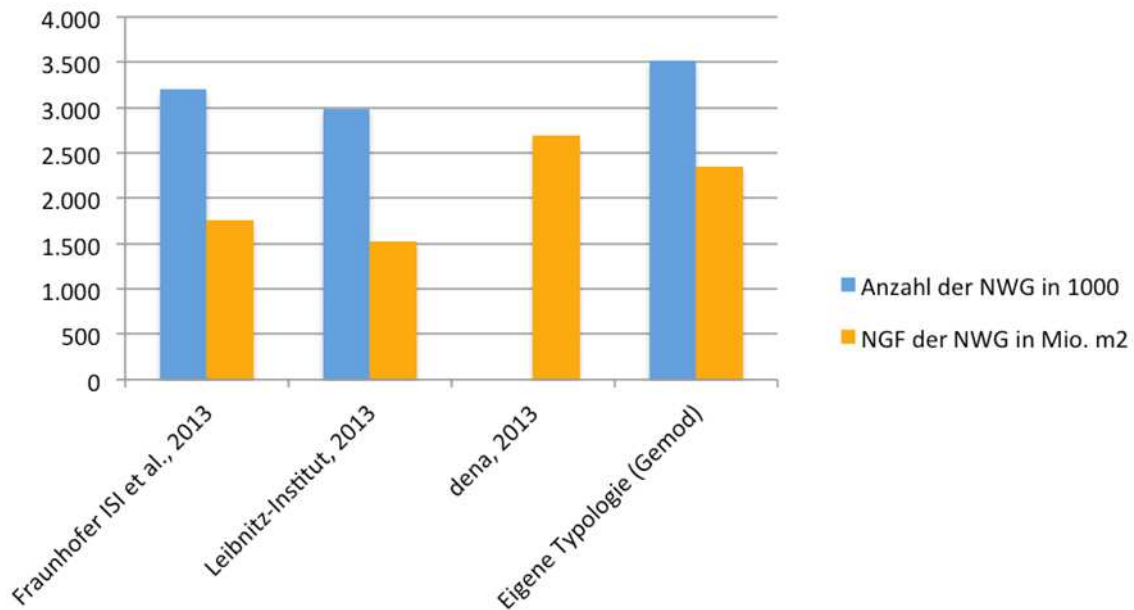
| Typologie                        | Anzahl    | NGF<br>in Mio. m <sup>2</sup> | Endenergie-<br>verbrauch<br>in 1000 |
|----------------------------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Baugewerbe                       | 402.000   | 97                            | 12                                  |
| Sport                            | 113.825   | 55                            | 7                                   |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime | 423.000   | 237                           | 32                                  |
| Bildung                          | 110.832   | 156                           | 25                                  |
| Büroähnliche Betriebe            | 687.279   | 316                           | 19                                  |
| Handel                           | 486.563   | 244                           | 22                                  |
| Industrie                        | 489.144   | 698                           | 0                                   |
| Herstellungsbetriebe             | 200.000   | 86                            | 9                                   |
| Krankenhäuser                    | 17.000    | 53                            | 18                                  |
| Kultur                           | 83.176    | 70                            | 0                                   |
| Landwirtschaft                   | 299.000   | 254                           | 20                                  |
| Nahrungsmittelgewerbe            | 14.000    | 7                             | 0                                   |
| Textil, Bekleidung, Spedition    | 188.000   | 74                            | 4                                   |
| Wäschereien                      | 6.000     | 1                             | 0                                   |
| Summe                            | 3.519.818 | 2.346                         |                                     |

**Tabelle 3.6:** Typologie der Nichtwohngebäude in GEMOD

Fügt man nun die Ergebnisse der Studien zusammen, ergibt sich die Anzahl der Gebäude und die Größe der Nettogrundfläche in Deutschland (Tabelle 3.6). Die Anzahl der Nichtwohngebäude in Deutschland liegt demnach bei ca. 3.5 Mio. Gebäuden mit einer Fläche von ca. 2,35 Mrd. m<sup>2</sup>. Abbildung 3.17 zeigt, dass büroähnliche Betriebe den größten Anteil der Nichtwohngebäude ausmachen gefolgt von Gebäuden für Handel und Industrie.



**Abbildung 3.17:** Verteilungsmuster der Nichtwohngebäude



**Abbildung 3.18: Vergleich von Anzahl und Nettogrundfläche der Nichtwohngebäude in verschiedenen Studien**

Der Vergleich der aufsummierten Werte für die Gebäudeanzahlen und Nutzflächen der einzelnen Quellen bzw. der hier erstellten Meta-Typologie zeigt bei einer zwar grundsätzlich ähnlichen Größenordnung der Werte dennoch deutliche Unterschiede. Bezüglich der Nutzfläche liegen die ermittelten Werte der GEMOD-Meta-Typologie mit 2.346 Mio. m² im Mittelfeld der anderen Untersuchungen. Auffallend ist aber der um ca. 10 % höhere Wert der Gebäudeanzahl. Die mittlere Nutzfläche je Gebäude liegt damit bei 667 m². Die Studie des Fraunhofer Instituts weist hier 549 m², (Leibnitz-Institut, 2013) 510 m² auf.

Veranlasst durch die oben beschriebenen Plausibilitätsanalysen und dem intensiven Vergleich der Einzelwerte mit allen zur Verfügung stehenden Quellen erscheinen die ermittelten Werte dennoch trotz der gezeigten leichten Differenzen, die zudem noch in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie die Unterschiede der verwendeten Quellen untereinander, als belastbar und werden im Weiteren verwendet.

### Baualtersklassen der Nichtwohngebäude

Nachdem den einzelnen Nutzungsgruppen der Nichtwohngebäude Gebäudeanzahlen und Nutzungsflächen zugeordnet wurden, müssen diese im jeweiligen Kohortentyp auf die üblichen Baualtersklassen aufgeteilt werden, um auf den energetischen Zustand der Gebäude Rückschlüsse ziehen zu können.

Keine der ausgewerteten Studien hat eine entsprechende altersscharfe Einteilung der Nichtwohngebäude. Somit liegen keine direkten Informationen über die 13 Altersverteilungen (A-M) vor.

Um die Nichtwohngebäude in Baualtersklassen einzuteilen, wird ihre Altersstruktur an die der Wohngebäude angepasst. Dafür wird die prozentuale Aufteilung der Wohngebäude über die Baualtersklassen bestimmt und auf die Nichtwohngebäude übertragen. Mit der Wahl dieses pragmatischen Weges wird ein statistischer Fehler in Kauf genommen, da an es dieser Stelle völlig unbeleuchtet bleibt, inwieweit sich die Nutzungsdauern einzelner Nichtwohngebäude von denen der Wohngebäude unterscheiden.

| BAK   | EFH       | RH        | MFH       | GMH     | Summe      | Anteil | Anzahl NWG |
|-------|-----------|-----------|-----------|---------|------------|--------|------------|
| A     | 330.000   | 148.000   | 54.000    | 600     | 532.600    | 2,9    | 102.779    |
| B     | 966.000   | 492.000   | 442.000   | 28.700  | 1.928.700  | 10,6   | 372.045    |
| C     | 1.131.000 | 710.000   | 388.000   | 7.400   | 2.236.400  | 12,3   | 431.530    |
| D     | 859.000   | 447.000   | 356.000   | 17.300  | 1.679.300  | 9,2    | 324.175    |
| E     | 1.509.000 | 633.000   | 586.000   | 34.000  | 2.762.000  | 15,1   | 532.900    |
| F     | 1.507.000 | 611.000   | 412.000   | 50.100  | 2.580.100  | 14,1   | 498.054    |
| G     | 704.000   | 335.000   | 146.000   | 15.000  | 1.200.000  | 6,6    | 231.604    |
| H     | 1.160.000 | 652.000   | 309.000   | 28.700  | 2.149.700  | 11,8   | 414.987    |
| I     | 1.035.000 | 619.000   | 244.000   | 20.900  | 1.918.900  | 10,5   | 370.285    |
| J     | 775.000   | 384.000   | 85.000    | 7.600   | 1.251.600  | 6,9    | 241.460    |
| Summe | 9.976.000 | 5.031.000 | 3.022.000 | 210.300 | 18.239.300 | 100,0  | 3.519.818  |

**Tabelle 3.7: Verteilung der Gebäude auf die Baualtersklassen (BAK)**

Vorgehensbedingt kann die entwickelte altersscharfe Aufteilung der Nichtwohngebäude keine Einordnung in die einzelnen Gebäudetypen bieten. Als Anhaltspunkt bietet aber (Leibnitz-Institut, 2013) eine erste Grobeinteilung in vier repräsentative Baualtersklassen.

| Baualtersklassen |                      | Nichtwohngebäude    |                    |                 |        |
|------------------|----------------------|---------------------|--------------------|-----------------|--------|
|                  |                      | Büro, Verw., Schule | Krankenhaus, Heime | Handel, Gewerbe | Hotels |
| BMVBS            | Klasse 1 (bis 1948)  | 32,4%               | 40,4%              | 30,5%           | 38,6%  |
| entspricht       | ABC                  |                     |                    |                 |        |
| BMVBS            | Klasse 2 (1949-1978) | 22,9%               | 25,3%              | 22,2%           | 29,0%  |
| entspricht       | DEF                  |                     |                    |                 |        |
| BMVBS            | Klasse 3 (1979-1994) | 35,4%               | 25,2%              | 29,6%           | 29,9%  |
| entspricht       | GH                   |                     |                    |                 |        |
| BMVBS            | Klasse 4 (1995-2009) | 9,3%                | 9,1%               | 17,7%           | 2,5%   |
| entspricht       | IJ                   |                     |                    |                 |        |
| Summe            |                      | 100%                | 100%               | 100%            | 100%   |

**Tabelle 3.8: Aufteilung der Nichtwohngebäude auf die Baualtersklassen (Leibnitz-Institut, 2013)**

Die vier Gruppen aus (Leibnitz-Institut, 2013) werden auf die eigene Gebäudetypologie auf die zehn Baualtersklassen (A-J) der eigenen Typologie verteilt. Ferner wurde die prozentuale Verteilung der vier Nutzungstypen den entsprechenden Gebäudetypen zugewiesen (Tabelle 0.7 im Anhang).

### Ermittlung der Bauteilflächen

In (Leibnitz-Institut, 2013) werden Angaben zur Geschossigkeit der Nichtwohngebäude gemacht. Diese basieren auf in automatisierten Liegenschaftskarten (ALK) für Thüringen und Sachsen-Anhalt dokumentierten Gebäudehöhen sowie auf projektinternen Schätzungen. Aus den Höhenangaben der in den beiden Bundesländern aufgenommenen Gebäude wurde durch die Annahme üblicher Geschosshöhen auf die Anzahl der Geschosse geschlossen. Noch fehlende Angaben wurden durch Vergleich mit anderen Gebäudetypen, aus Erfahrungswerten sowie über Literaturangaben zu üblichen Gebäudekubaturen (Neufert, 2005) sinnvoll abgeleitet oder geschätzt. Die Werte zu Höhen und Geschossigkeit aus (Leibnitz-Institut, 2013) wurden übernommen (Tabelle 0.9 im Anhang). Somit kann der Bruttorauminhalt der Gebäude, hier unter Zuhilfenahme statistischer Umrechnungsfaktoren der Nettogrundfläche in die Bruttogrundfläche (Leibnitz-Institut, 2013), ermittelt werden (Tabelle 0.10 im Anhang). Durch Division dieser Tabellenwerte durch die

Gebäudeanzahl des jeweiligen Gebäude-/Nutzungstyp lassen sich die einzelnen Gebäude in ihrer grundsätzlichen Kubatur abbilden (Tabelle 0.11 im Anhang).

Projiziert man vereinfacht die Bodenfläche auf das Dach, ist die (Flach-)Dachfläche ebenfalls berechnet. Vereinfachend wird angenommen, dass alle Dächer im Mittel eine geringe Dachneigung von 25° aufweisen. Für die Berechnung der Außenfläche der Nichtwohngebäude sind die unbekannten Längen der Gebäudekanten nötig. Standardentwurfsbücher wie z. B. (Neufert, 2005) bieten durch die Angabe von Gebäudetiefen erste Anhaltswerte. So werden beispielsweise typische Seitenlängen von Bürogebäuden mit 15 m angenommen; Gebäude vom Typ Krankenhaus, landwirtschaftliche Bauten und die des Nahrungsmittelgewerbe werden mit 25 m Kantenlänge angenommen. Alle Gebäude werden als einfache Quader angenommen. Ungenauigkeiten bei dieser Herangehensweise werden hingenommen. Die energetisch wichtige Kompaktheit der Gebäude wird zu großen Teilen von der Gebäudetiefe bestimmt, die plausibel eingegrenzt wurde. Die Ergebnisse sind in (Tabelle 0.12 im Anhang) dargestellt.

Die Berechnung der Fensterflächen basiert auf „Vereinfachung zur geometrischen und technischen Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand“ (BMVBS, 2010). Hier wurden empirisch ermittelte, funktionale Abhängigkeiten zur Bestimmung der Fensterflächen aufgestellt, die hier Verwendung finden.

### Wärmedurchgangskoeffizient

In (Leibnitz-Institut, 2011) werden Angaben zu Baukonstruktionen von Nichtwohngebäuden gemacht. Dabei werden die Nichtwohngebäude, ohne Unterteilung in einzelne Nutzungsarten, in verschiedene Baualtersklassen eingeteilt und die dazugehörigen Konstruktionen und Wärmedurchgangskoeffizienten beschrieben (Tabelle 0.13 und Tabelle 0.14 im Anhang).

Diese Wärmedurchgangskoeffizienten wurden in GEMOD übernommen. Fehlende Werte wurden in Anlehnung an Wohngebäude desselben Baualters festgelegt. Die resultierenden U-Werte zeigt die nachfolgende Tabelle.

|     |                       |      | U-Werte in W/m <sup>2</sup> K |                  |                   |           |
|-----|-----------------------|------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------|
| BAK | Baukonstruktionsalter |      | Fenster                       | oberer Abschluss | unterer Abschluss | Außenwand |
| A   |                       | 1859 | 3,5                           | 1                | 1,2               | 2         |
| B   | 1860                  | 1918 | 2,7                           | 1                | 1,2               | 2         |
| C   | 1919                  | 1948 | 3,5                           | 1                | 1,2               | 1,5       |
| D   | 1949                  | 1957 | 3,5                           | 1                | 1,2               | 1,5       |
| E   | 1958                  | 1968 | 3,5                           | 1                | 1,2               | 1,5       |
| F   | 1969                  | 1978 | 2,9                           | 1                | 1,2               | 1,5       |
| G   | 1979                  | 1983 | 2,9                           | 0,45             | 0,85              | 1,2       |
| H   | 1984                  | 1994 | 1,9                           | 0,3              | 0,4               | 0,85      |
| I   | 1995                  | 2001 | 1,9                           | 0,3              | 0,4               | 0,35      |
| J   | 2002                  | 2009 | 1,7                           | 0,25             | 0,4               | 0,5       |
| K   | 2010                  | 2020 | 1,7                           | 0,25             | 0,4               | 0,5       |
| L   | 2021                  | 2050 | 0,8                           | 0,15             | 0,15              | 0,15      |
| M   |                       |      | 0,6                           | 0,1              | 0,1               | 0,1       |

**Tabelle 3.9: U-Werte von Nichtwohngebäuden in Abhängigkeit der Baualtersklasse in GEMOD**

### 3.1.3 Entwicklung bis 2050

Die Entwicklung des Baugeschehens im Nichtwohngebäude-Bereich ist ungleich schwieriger vorherzusagen als die der Wohngebäude. Hier spielen konjunkturelle, volkswirtschaftliche Abhängigkeiten bis hin zu heute kaum vorhersehbaren eventuellen Strukturwandeln der Industrie-

oder Dienstleistungsgesellschaft eine so große Rolle, dass eine Abschätzung im Rahmen dieser Studie nur zu unzulässigen Annahmen und Fehlern führen kann. Der zeitliche Wandel des Nichtwohngebäude-Gebäudebestandes wird daher mangels empirischer Daten grundsätzlich analog zu den Wohngebäuden angesetzt. Bedingt durch das anzunehmende und im Vergleich zum Wohnen schnelllebigere Tempo, welches durch Nutzungsänderungen verursacht wird, wird den Nichtwohngebäuden eine gegenüber den Wohngebäuden um 100 % erhöhte Neubau- und Abrissrate unterstellt.

### 3.2 Warmwasser

GEMOD erlaubt die gebäudespezifische Eingabe des Nutzwärmebedarfs zur Warmwassererwärmung. Im Folgenden werden daher die Rechenmethoden verschiedener Regelwerke zum Trinkwarmwasserbedarf analysiert, um einerseits den durch DIN V 4701-10 vorgegebenen pauschalen Mittelwert von 12,5 kWh/m<sup>2</sup>a zu hinterfragen und andererseits durch die Applikation spezifischer Einzelwerte zu einer genaueren Gesamtaussage zu kommen.

Im Vorfeld der Analyse wurden die gebäudetypabhängigen Pro-Kopf-Wohnflächen ermittelt. Die Statistiken des Statistischen Bundesamtes, Bauen und Wohnen, Mikrozensus – Zusatzerhebung 2010 weisen die durchschnittlichen Wohnflächen von Ein- und Mehrfamilienhäusern und deren durchschnittlichen Bewohnerzahl aus. So hat ein durchschnittliches Einfamilienhaus eine Wohnfläche von 128,5 m<sup>2</sup> und wird von 2,5 Personen bewohnt (analog MFH: 512 m<sup>2</sup> bei 13,2 Personen). Durch Hochrechnungen des Instituts für Wohnen und Umwelt konnten analoge Zahlen für große Mehrfamilienhäuser eruiert werden (IWU, 2011). Diese weisen im Mittel eine Wohnfläche von 1415,8 m<sup>2</sup> bei einer Bewohnerzahl von 41,6 Personen auf. Der Vergleich dieser Werte untereinander bestätigt die mit zunehmender Gebäudegröße erwartete Abnahme der pro Kopf zur Verfügung stehenden Fläche.

|                                | durchschn.<br>Wohnfläche in m <sup>2</sup> | durchschn.<br>Personenanzahl | Wohnfläche pro<br>Person in m <sup>2</sup> /Pers. |
|--------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| Einfamilienhäuser (EFH)        | 128,5                                      | 2,5                          | 51,4                                              |
| Mehrfamilienhäuser (MFH)       | 511,94                                     | 13,24                        | 38,68                                             |
| große Mehrfamilienhäuser (GMH) | 1415,8                                     | 41,6                         | 34,0                                              |

**Tabelle 3.10: Herleitung der durchschnittlichen Personenanzahl und durchschnittlichen Wohnfläche**

DIN V 4701-10 geht bei der Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarfes für Wohngebäude von einem Nutzwärmebedarf für die Warmwasserbereitung von 12,5 kWh/m<sup>2</sup>a aus. Dieser Wert wird mit dem Trinkwasserwärmebedarf, wie er sich aus der VDI 4655, der VDI 2067 Blatt 12 und der DIN V 18599-10 Tabelle 4 ergibt, nachfolgend verglichen.

DIN 2067 Blatt 12 Tabelle 2 geht von verschiedenen Ausstattungen aus und gibt einen personen- und ausstattungsbezogenen Wärmebedarf an. Speziell wird zwischen Dusche, normaler und großer Badewanne sowie normaler Wanne in Kombination mit Dusche unterschieden.

VDI 4655 dient grundsätzlich zur Berechnung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen für den Einsatz in Wohngebäuden. Als Berechnungsgrundlage wird in dieser Richtlinie aber ein pauschaler Jahresendenergiebedarf für Einfamilienhäuser in Höhe von 500 kWh/Pers. und für Mehrfamilienhäuser in Höhe von 1000 kWh/Wohneinheit angegeben, was trotz der groben Pauschalität hier zu Vergleichszwecken mit aufgeführt werden soll. Bei rund 37,5 m<sup>2</sup>/Person und 64,8 m<sup>2</sup> Wohnfläche je Wohneinheit im mittleren Mehrfamilienhaus ergibt sich somit für die

Mehrfamilienhäuser ein Wert von 578 kWh/Pers. Grundsätzlich hätte man für die Mehrfamilienhäuser den Wert der Einfamilienhäuser erwarten können. Der Wunsch nach „glatten“ Pauschalwerten ist hier vielleicht ursächlich verantwortlich für die Diskrepanz. Andererseits ist ein, im Vergleich zum eher von Eigentümern bewohnten Einfamilienhaus-Bereich, höherer Warmwasserverbrauch im tendenziell stärker von Mietern bewohnten Mehrfamilienhäusern durchaus plausibel.

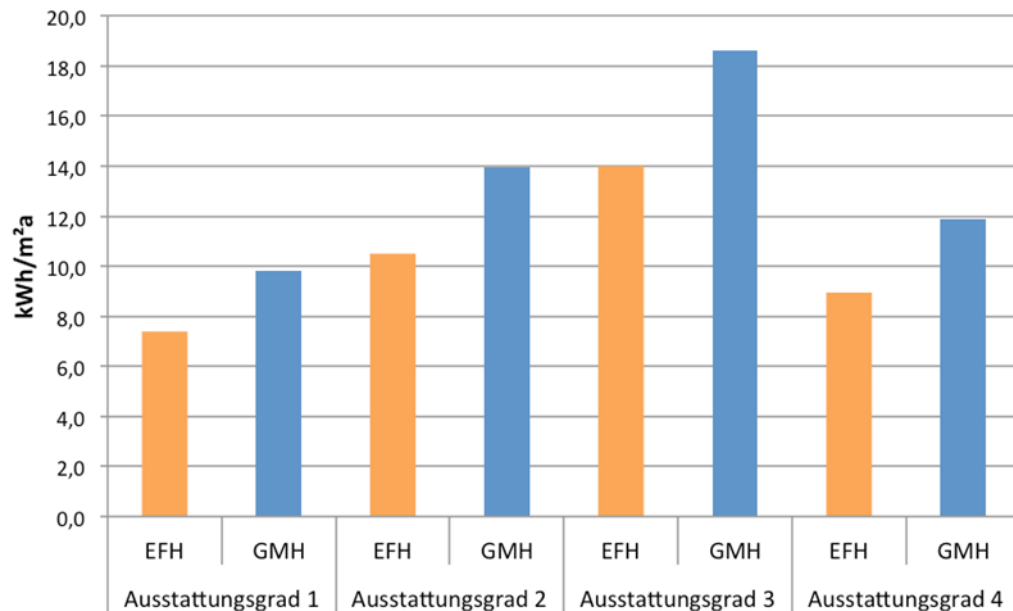


Abbildung 3.19: Darstellung Nutzwärmebedarf nach DIN 2067 Blatt 12 Tabelle 2

VDI 2067 Blatt 12 Tabelle 2 gibt den Warmwasserwärmebedarf an und geht von einem Nutzenergiebedarf aus, bei welchem die Einflüsse der Energieübergabe an den Raum, der Anlagentechnik sowie der Energiebereitstellung und –wandlung unberücksichtigt bleiben. Als Berechnungsgrundlage dienen die Raumabmessung und –orientierung, bauphysikalische Daten der Baukonstruktion, der Standort und die jeweilige Nutzung des Raumes oder des Gebäudes.

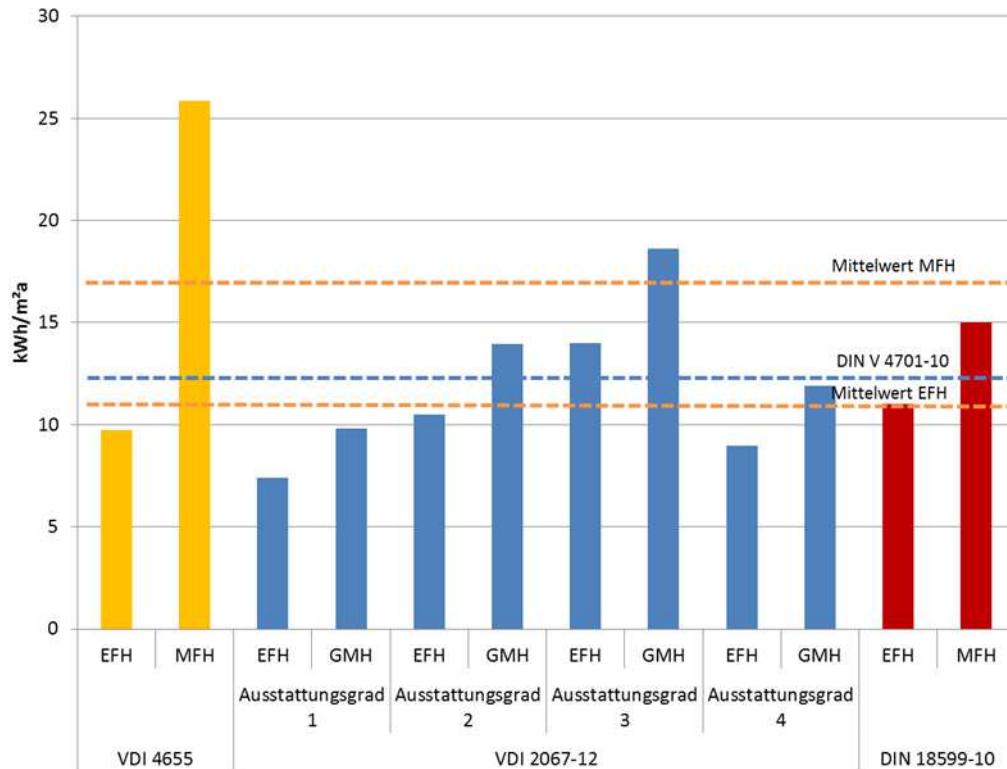
DIN V 18599-10 Tabelle 4 gibt zur Trinkwassererwärmung einen Nutzwärmebedarf von 11 kWh/(m²a) für Einfamilienhäuser bzw. 15 kWh/(m²a) für Mehrfamilienhäuser vor.

Abbildung 3.20 zeigt einerseits die Streuung der Werte andererseits die Orientierung des Ansatzes der DIN V 4701-10 im Mittelfeld der Werte. Damit bilden diese näherungsweise den Durchschnitt der Ein- und Mehrfamilienhäuser gemäß VDI 2067 und DIN V 18599 ab.

Vergleicht man diese errechneten Werte mit tatsächlichen Messergebnissen zeigen sich gute Übereinstimmungen. So werden zum Beispiel in (Techem GmbH, 2010) rund 162.000 Wohneinheiten ausgewertet. Dort kam man zu dem Ergebnis, dass im Jahre 2010 durchschnittlich 228 l/m²a Warmwasser verbraucht wurden. Rund 84 % der untersuchten Gebäude sind Mehrfamilienhäuser. Der Nutzenergieverbrauch für diese Menge Trinkwarmwasser beträgt durchschnittlich 11,9 kWh/m²a. Andererseits hat (IGHT, 2014) bei energetischen Untersuchungen an Bestandsgebäuden Endenergieverbräuche von rund 40 kWh/m²a gemessen. Damit werden typische Ergebnisse der Normberechnungen erheblich überschritten.

Zusammenfassend kann für Wohngebäude subsummiert werden, dass der Nutzwärmebedarf zur Warmwasserbereitung in kleinen Gebäuden niedriger ist als in großen. So pendeln sich die Werte

für EFH/RH bei ca. 11 kWh/m<sup>2</sup>a und für MFH/GMH bei 15 kWh/m<sup>2</sup>a ein. Für die GEMOD-Berechnungen werden die Vorgaben aus DIN V 18599 übernommen. Im Resultat ergibt sich der über alle Wohngebäude flächengewichtete Mittelwert zu 12,6 kWh/m<sup>2</sup>a, was dem Pauschalwert der DIN V 4701-10 von 12,5 kWh/m<sup>2</sup>a sehr nahe kommt.



**Abbildung 3.20: Darstellung Nutzwärmebedarf nach verschiedenen Regelwerken**

Der Warmwasserbedarf der Nichtwohngebäude ist nicht allgemein bekannt. In (Fraunhofer ISI et al., 2013) werden Angaben über den Endenergieverbrauch der Nichtwohngebäude in Deutschland gemacht, die in nachfolgender Tabelle als flächenspezifische Werte für Nutzenergie ausgewiesen werden. Dabei wurde eine mittlere Anlagenaufwandszahl von 1,2 bei der Umrechnung unterstellt.

Zusätzlich zeigt die Tabelle, sofern sich die Ergebnisse übertragen lassen, auch die in DIN V 18599 angesetzten Nutzenergiewerte zum Vergleich. Deutlich werden die Diskrepanzen beider Ansätze im Detail. Im weiteren Vorgehen wurde auf Basis dieser Vorgaben und eigener Berechnungen der spezifische Brauchwasserwärmeverbrauch der Nichtwohngebäude mit dem Gesamtverbrauch gemäß (AGEB, 2013) kalibriert. Auch hier wurde bei der Umrechnung der Endenergieverbräuche in Nutzwärme eine Erzeugeraufwandszahl von 1,2 angesetzt. Verluste bei Speicherung, Verteilung und Übergabe fanden zusätzlich mit 35 % der Erzeugernutzwärmeabgabe Berücksichtigung. Der kalibrierte Gesamt-Warmwasser-Nutzenergie-Verbrauch aller Nichtwohngebäude weicht um weniger als 1,8 % von den Top-Down-Verbräuchen der (AGEB, 2013) ab.

| Gebäudetyp                      | Bezeichnung des Gebäudetyps<br>in DIN V 18599 | Endenergie<br>nach<br>(Fraunhofer<br>ISI, 2013) | Nettonutz-<br>fläche | Endenergie<br>nach<br>(Fraunhofer<br>ISI, 2013) | Nutzenergie<br>gemäß<br>DIN V<br>18599 |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|
|                                 | Tabelle 6                                     | Mio. kWh/a                                      | Mio. m <sup>2</sup>  | kWh/m <sup>2</sup> a                            | kWh/m <sup>2</sup> a                   |
| Baugewerbe                      | Baugewerbe                                    | 600,0                                           | 96,7                 | 6,2                                             |                                        |
| Sport                           | Bäder                                         | 300                                             | 55                   | 5,5                                             |                                        |
| Beherbergung, Gaststätten, Heim | Beherbergung, Gaststätten, Heim               | 3.400,0                                         | 237,0                | 14,3                                            | 116,4                                  |
| Bildung                         | Schulen                                       | 700                                             | 156                  | 4,5                                             | 32,5                                   |
| Büroähnliche Betriebe           | Büroähnliche Betriebe                         | 4.700,0                                         | 316,0                | 14,9                                            | 7,5                                    |
| Handel                          | Handel                                        | 2100                                            | 243,5                | 8,6                                             | 3                                      |
| Industrie                       | Handel                                        | 2.100,0                                         | 697,5                | 3,0                                             | 20,7                                   |
| Herstellungsbetriebe            | Herstellungsbetriebe                          | 500                                             | 86                   | 5,8                                             | 20,7                                   |
| Krankenhäuser                   | Krankenhäuser                                 | 2.300,0                                         | 53,0                 | 43,4                                            | 123,0                                  |
| Kultur                          | Schulen                                       | 700                                             | 70                   | 10                                              |                                        |
| Landwirtschaft                  | Landwirtschaft                                | 2.800,0                                         | 253,5                | 11,0                                            |                                        |
| Nahrungsmittelgewerbe           | Restl. Nahrungsmittelgewerbe                  | 200                                             | 7                    | 28,6                                            |                                        |
| Textil, Bekleidung, Spedition   | Textil, Bekleidung, Spedition                 | 100,0                                           | 74,0                 | 1,4                                             |                                        |
| Wäschereien                     | Wäschereien                                   | 100                                             | 1                    | 100                                             |                                        |

**Tabelle 3.11: Warmwasserverbrauch in Nichtwohngebäuden**

Die Zusammenstellung der endgültig im Modell verwendeten Werte zeigt Tabelle 3.12. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Warmwasserverbrauch unabhängig vom Gebäudealter ist.

| Gebäudetyp                      | Nutzenergie<br>zur<br>Warmwasser-<br>bereitung |
|---------------------------------|------------------------------------------------|
|                                 | kWh/m <sup>2</sup> a                           |
| Baugewerbe                      | 4,6                                            |
| Sport                           | 4,8                                            |
| Beherbergung, Gaststätten, Heim | 12,7                                           |
| Bildung                         | 3,1                                            |
| Büroähnliche Betriebe           | 4,9                                            |
| Handel                          | 2,7                                            |
| Industrie                       | 4,2                                            |
| Herstellungsbetriebe            | 4,3                                            |
| Krankenhäuser                   | 36,3                                           |
| Kultur                          | 3,0                                            |
| Landwirtschaft                  | 4,9                                            |
| Nahrungsmittelgewerbe           | 8,4                                            |
| Textil, Bekleidung, Spedition   | 1,2                                            |
| Wäschereien                     | 8,8                                            |

**Tabelle 3.12: Flächenspezifischer Warmwasserverbrauch (eigene Berechnung auf Basis von Fraunhofer ISI, 2013, DIN V 18599 und AGE, 2013)**

### 3.3 Lüftungswärmeverluste

Die Bestimmung des zukünftigen Heizwärmebedarfs erfordert eine Betrachtung der Lüftungswärmeverluste und deren mögliche Reduktion durch dichtere Gebäude und raumluftechnische Anlagen. Im Gegensatz zur Deckung des Heizwärmebedarfs durch erneuerbare oder fossile - also von außen zugeführte - Energie, handelt es sich bei der Wärmerückgewinnung um eine bereits im Gebäude vorhandene und lediglich über einen entsprechenden Wärmetauscher zurückgewonnene Energie. Diese Form der Reduktion von Wärmeverlusten wird nachfolgend mittels geeigneter Annahmen zur wachsenden Bestandsdurchdringung sowie ihrer noch vorstellbaren technologischen Weiterentwicklungen berücksichtigt.

Es stellen sich vorab noch die folgenden grundsätzlichen Herausforderungen in der Modellierung:

- Welche Luftwechselrate wird den Gebäudetypen zugrunde gelegt?
- Ist eine Wärmerückgewinnungsanlage vorhanden und wie effizient ist diese?
- Wie wird die Infiltration berücksichtigt?

Die Berechnungen basieren dabei auf den Vorgaben der DIN 1946-6, DIN V 18599, DIN V 4108-6, DIN EN 12831 sowie der EnEV zur Bestimmung der Luftmengen und DIN V 4701-10 für die technischen Aspekte der Wärmerückgewinnung.

### 3.3.1 Luftwechselrate

Bis zum Jahr 2013 galt gemäß DIN 4108-6 ein notwendiger hygienischer Mindestluftwechsel von  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Auch DIN EN 12831 (Heizlastberechnung) verwendet diesen Wert für normale Wohnräume, fordert aber für besonders zu lüftende Räume höhere Werte.

Durch die Einführung der DIN 1946-6 im Jahr 2009 wurden die Berechnungsansätze detaillierter gestaltet. So wird hier unterschieden in den Mindestluftwechsel zur Feuchteabfuhr, den reduzierten (Nenn-)Luftwechsel, den Nennluftwechsel und den erhöhten Luftwechsel für Ausnahmesituationen. Auch die Infiltrationsrate wird hier - ähnlich wie auch in DIN EN 12831 oder in DIN V 18599 - geregelt.

| Mindestluftwechselzahlen          |                 |
|-----------------------------------|-----------------|
| Raumart                           | $\eta_{\min}$   |
|                                   | $\text{h}^{-1}$ |
| Bewohnbarer Raum (Standardfall)   | 0,5             |
| Küche oder Badezimmer mit Fenster | 1,5             |
| Büroraum                          | 1,0             |
| Besprechungsraum, Schulzimmer     | 2               |

**Tabelle 3.13: Mindestluftwechselraten gemäß DIN EN 12831**

DIN V 4108-6 gibt bei Wohngebäuden als Berechnungsgrundlage für die Lüftungswärmeverluste bei freier Lüftung eine Luftwechselrate von  $0,6 \text{ h}^{-1}$  vor, wenn der gemessene  $n_{50}$ -Wert kleiner  $3,0 \text{ h}^{-1}$  ist, von  $1,0 \text{ h}^{-1}$  bei offensichtlichen Undichtheiten und von  $0,7 \text{ h}^{-1}$  bei allen anderen Wohngebäuden. Für den Fall maschineller Lüftung in Wohngebäuden verweist DIN V 4108-6 auf DIN V 4701-10, wo eine Luftwechselrate von  $0,4 \text{ h}^{-1}$  für die Lüftungsanlage und in Ermangelung genauerer Daten eine Infiltrationsrate von  $0,2 \text{ h}^{-1}$  angesetzt wird. Analoges findet sich auch in DIN V 18599-6 (dort „Standardwert“ genannt). Bei maschinell be- und entlüfteten Nichtwohngebäuden gelten ausschließlich die Daten der DIN V 18599-10. Hier werden je nach Nutzungsart oder Gebäudetyp Werte für die Betriebszeiten der Anlagen, die flächenbezogenen Mindestaußenluftvolumenströme, die sich üblicherweise real einstellenden Luftwechselraten und ähnliches angegeben.

Grundsätzlich gilt bei maschineller Belüftung, dass sich der Luftvolumenstrom aus der durch die Lüftungsanlage geförderten Luftmenge und der durch Infiltration verursachten Luftmenge zusammensetzt. Bei Präsenz einer Wärmerückgewinnungsanlage (WRG) kann nur der Anlagenvolumenstrom dem Wärmetaucher zur Wärmerückgewinnung zugeführt werden.

| Gebäudetyp                       | Luftwechselrate $\eta_{\min}$ |
|----------------------------------|-------------------------------|
|                                  | $\text{h}^{-1}$               |
| Baugewerbe                       | 0,8                           |
| Sport                            | 1,8                           |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime | 3,8                           |
| Bildung                          | 2,4                           |
| Büroähnliche Betriebe            | 2,1                           |
| Handel                           | 1,2                           |
| Industrie                        | 0,5                           |
| Herstellungsbetriebe             | 0,5                           |
| Krankenhäuser                    | 4,4                           |
| Kultur                           | 4,2                           |
| Landwirtschaft                   | 0,3                           |
| Nahrungsmittelgewerbe            | 0,6                           |
| Textil, Bekleidung, Spedition    | 0,6                           |
| Wäschereien                      | 0,6                           |

**Tabelle 3.14:** Mittlere tägliche Luftwechselraten in Nichtwohngebäuden gemäß DIN V 18599-10

### 3.3.2 Infiltration

Die Infiltration, also die Summe aus Fugenlüftung und Fensterlüftung, spielt insbesondere bei sehr undichten Gebäuden eine nennenswerte energetische Rolle. Grundsätzlich liegt dieser Beitrag gemäß DIN 1946-6 üblicherweise in einer Größenordnung von  $0,05 \dots 0,4 \text{ h}^{-1}$ . Hält man die Werte aus DIN V 4108-6 mit  $0,6$  bzw.  $0,7 \text{ h}^{-1}$  zum ersten Vergleich dagegen, so kann dies also durchaus einen nennenswerten Beitrag darstellen. In Übereinstimmung mit DIN 4108-6 und DIN V 18599 wird in GEMOD die Infiltrationsrate für Gebäude mit mechanischer Lüftung wie folgt bestimmt:

$$n_{\text{Inf}} = n_{50} \cdot 0,07$$

Die Anwendung von DIN 1946-6 führt durch die dort verankerte Abhängigkeit der Infiltration von der Wohnungsgröße zu leicht erhöhten Werten, insbesondere bei großen Wohnungen. Da erstgenannte Normen in der energetischen Bilanzierung maßgeblich sind, finden diese hier auch Anwendung.

Bei der Analyse des Komforts oder des Feuchteschutzes an den Infiltrationspunkten kann diese u.U. zu beachtlichen Problemen führen. Bei der energetischen Analyse dagegen, um die es sich an dieser Stelle ja ausschließlich handelt, bietet sich folgendes Vorgehen an:

In Gebäuden ohne Wärmerückgewinnungsanlagen wird die Infiltration ausreichend in den Vorgaben der DIN V 4108-6 durch die anzusetzenden Luftwechselraten der freien Lüftung berücksichtigt. Für sehr dichte Gebäude ( $n_{50}$ -Wert  $< 0,5 \text{ h}^{-1}$ ) wird die Luftwechselrate im Folgenden durch den Rückgriff auf den ehemals geltenden hygienischen Mindestluftwechsel der DIN V 4108-6 in Höhe von  $0,5 \text{ h}^{-1}$  noch weiter gesenkt. Dieses Vorgehen steht dabei im Einklang mit der Mindestlüftung gemäß DIN 1946-6.

### 3.3.3 Wärmerückgewinnung

Gebäude mit Wärmerückgewinnungsanlagen werden maschinell be- und entlüftet. Der Anlagenluftwechsel beträgt gemäß DIN V 4108-6 in Wohngebäuden  $0,4 \text{ h}^{-1}$ . Zur Bestimmung der Luftwechselraten und der Betriebszeiten in Nichtwohngebäuden wird DIN V 18599-10

herangezogen. Für die einzelnen Gebäudetypen mündet dies in die nachfolgende dargestellten mittleren täglichen (8760 Std/a) Luftwechselraten.

Die Anzahl der bereits installierten Wärmerückgewinnungsanlagen in Wohngebäuden ist der Datenbasis (IWU/BEI, 2010) entnommen. So verfügten 2010 rund 0,8 % der Wohngebäude über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Die Anzahl der Anlagen in Nichtwohngebäuden wurde anhand von Marktstatistiken möglichst plausibel abgeschätzt. Die Zuwächse bei zukünftig zu installierenden Wärmerückgewinnungsanlagen orientieren sich an der aktuellen Marktentwicklung. Sie werden für die Szenarien unterschiedlich hoch extrapoliert. Die Wärmerückgewinnungsgrade streuen dabei je nach angenommenen Baujahren, Technologien und Anwendungsbereichen zwischen 60 und 95 %.

Bei der Zuordnung der Wärmerückgewinnungsanlagen zu den Gebäuden wurde unterstellt, dass sie heute wie auch in Zukunft nur eingesetzt werden, wenn bereits ein gewisser Mindestdämmstandard erzielt wurde. Aus diesem Grund wurde im GEMOD-Modell ein bereits vorhandener mittlerer Transmissionswärmeverlustwert  $H_t'$  von  $0,5 \text{ W/m}^2\text{a}$  als Mindestvoraussetzung für den Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage im Wohnbereich eingeführt.

### 3.4 Verbrauchs/Bedarfsabgleich

Das Modell wird um einen Bedarfs/Verbrauchsabgleich erweitert. Hierzu werden den einzelnen Gebäudetypen typische empirische Verbrauchsdaten zugeordnet. Dabei wird sowohl der Sanierungszustand der Gebäude berücksichtigt wie auch das Nutzerverhalten und weitere Faktoren, die einen Einfluss auf den Heizwärmeverbrauch haben. Diskrepanzen zwischen den Verbrauchs- und Bedarfsdaten werden in Form eines vom Gebäudetyp, von der Zeit (bis 2050) und von den Energiekosten abhängigen Korrekturfaktors den Gebäuden aufgeprägt.

#### 3.4.1 Beschreibung der Problematik

Der tatsächliche Energieverbrauch in Gebäuden weicht zum Teil erheblich vom berechneten Bedarf ab. Dies hat in der Vergangenheit oft dazu geführt, dass Einsparpotenziale von energetischen Sanierungen tendenziell überschätzt wurden. Um solche systematischen Fehler bei der Berechnung der Szenarien mit GEMOD zu vermeiden, werden die Ursachen dieser Abweichungen untersucht und vorhandene empirische Quellen ausgewertet.

##### 3.4.1.1 Beeinflussende Faktoren

Das Nutzerverhalten beeinflusst den Energieverbrauch insbesondere in den folgenden Bereichen.

##### Innentemperatur

Die Innentemperaturen in sanierten Gebäuden sind oftmals höher als in unsanierten Gebäuden. Zum einen ist es in unsanierten Gebäuden häufig gar nicht möglich, eine behagliche Temperatur zu erreichen, weil der technische Wärmeschutz zu gering ist. Zum anderen ist eine volle Beheizung in unsanierten Gebäuden oft mit sehr hohen Heizkosten verbunden. In Gebäuden mit hohem Wärmeschutz hingegen, können höhere Raumtemperaturen sowohl technisch als auch wirtschaftlich erschwinglich realisiert werden. Die Verheißung niedriger Heizkosten kann hier auch zu einer gewissen Sorglosigkeit im Umgang mit Heizwärme führen (siehe Kapitel 3.5). Die Innentemperatur geht als besonders sensible Größe in die Bedarfsberechnung ein.

## Warmwasser

Wie in Kapitel 3.2 gezeigt, können die empirisch ermittelten Warmwasserverbräuche individuell stark von den Vorgaben der Berechnungsnormen abweichen.

## Lüftung

Der Heizwärmeverbrauch wird maßgeblich über individuelles Lüftungsverhalten und passive Fugenlüftung beeinflusst. Die in DIN 4108-6 oder DIN V 18599 enthaltenen Ansätze können naturgemäß nur ein mittleres Lüftungsverhalten unterstellen. Dennoch hängt das Lüftungsverhalten stark vom persönlichen Empfinden ab und kann stark von dem „Norm-Verhalten abweichen.

Zusätzlich können Lüftungswärmeverluste durch Leckagen in der Gebäudehülle auftreten. Diese führen zu einem permanenten Luftwechsel zwischen Innen und Außen und damit zu unkontrollierten Wärmeverlusten, die sich durch erhöhte Energieverbräuche bemerkbar machen. Die oben beschriebenen Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des  $n_{50}$ -Wertes und zu dessen Umrechnung in die Infiltrationsrate können naturgemäß auch nur eine grobe, mittlere Abschätzung darstellen.

## Nachtabsenkung

Eine weitere Möglichkeit den Verbrauch zu beeinflussen, ist die Absenkung der Raumtemperatur in der Nacht. Hierbei wird die durchschnittliche Raumtemperatur über die Heizungsregelung um wenige Kelvin abgesenkt. Auch in diesem Punkt spielt das individuelle Verhalten eine maßgebliche Rolle.

## Teilbeheizung

Eine Teilbeheizung von Flächen kann durch das individuelle Nutzerverhalten den vorher bestimmten Energiebedarf stark beeinflussen und auch von diesem abweichen. Das kann der Fall sein, wenn Teilflächen der Wohnfläche, wie z.B. der Schlafraum, nicht beheizt werden. Das gleiche kann das beheizte Keller- oder Obergeschoss eines Wohnhauses betreffen, das nach Auszug eines Familienmitgliedes leer steht und damit ungenutzt ist.

### 3.4.1.2 Resultierende Effekte

All diese Faktoren wirken sich jeweils auf den Energieverbrauch aus. Sie können diesen auf zwei verschiedene Weisen beeinflussen. In der Literatur werden diese Auswirkungen als Rebound-Effekt und - in Anlehnung daran - als Prebound-Effekt beschrieben.

#### Rebound-Effekt

Der Rebound-Effekt wird, wie in der Grafik abgebildet und vielfach in der Literatur beschrieben, durch eine Effizienzsteigerung von Gebäuden oder auch anderen Produkten hervorgerufen. Denn ein vormals sparsames Verhalten des Verbrauchers, z.B. durch zu hohe Heizkosten, wird aufgegeben, wenn z.B. ein Heizsystem erneuert wurde. Beim Verbraucher entsteht das Gefühl, nicht mehr so stark auf seinen Verbrauch achten zu müssen und er ändert sein Verhalten. Tatsächlich steigt auf Grund dieser Denkweise sein Verbrauch gegenüber der Bedarfsberechnung.

#### Prebound-Effekt

Der Prebound beschreibt das Verhalten, das dem Rebound-Effekt vorweg geht. Denn besitzt ein Verbraucher z.B. ein älteres Heizsystem, verbraucht dieses mehr Energie und kostet ihn effektiv mehr. Doch um Kosten einzusparen, heizt dieser z.B. nur einzelne Räume. Dadurch verbraucht er effektiv weniger Energie als berechnet. Der Verbrauch liegt unter dem Bedarf.

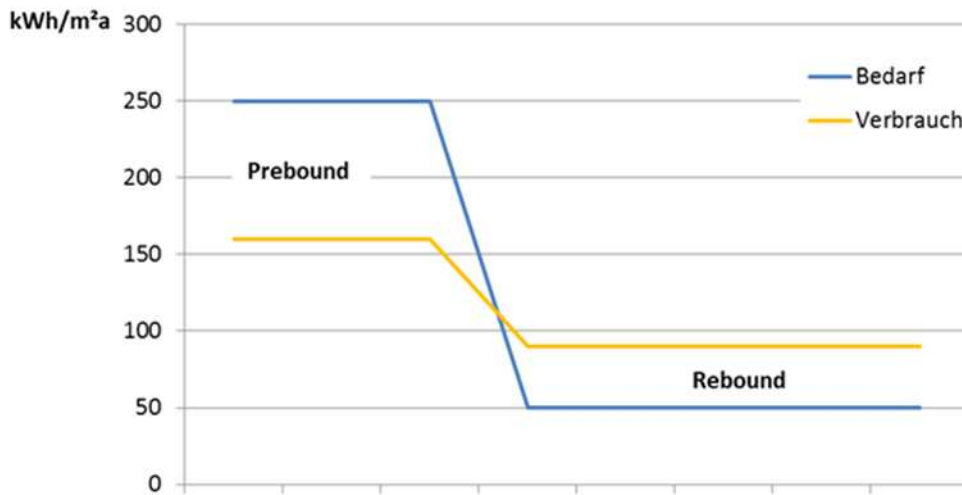


Abbildung 3.21: Rebound- und Prebound-Effekt

Das tatsächliche Einsparpotenzial von energetischen Sanierungsmaßnahmen wird durch diese Effekte von zwei Seiten eingeschränkt. Im Einzelgebäude wie im Gesamtbestand ist es für die Planung künftiger Maßnahmen immanent wichtig, diese Effekte zu berücksichtigen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass Entscheidungen auf falschen Grundlagen getroffen werden (vergleiche Potenzial der blauen Kurve gegen orangefarbene Kurve).

### 3.4.2 Stand des Wissens

Um den Zusammenhang zwischen Energiebedarf und –verbrauch im Gebäudemodell GEMOD numerisch abbilden zu können, wurden sechs Studien ausgewertet (Tabelle 3.15). Sie wurden anhand der in ihnen dokumentierten Stichprobengröße, der Stichprobenart und ihrer Aktualität ausgewählt. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurden sie in eine einheitliche Darstellung überführt. Die Ergebnisse wurden – wo noch nicht geschehen – in Verbrauchsfaktoren umgerechnet und in Abhängigkeit von den Energieeffizienzklassen aus EnEV Anlage 10 aufgetragen. Diese reichen von A+ (<30 kWh/m² a) bis H (>250 kWh/m² a) und sind damit in Klassen unterteilt.

Die Verbrauchsfaktoren wurden gebildet, wie in (EDF et al., 2013) beschreiben: hier ist der „Heating Factor“ der Quotient aus Verbrauch und Bedarf:

$$\text{Verbrauchsfaktor} = \frac{\text{Endenergieverbrauch}}{\text{Endenergiebedarf}}$$

Ein Verbrauchsfaktor von 1 sagt aus, dass der theoretisch angenommene Endenergiebedarf dem tatsächlichen Verbrauch entspricht. Liegt dieser Wert unter 1 ist der Verbrauch geringer als der theoretisch angenommene Bedarf. Ist dagegen der Bedarf geringer liegt der Verbrauchsfaktor über 1. Der Verbrauchsfaktor wurde der entsprechenden Effizienzklasse, die über den Bedarf ermittelt wurde, zugeordnet.

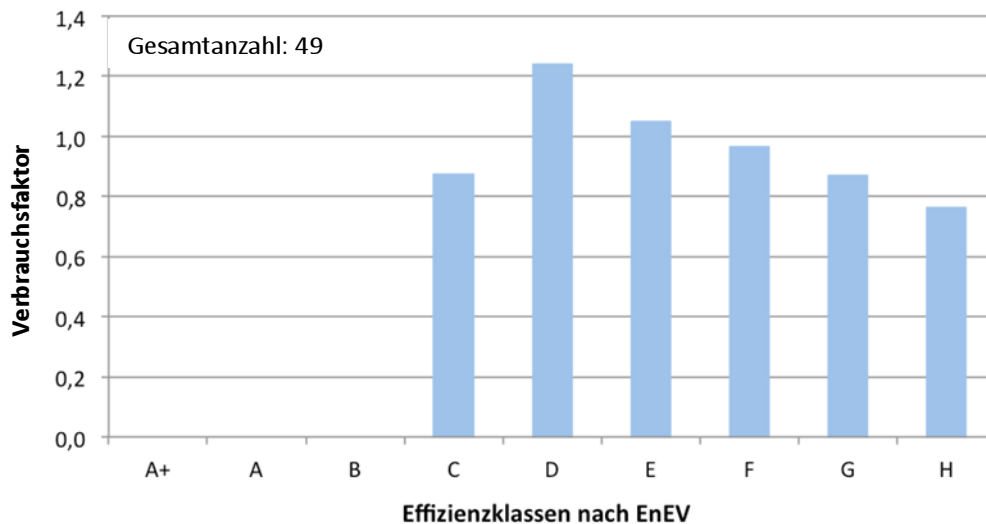
| Autor                                                             | Thema                                                                                                                                                        | Stichprobengröße                                          | Art der Stichprobe                 |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------|
| dena<br>Deutsche Energie-Agentur<br>2012                          | Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizient sanierter Wohngebäude;<br>Begleitforschung zum dena-Modellvorhaben Effizienzhäuser                      | keine Angabe                                              | Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäuser |
| Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.<br>ARGE-SH<br>2011 | Tatsächliche Energieverbräuche, berechnete Energiestandards;<br>Erfahrung aus Schleswig-Holstein                                                             | 49                                                        | keine Angabe                       |
| IFEU<br>2005                                                      | Verbrauchs- oder Bedarfspass? Anforderungen an den Energiepass für Wohngebäude aus Sicht privater Käufer und Mieter                                          | 99                                                        | Einfamilienhäuser                  |
| Fraunhofer ISI et al.<br>2005                                     | Energiepass für Gebäude: Evaluation des Feldversuchs                                                                                                         | 761                                                       | Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäuser |
| IWU<br>2011                                                       | Deutsche Gebäudetypologie Beispielhafte Maßnahmen zu Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden                                            | 1700                                                      | keine Angabe                       |
| EDF<br>(Electricité de France) et al.<br>2013                     | Back to reality: How domestic energy efficiency policies in four European countries can be improved by using empirical data instead of normative calculation | Niederlande: 4.700 Haushalte<br>Frankreich: 900 Wohnungen | Haushalte, Wohnungen, Wohngebäude  |

**Tabelle 3.15:** Auflistung aller betrachteten Studien zum Thema **Verbrauchs-Bedarfsabgleich**

### 3.4.3 Empirische Ergebnisse

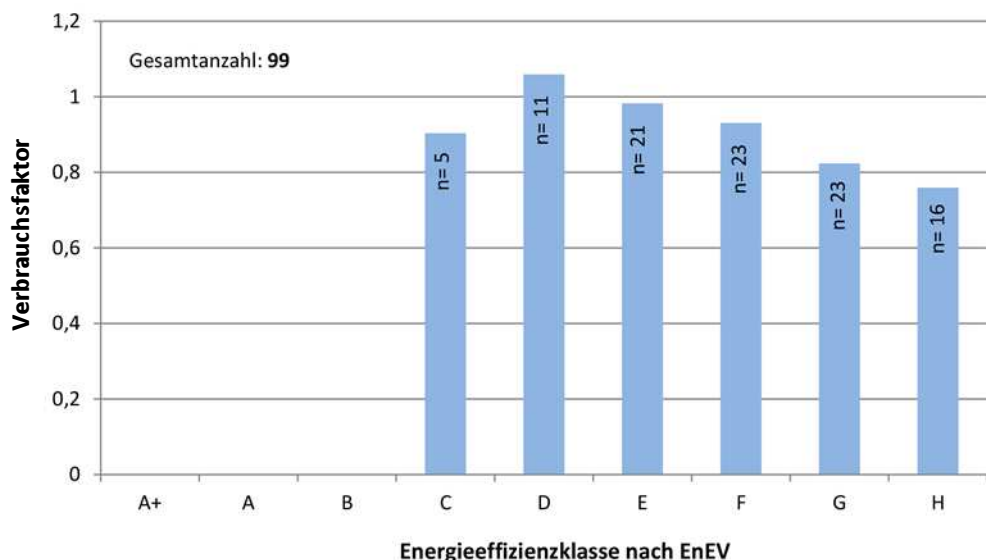
Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte der empirischen Ergebnisse kurz erläutert. Alle Diagramme sind so aufgebaut, dass sie den Verbrauchsfaktor in Abhängigkeit von der Energieeffizienzklasse (auf Bedarfsbasis) abbilden. Die jeweilige Stichprobengröße ist jeweils in den Diagrammen vermerkt und gibt Auskunft über die Belastbarkeit der einzelnen Werte.

Die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen hat eine Erhebung der in 49 Gebäuden durchgeführt (ARGE-SH, 2011). Die Stichprobe ist mit 49 Gebäuden verhältnismäßig klein und weist zudem in den effizienteren Klassen A+ bis B keine Werte aus.



**Abbildung 3.22:** Verbrauchs faktor für die untersuchten 49 Gebäude und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (ARGE-SH, 2011), eigene Darstellung)

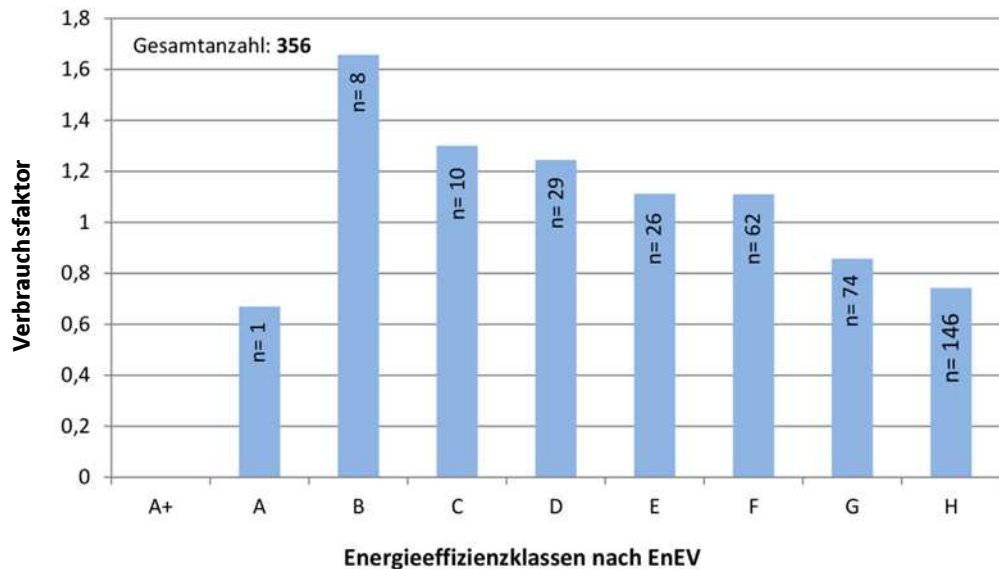
In „Verbrauchs- oder Bedarfspass, Anforderungen an den Energiepass für Wohngebäude aus Sicht privater Käufer und Mieter“ (IFEU, 2005) wurden verschieden große Einfamilienhäuser in den Städten Heidelberg, Mannheim und Koblenz betrachtet, die sich vorwiegend auf die Klassen C bis H aufteilen. Jedoch mangelt es auch dieser Studie an Angaben zu Gebäuden in den effizienteren Klassen. Zu beobachten ist aber ein relativ linearer Abfall des Verbrauchs faktors von Klasse D bis Klasse H, wie es auch schon bei der Studie der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen der Fall ist.



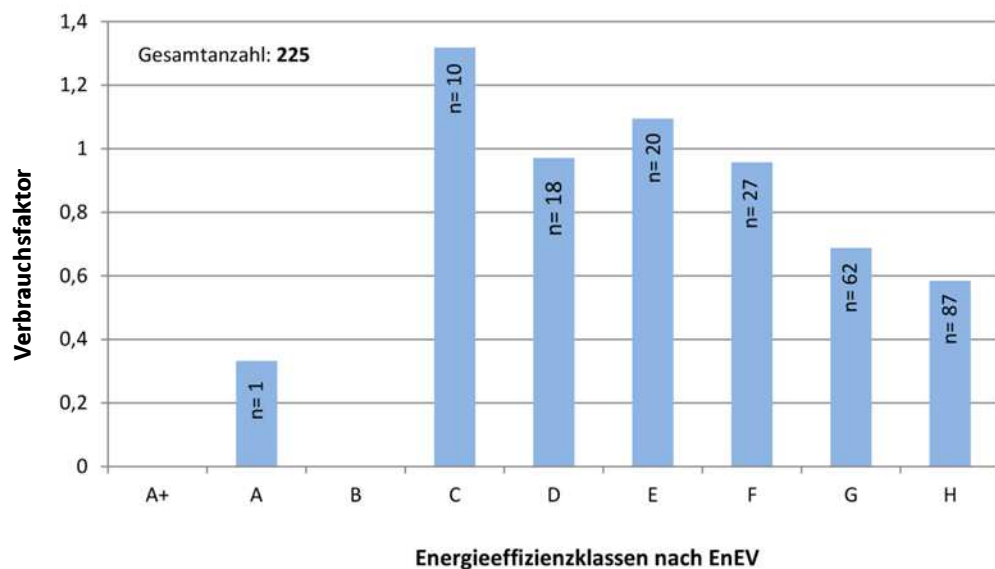
**Abbildung 3.23:** Verbrauchs faktor für die untersuchten 99 Gebäude und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (IFEU, 2005), eigene Darstellung)

Das Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung hat im Zuge der Entwicklung des Energieausweises einen Feldversuch der Deutschen Energieagentur evaluiert (Fraunhofer ISI et al., 2005). Die Studie weist eine große Stichprobe auf und untergliedert diese jeweils in

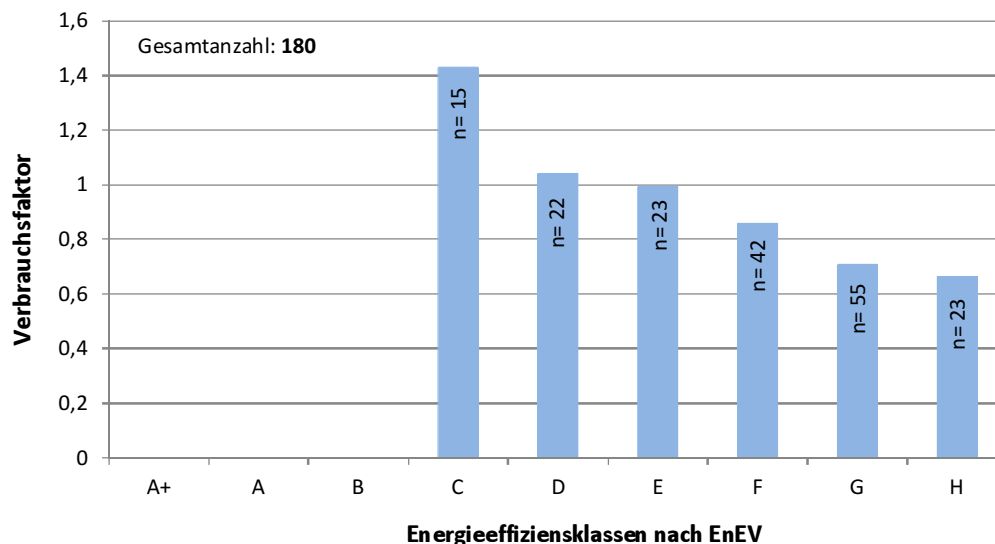
Gebäudeklassen (Ein- und Zweifamilienhäuser, 3 bis 6 Wohneinheiten, 7-12 Wohneinheiten). Leider fehlen auch hier Angaben in den höheren Effizienzklassen zu Energieverbrauch und Bedarf, um eine fundierte Aussage treffen zu können. Eine wesentliche Beobachtung jedoch ist, dass die Differenz zwischen Verbrauch und Bedarf in den Gebäuden mit mehreren Wohneinheiten geringer ist, als in den Ein- bis Zweifamilienhäuser.



**Abbildung 3.24:** Verbrauchsfaktor für die untersuchten 356 Ein- und Zweifamilienhäuser und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (Fraunhofer ISI et al., 2005), eigene Darstellung)



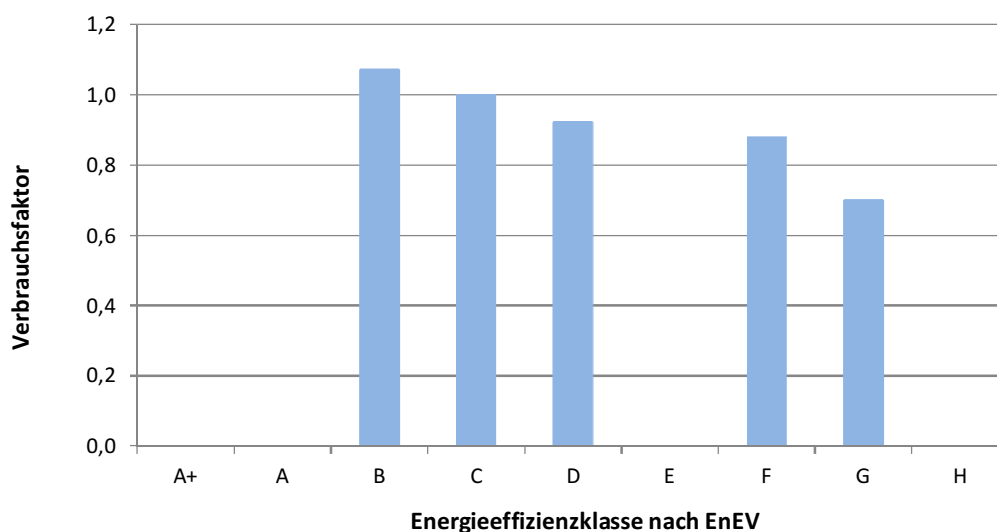
**Abbildung 3.25:** Verbrauchsfaktor für die untersuchten 225 Gebäude mit 3-6 Wohneinheiten und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (Fraunhofer ISI et al., 2005), eigene Darstellung)



**Abbildung 3.26:** Verbrauchsfaktor für die untersuchten 180 Gebäude mit 7-12 Wohneinheiten und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (Fraunhofer ISI et al, 2005), eigene Darstellung)

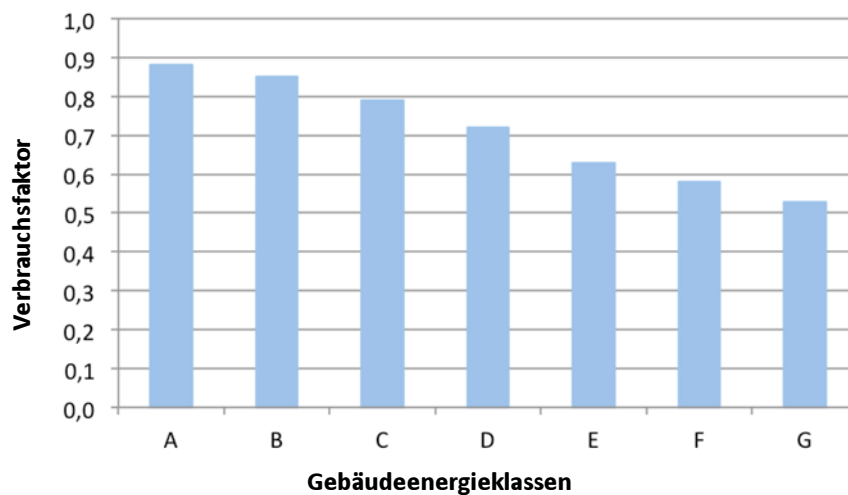
Der „dena-Gebäudereport 2012: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand“ (dena, 2012) untersucht u.a. auch neue Gebäude, die zum Zeitpunkt der Analyse mindestens zwei Winter bewohnt waren. Hierzu wurden 35.000 Energiebedarfs- und -verbrauchsausweise ausgewertet. Doch auch hier liegen nur begrenzt Datensätze für Gebäude vor, die jünger als 2005 sind. Damit sind gerade die Daten in diesem Bereich mit größeren Unklarheiten behaftet und somit nicht vollständig belastbar. Für ältere Gebäude wird eine grundsätzliche Differenz in der mittleren Höhe von 30 % zwischen den Energieverbrauchswerten und den Endenergiebedarfswerten konstatiert (Bedarf 30 % höher als Verbrauch). Als Ursachen für die Abweichungen werden die Nutzergewohnheiten, individuelle Teilbeheizung und Lüftung sowie die Klimabereinigung genannt. Aber auch temporäre Leerstände - z.B. bei Nutzerwechsel - spielen eine Rolle.

Abbildung 3.27 zeigt die Ergebnisse. Die Anzahl der Gebäude und die Gebäudearten werden im Einzelnen leider nicht beschrieben. Doch auch hier ist der zuvor schon beobachtete nahezu lineare Verlauf der Verbrauchs-Bedarfsfaktoren der einzelnen Klassen von A+ bis H sichtbar.

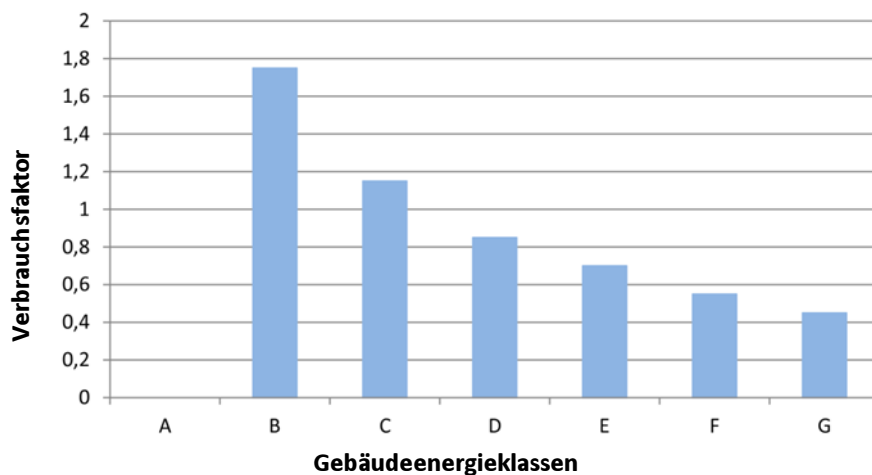


**Abbildung 3.27:** Verbrauchsfaktor für die untersuchten Gebäude und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV; Quelle: (dena, 2012), eigene Darstellung

In (EDF et al., 2013) wurden Verbrauch und Bedarf von 4.700 Haushalten in den Niederlanden und 900 Gebäuden in Frankreich verglichen (Abbildung 3.28 und Abbildung 3.29). Hier wurden die gleichen Pre- und Rebound-Effekte beobachtet wie in Deutschland. Allerdings sind die Ergebnisse nicht ohne weiteres mit denen in Deutschland vergleichbar. So unterscheiden sich neben den Klimabedingungen auch die Berechnungsverfahren für den Energiebedarf. Auch unterscheiden sich die Effizienzklassen durch die Berechnungsmethode und die Klassengrenzen von jenen in Deutschland. Die Ergebnisse von (EDF et al., 2013) werden daher nur qualitativ als zusätzliche Bestätigung herangezogen.



**Abbildung 3.28:** Ergebnis der Untersuchungen zum Pre- und Reboundeffekt an 4.700 Haushalten in den Niederlanden (EDF et al., 2013) und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV



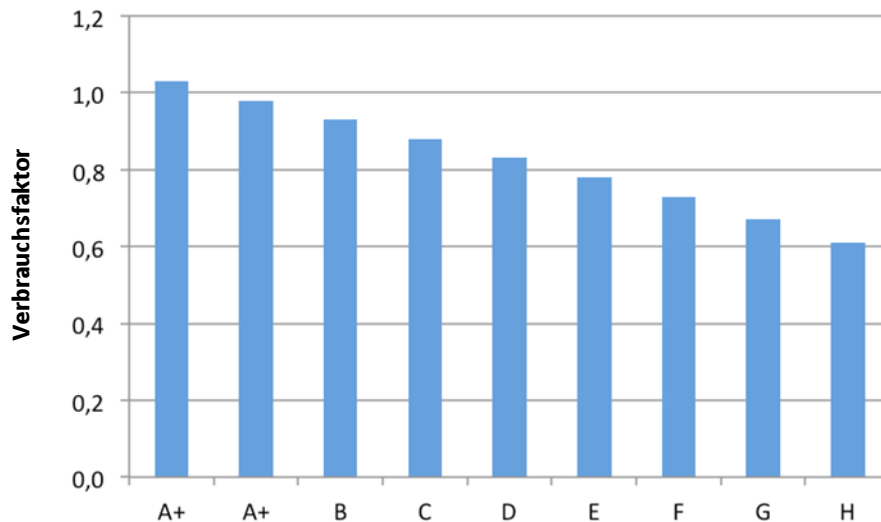
**Abbildung 3.29:** Ergebnis der Untersuchungen zum Pre- und Reboundeffekt an 900 Gebäuden in Frankreich (EDF et al., 2013) und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV

Das Institut für Wohnen und Umwelt hat in „Deutsche Gebäudetypologie, Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäude“ (IWU, 2011) ein vereinfachtes Verfahren entwickelt, um für Bestandsgebäude den Energiebedarf für Heizung und Warmwasser zu berechnen. Dabei wurde auf eine Analyse aus 1.700 Bestandsgebäuden in Darmstadt zurückgegriffen sowie auf eine Auswertung des Energiepass-Feldversuchs der dena. Auch hier kam man zu der Erkenntnis, dass der Energieverbrauch deutlich niedriger ausfällt als der berechnete Bedarf. Das betrifft vor allem Gebäude in einem energetisch schlechteren Zustand.

Darauf aufbauend wurde eine Funktion abgeleitet, die den Verbrauchsfaktor in Abhängigkeit vom Endenergiebedarf ausdrückt:

$$\text{Verbrauchsfaktor} = -0,2 + \frac{1,3}{1 + q_e / 500}$$

Dadurch ergibt sich über alle Effizienzklassen folgendes Bild:



**Abbildung 3.30: Mittlerer Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Energiebedarf (Quelle: eigene Darstellung basierend auf IWU 2011)**

Auch diese Betrachtung bestätigt schon die vorherigen Beobachtungen der anderen Studien. Denn auch hier fällt der Verbrauchsfaktor von Klasse A+ bis H konstant ab. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse im Überblick.

| Autor                      | Stichprobengröße | Stichprobenart                     | A+            | A             | B             | C              | D              | E              | F              | G              | H               |
|----------------------------|------------------|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Deutschland                |                  |                                    |               |               |               |                |                |                |                |                |                 |
| Fraunhofer ISI et al. 2005 | 356              | EFH/ZFH                            | 0,00<br>(n=0) | 0,67<br>(n=1) | 1,65<br>(n=8) | 1,30<br>(n=10) | 1,24<br>(n=29) | 1,11<br>(n=26) | 1,11<br>(n=62) | 0,85<br>(n=74) | 0,74<br>(n=146) |
|                            | 225              | 3-6 Wohneinheiten                  | 0,00<br>(n=0) | 0,33<br>(n=1) | 0,00<br>(n=0) | 1,32<br>(n=10) | 0,97<br>(n=18) | 1,09<br>(n=20) | 0,95<br>(n=27) | 0,69<br>(n=62) | 0,58<br>(n=87)  |
|                            | 180              | 7-12 Wohneinheiten                 | 0,00<br>(n=0) | 0,00<br>(n=0) | 0,00<br>(n=0) | 1,43<br>(n=15) | 1,04<br>(n=22) | 0,99<br>(n=23) | 0,86<br>(n=42) | 0,71<br>(n=55) | 0,66<br>(n=23)  |
| dena 2012                  | keine Angabe     | Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäuser | 0,00          | 0,00          | 1,07          | 1,00           | 0,92           | 0,00           | 0,88           | 0,70           | 0,00            |
| ifeu 2005                  | 99               | Einfamilienhäuser                  | 0,00<br>(n=0) | 0,00<br>(n=0) | 0,00<br>(n=0) | 0,90<br>(n=5)  | 1,06<br>(n=11) | 0,98<br>(n=22) | 0,93<br>(n=23) | 0,82<br>(n=22) | 0,76<br>(n=16)  |
| Arge Kiel 2010             | 49               | keine Angabe                       | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,87           | 1,24           | 1,05           | 0,96           | 0,87           | 0,76            |
| IWU 2011                   | 1700             | keine Angabe                       | 1,03          | 0,98          | 0,93          | 0,88           | 0,83           | 0,78           | 0,73           | 0,67           | 0,61            |
| Niederlande und Frankreich |                  |                                    |               |               |               |                |                |                |                |                |                 |
| EDF et al. 2013            | NL               | 4700 Haushalte                     | 0,00          | 0,88          | 0,85          | 0,79           | 0,72           | 0,63           | 0,58           | 0,53           | 0,00            |
|                            | F                | 900 Wohnungen                      | 0,00          | 0,00          | 1,75          | 1,15           | 0,85           | 0,70           | 0,55           | 0,45           | 0,00            |

**Tabelle 3.16: Vergleich der Verbrauchsfaktoren der verschiedenen Quellen**

Alle Studien bilden das Verhältnis von Energieverbrauch zu Energiebedarf mit einem ähnlichen Verlauf ab, der besagt, dass der tatsächliche Verbrauch umso stärker vom Bedarf abweicht, je höher der Bedarf ist.

Die Effizienzklassen A+ bis B sind nur in (IWU, 2011) hinreichend genau zu belegen. Auch die Größe der Stichprobe ist mit 1.700 Gebäuden die höchste und damit am stärksten belastbare. Die Aufführung der Werte aus den Niederlanden und Frankreich, dient nur der Information und soll den beobachteten Trend zusätzlich stützen. Für weitere Berechnungen sind diese Werte jedoch nicht relevant. Aus diesen Gründen werden die Verbrauchsfaktoren aus (IWU, 2011) für das Gebäudemodell GEMOD verwendet.

### 3.5 Einfluss der Sozioökonomie auf den Energieverbrauch

Im Folgenden wird das Nutzerverhalten nach unterschiedlichen Nutzergruppen – so genannten Milieus – differenziert. Damit wird es möglich, die Treiber und Hemmnisse von Verbrauchs/Bedarfsabweichungen genauer zu adressieren und Wirkmechanismen besser zu verstehen. In weiterführenden Projekten könnte mit dieser Zuordnung zum Beispiel auch die Wirkmächtigkeit künftiger Instrumente (z.B. steuerliche Abschreibung von energetischen Sanierungen) differenziert untersucht werden. Die sozialen Milieus grenzen sich voneinander durch ihre soziale Lage und ihre Werteorientierung ab. In der Umweltpsychologie aber auch im Marketing ist der Milieu-Ansatz ein etabliertes Verfahren, um Verhaltensweisen zu kategorisieren und Reaktionsweisen zu antizipieren (z.B. auf steigende Energiekosten).

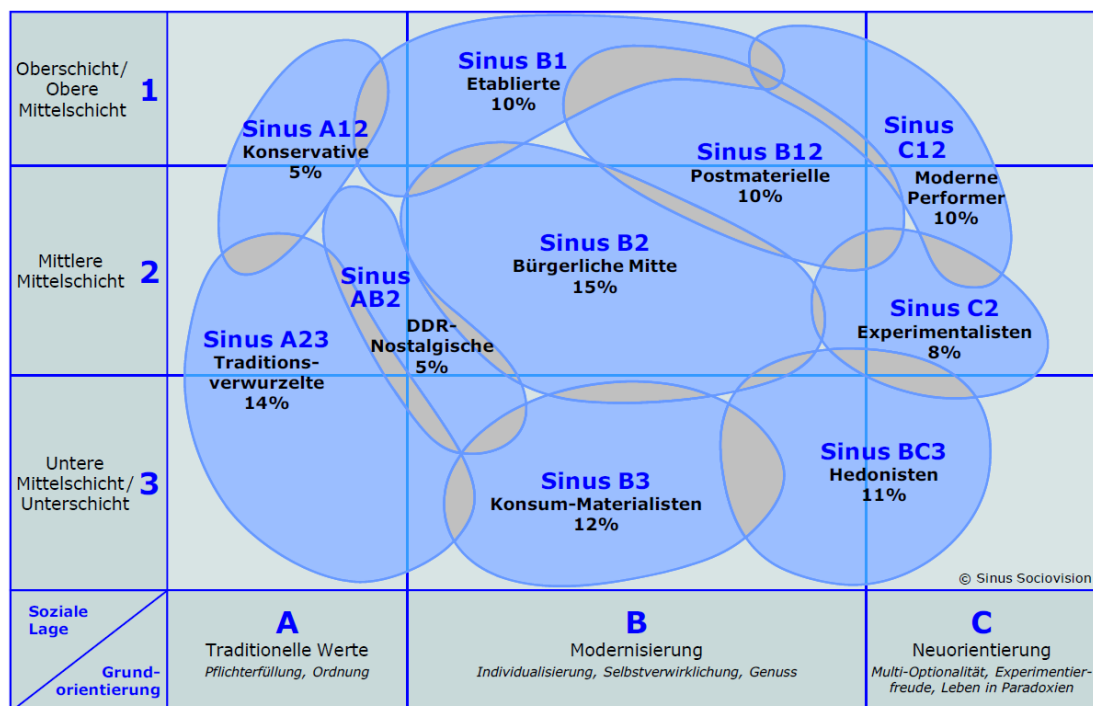


Abbildung 3.31: Definition der Milieus nach Grundorientierung und sozialer Lage (Sinus Sociovision GmbH, 2009)

Es liegen bisher keine Untersuchungen dazu vor, welche Milieus bevorzugt in welchen Gebäudetypen wohnen. In diesem Projekt wird eine erste Zuordnung der Milieus zu den Gebäudetypen vorgenommen. Dazu werden die Angaben zum mittleren Haushaltseinkommen der Milieus verschnitten mit einer Erhebung des Statistischen Bundesamts über die Verteilung des mittleren Haushaltseinkommens in sechs verschiedenen Gebäudetypen (Einfamilienhäuser, Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser jeweils in den Baualtersklassen bis 1990 und nach

1990) (Destatis, 2012, S. 266). Dabei werden für nicht bekannte Einflussgrößen plausible Schätzwerte angesetzt, wie zum Beispiel für die Formen der Verteilungskurven um das mittlere Einkommen der Milieus. Da Zweifamilienhäuser in der Typologie der Wohngebäude nicht eigens ausgewiesen werden, werden sie den Einfamilienhäusern zugeschlagen. Somit können die Milieus nur vier verschiedenen Gebäudetypen zugeordnet werden:

- Einfamilienhäuser bis 1990
- Einfamilienhäuser nach 1990
- Mehrfamilienhäuser bis 1990
- Mehrfamilienhäuser nach 1990

Jeder dieser Mikrozensus-Gebäudetypen umfasst mehrere Typologie-Gebäude („Einfamilienhäuser bis 1990“ umfasst zum Beispiel freistehende Einfamilienhäuser und Reihenhäusern aus sieben Baualtersklassen). Die Milieus werden innerhalb der Mikrozensus-Gebäudetypen statistisch gleichverteilt. Eine weitere Differenzierung findet mangels Daten nicht statt (z.B. welches Milieu ist stärker in besonders alten Gebäuden vertreten).

| <b>Gesellschaftliche Leitmilieus</b> |                       |     |                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------|-----------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sinus B1                             | Etablierte            | 10% | Das selbstbewusste Establishment: Erfolgs-Ethik, Machbarkeitsdenken und ausgeprägte Exklusivitätsansprüche                                                      |
| Sinus B12                            | Postmaterielle        | 10% | Das aufgeklärte Nach-68er-Milieu: liberale Grundhaltung, postmaterielle Werte und intellektuelle Interessen                                                     |
| Sinus C12                            | Moderne Performer     | 10% | Die junge, unkonventionelle Leistungselite: intensives Leben – beruflich und privat, Multi-Optionalität, Flexibilität und Multimedia-Begeisterung               |
| <b>Traditionelle Milieus</b>         |                       |     |                                                                                                                                                                 |
| Sinus A12                            | Konservative          | 5%  | Das alte deutsche Bildungsbürgertum: konservative Kulturkritik, humanistisch geprägte Pflichtauffassung und gepflegte Umgangsformen                             |
| Sinus A23                            | Traditionsverwurzelte | 14% | Die Sicherheit und Ordnung liebende Kriegsgeneration: verwurzelt in der kleinbürgerlichen Welt bzw. in der traditionellen Arbeiterkultur                        |
| Sinus AB2                            | DDR-Nostalgische      | 5%  | Die resignierten Wende-Verlierer: Festhalten an preußischen Tugenden und altsozialistischen Vorstellungen von Gerechtigkeit und Solidarität                     |
| <b>Mainstream-Milieus</b>            |                       |     |                                                                                                                                                                 |
| Sinus B2                             | Bürgerliche Mitte     | 15% | Der statusorientierte moderne Mainstream: Streben nach beruflicher und sozialer Etablierung, nach gesicherten und harmonischen Verhältnissen                    |
| Sinus B3                             | Konsum-Materialisten  | 12% | Die stark materialistisch geprägte Unterschicht: Anschluss halten an die Konsum-Standards der breiten Mitte als Kompensationsversuch sozialer Benachteiligungen |
| <b>Hedonistische Milieus</b>         |                       |     |                                                                                                                                                                 |
| Sinus C2                             | Experimentalisten     | 8%  | Die extrem individualistische neue Bohème: ungehinderte Sportaneidität, Leben in Widersprüchen, Selbstverständnis als Lifestyle-Avantgarde                      |
| Sinus BC3                            | Hedonisten            | 11% | Die Spaß-orientierte moderne Unterschicht / untere Mittelschicht: Verweigerung von Konventionen und Verhaltenserwartungen der Leistungsgesellschaft             |

**Tabelle 3.17:** Bevölkerungsanteil und Beschreibung der Milieus (Sinus Sociovision GmbH, 2009)

Um das Verhalten der unterschiedlichen Milieus mathematisch abzubilden, werden die Ergebnisse einer Repräsentativumfrage zum Umweltbewusstsein und Umweltverhalten (Sinus Sociovision, Ecolog, 2008) ausgewertet und in Milieu-Verhaltensfaktoren übersetzt. In dieser Umfrage wurden unter anderem die Einstellung zu Umweltthemen und das konkrete spezifische Umweltverhalten der Milieus erhoben. Die Ergebnisse der Umfrage werden in Milieu-Faktoren umgerechnet, die das Verhalten numerisch beschreiben. Sie werden nur aus den Angaben zum Umweltverhalten gebildet, da nur dieses sich konkret im Energieverbrauch auswirkt (siehe Tabelle 3.18).

In der Umfrage wurde lediglich die Zustimmung zu bestimmten Verhaltensthemen quantifiziert, nicht jedoch die tatsächliche Höhe des Energieverbrauchs der einzelnen Milieus. Es darf jedoch davon ausgegangen werden, dass die beiden Größen miteinander korrelieren. Die Korrelation wird andererseits dadurch gestört, dass in den Thesen keinerlei Quantifizierungen enthalten sind. So könnte zwar einerseits die Ausstattung mit Solaranlagen in einem bestimmten Milieu hoch sein, aber andererseits der solare Gewinn durch einen höheren Warmwasserverbrauch überkompensiert werden. Das Verhältnis des Haushaltseinkommens zu den Energiekosten ist ein wichtiger Faktor für das Verbrauchsverhalten, wie auch schon (EDF et al., 2013) feststellten. Dieser Einfluss überlagert die Umfrageergebnisse von (Sinus Sociovision, Ecolog, 2008), so dass zum Beispiel Milieus mit geringer Zustimmung zu Umweltthemen dennoch einen geringen Verbrauch aufweisen können. Diese Einflüsse können in diesem Projekt jedoch nicht berücksichtigt werden.

Die Milieu-Faktoren sind in Tabelle 3.18 in der untersten Zeile dargestellt. Es ist zu prüfen, ob die Höhe der Abweichungen der Milieu-Faktoren vom Mittelwert (1,0) plausibel ist. Ein Anhaltspunkt für die Höhe der Divergenz vom mittleren Verbrauch sind die empirischen Energieverbrauchskennwerte, wie sie den Analysen in Kapitel 3.4 zugrunde liegen. Hier weichen die Verbrauchswerte um etwa  $\pm 50\%$  vom mittleren Wert ab, jedoch liegt eine große Mehrheit der Werte innerhalb eines Bereichs von  $\pm 20\%$  um den Mittelwert. Der Mittelwert aller 10 Milieu-Faktoren beträgt 1,0. Die Bandbreite der Milieu-Faktoren reicht von 0,73 bis 1,48 und bewegt sich damit etwa im Bereich der empirischen Verbrauchsabweichungen.

| Zustimmung zu der Antwortkategorie<br>"mache/ habe ich bereits" in Prozent                                      | Bevölkerung | Etablierte | Postmaterielle | Moderne Performer | Konservative | Traditions-<br>verwurzelte | DDR-<br>Nostalgische | Bürgerliche<br>Mitte | Konsum-<br>Materialisten | Experi-<br>men-<br>talisten | Hedonisten |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|----------------|-------------------|--------------|----------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------|
| Abschalten gerade nicht benötigter Geräte und Lichtquellen                                                      | 74          | 80         | 83             | 76                | 86           | 86                         | 76                   | 79                   | 75                       | 61                          | 46         |
| Ersatz von Glühlampen durch Energiesparlampen                                                                   | 68          | 79         | 78             | 73                | 85           | 69                         | 62                   | 73                   | 64                       | 58                          | 48         |
| Kauf energieeffizienter Geräte                                                                                  | 53          | 66         | 64             | 63                | 76           | 49                         | 44                   | 56                   | 42                       | 45                          | 39         |
| Kraftstoff sparende Fahrweise                                                                                   | 49          | 62         | 63             | 51                | 71           | 46                         | 48                   | 61                   | 40                       | 25                          | 30         |
| Einschränkung von Autofahrten                                                                                   | 41          | 53         | 50             | 36                | 58           | 44                         | 46                   | 41                   | 28                       | 30                          | 34         |
| Fahrten überwiegend mit Fahrrad oder öffentlichem Verkehr                                                       | 38          | 41         | 44             | 47                | 38           | 40                         | 43                   | 34                   | 29                       | 40                          | 32         |
| Kauf Kraftstoff sparender Fahrzeuge                                                                             | 26          | 36         | 34             | 30                | 34           | 23                         | 22                   | 25                   | 19                       | 17                          | 19         |
| Bezug von Ökostrom                                                                                              | 3           | 4          | 11             | 2                 | 3            | 2                          | 0                    | 2                    | 0                        | 4                           | 2          |
| Geldanlagen in erneuerbare Energien (z.B. Anteile an Anlagen, Fonds)                                            | 2           | 4          | 8              | 3                 | 4            | 0                          | 0                    | 1                    | 0                        | 3                           | 1          |
| Eigene Heizung mit Holz                                                                                         | 16          | 29         | 19             | 15                | 28           | 16                         | 11                   | 15                   | 14                       | 11                          | 8          |
| Eigene Wärmepumpe                                                                                               | 3           | 7          | 2              | 0                 | 2            | 1                          | 1                    | 5                    | 3                        | 2                           | 1          |
| Eigene Solaranlage zur Erzeugung von Warmwasser oder Raumwärme (Solarthermie)                                   | 2           | 3          | 3              | 1                 | 2            | 1                          | 2                    | 0                    | 3                        | 4                           | 3          |
| Eigene Solaranlage zur Stromerzeugung (Photovoltaik)                                                            | 2           | 8          | 1              | 1                 | 1            | 0                          | 3                    | 1                    | 2                        | 4                           | 3          |
| Zustimmung zu der Antwortkategorie<br>"stimme voll und ganz zu" in Prozent                                      |             |            |                |                   |              |                            |                      |                      |                          |                             |            |
| Ich achte beim Kauf von Haushaltsgeräten auf einen niedrigen Energieverbrauch                                   | 52          | 68         | 66             | 57                | 84           | 53                         | 52                   | 62                   | 33                       | 40                          | 21         |
| Ich achte darauf, dass Geräte und Produkte, die ich kaufe, möglichst langlebig sind und repariert werden können | 41          | 49         | 49             | 42                | 51           | 42                         | 42                   | 52                   | 29                       | 39                          | 19         |
| Ich kaufe gezielt Obst und Gemüse aus meiner Region                                                             | 28          | 38         | 36             | 26                | 52           | 31                         | 32                   | 29                   | 17                       | 23                          | 15         |
| Ich achte beim Kauf von Textilien darauf, dass sie keine Schadstoffe enthalten                                  | 27          | 44         | 38             | 31                | 35           | 24                         | 21                   | 30                   | 18                       | 22                          | 15         |
| Ich kaufe gezielt Produkte, die bei ihrer Herstellung und Nutzung die Umwelt nur gering belasten                | 22          | 36         | 31             | 25                | 33           | 18                         | 22                   | 23                   | 11                       | 14                          | 19         |
| Ich boykottiere Produkte von Firmen, die sich nachweislich umweltschädigend verhalten                           | 22          | 31         | 34             | 25                | 27           | 16                         | 15                   | 27                   | 15                       | 22                          | 9          |
| Ich bevorzuge Produkte aus fairem Handel                                                                        | 18          | 28         | 21             | 19                | 15           | 12                         | 17                   | 21                   | 15                       | 15                          | 21         |
| Ich verwende in meinen Wohnräumen überwiegend Farben und Lacke mit dem "Blauen Engel"                           | 15          | 23         | 27             | 18                | 20           | 8                          | 13                   | 19                   | 5                        | 10                          | 11         |
| Milieu-Faktor                                                                                                   | 1,00        | 0,74       | 0,77           | 0,91              | 0,73         | 1,01                       | 1,02                 | 0,89                 | 1,27                     | 1,20                        | 1,48       |

**Tabelle 3.18:** Milieuspezifisches Umweltverhalten, eigene Berechnung auf Basis (Sinus Sociovision GmbH, 2009)

Abbildung 3.32 und Abbildung 3.33 zeigen den milieuspezifischen Nutzwärmeverbrauch in Abhängigkeit von den Gebäudetypen. Danach verursachen Konsum-Materialisten und traditionsverwurzelte Milieus die höchsten Verbräuche. Die erstgenannten haben den zweithöchsten Milieu-Faktor aller Milieus und haben zusätzlich einen etwas überproportionalen Bevölkerungsanteil. Die Traditionsverwurzelten haben hingegen nur einen Milieu-Faktor von 1,01, jedoch einen hohen Bevölkerungsanteil. Das Milieu mit dem höchsten Bevölkerungsanteil – die bürgerliche Mitte – hat nur einen geringen Energieverbrauch, weil ihr Milieu-Faktor klein ist. Konservative und etablierte Milieus haben den geringsten Nutzwärmeverbrauch. Sie haben die kleinsten Milieu-Faktoren. Die Konservativen haben zudem noch einen sehr geringen Bevölkerungsanteil.

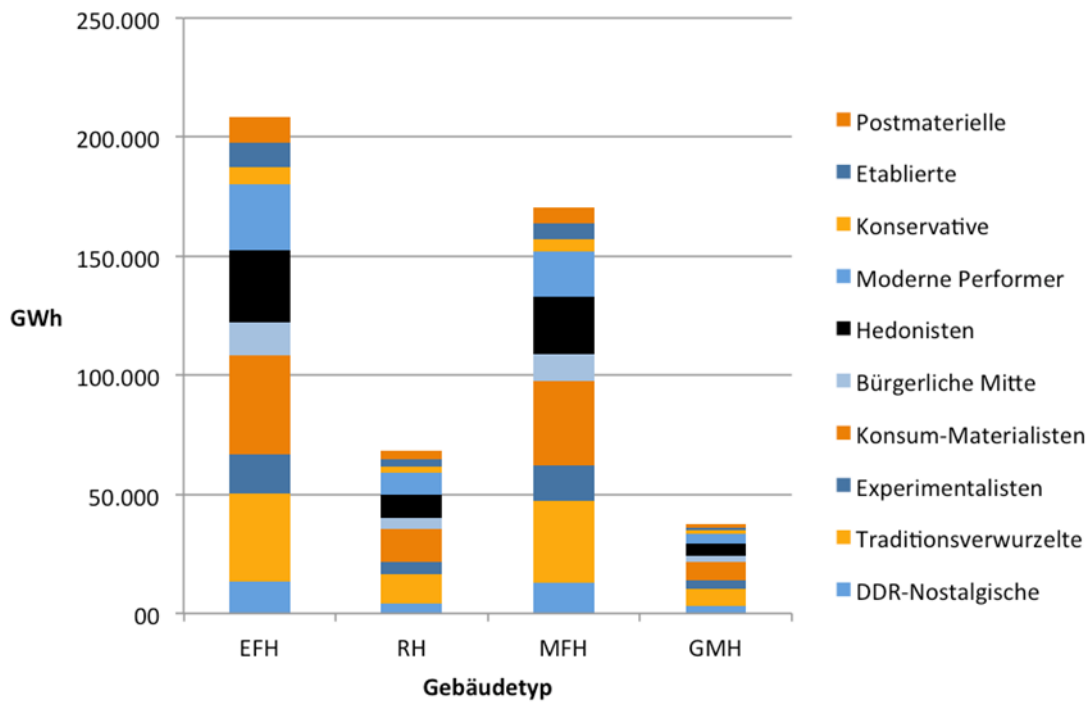


Abbildung 3.32: Milieuspezifischer Nutzwärmeverbrauch im Jahr 2011 nach Gebäudetypen

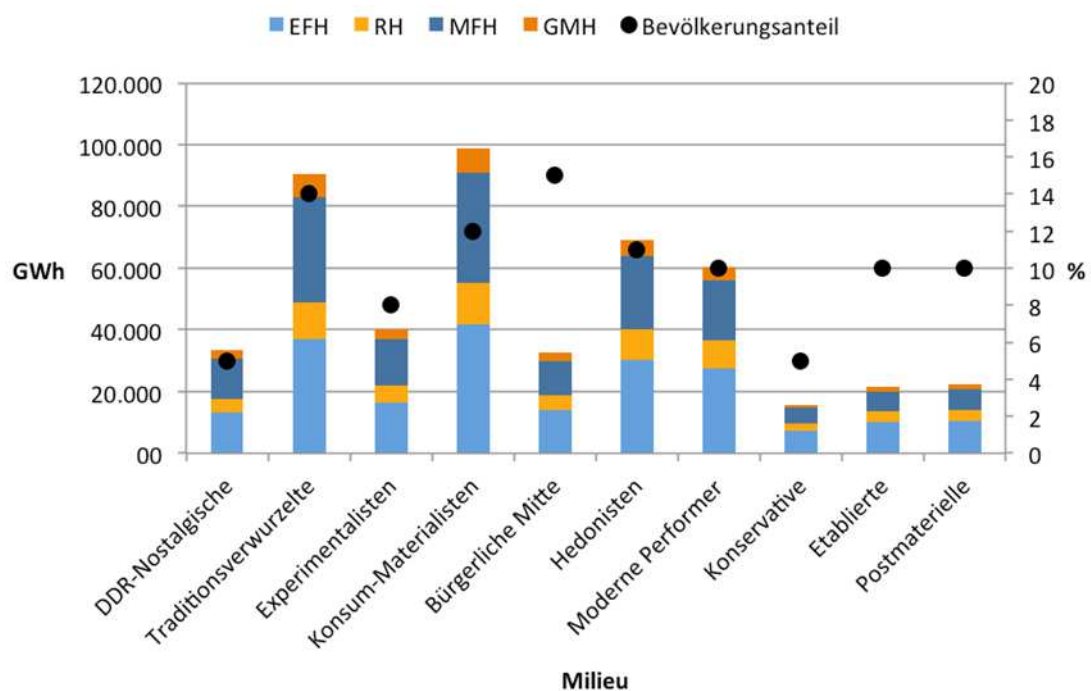


Abbildung 3.33: Milieuspezifischer Nutzwärmeverbrauch und Bevölkerungsanteil im Jahr 2011 nach Milieus

Es liegt auf der Hand, dass der Nutzenergieverbrauch sowohl von der Größe einer Bevölkerungsgruppe als auch von ihrem Nutzerverhalten abhängt. Während die Größe annähernd proportional auf den Energieverbrauch wirken dürfte, ist der Einfluss des Verhaltens hier nicht abschließend quantifizierbar. Die gezeigten Berechnungen zeigen aber, dass das Verhalten den Energieverbrauch durchaus stärker beeinflussen kann als der Bevölkerungsanteil.

## 4 Bestimmung der minimalen Wärmedurchgangskoeffizienten

Um die Einsparpotenziale von Dämm-Maßnahmen im deutschen Gebäudebestand quantifizieren zu können, muss der minimal erreichbare Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der einzelnen Bauteile bestimmt werden. Da die Potenziale für das Jahr 2050 berechnet werden sollen, ist zu berücksichtigen, dass bis dahin wahrscheinlich neue Dämmstoffe am Markt verfügbar sein werden. Es gilt also, nach Untergrenzen für den U-Wert zu suchen, die unabhängig vom verwendeten Material wirksam sind, bzw. die Wirkmechanismen darzustellen, die den minimalen U-Wert determinieren. Dazu wurde zunächst ein Überblick erstellt

- über marktübliche Dämmstoffe und die jeweils erforderlichen Dämmstoffstärken, um einen exemplarischen, sehr ambitionierten U-Wert von  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  zu erreichen,
- über heutige Dämmstoffe der Spitzenforschung, um ggf. Trends für die Zukunft abzuleiten.

Die minimal erreichbaren U-Werte wurden auf vier unterschiedliche Weisen untersucht.

- Extrapolation der Trends historischer U-Werte
- Bestimmung des gesamtenergetischen Minimums unter Berücksichtigung der Herstellungsenergie
- Bestimmung des wirtschaftlichen Minimums auf Bauteilebene
- Bestimmung des wirtschaftlichen Minimums auf Gebäudeebene

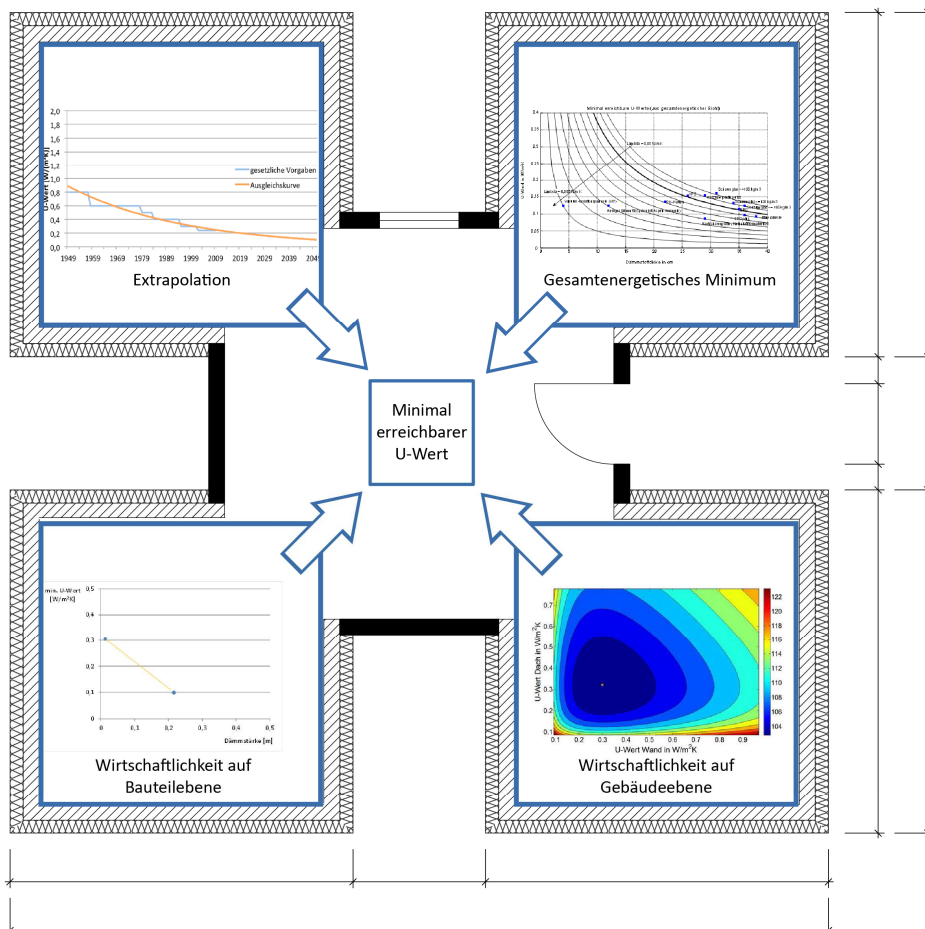


Abbildung 4.1: Vier Analysepfade zur Bestimmung der minimal erreichbaren U-Werte

## 4.1 Wärmedämmmaterialien

### 4.1.1 Marktübliche Dämmstoffe

Die nachfolgende Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Dämmstoffe mit ihren Vor- und Nachteilen. Außerdem wird die Materialdicke dargestellt, die erforderlich ist, um einen U-Wert von  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  zu erreichen. Für diese Materialdicke werden Preis, Primärenergieinhalt und Treibhauspotenzial angegeben. Auf dieser gemeinsamen Basis sind die Kennwerte unmittelbar miteinander vergleichbar. Der untere Heizwert wird ebenfalls angegeben, da diese Energiemenge zurückgewonnen werden kann, wenn das Material nach der Nutzungsphase verbrannt wird. Er geht als Gutschrift in die Ökobilanz der Dämmstoffe ein.

| Dämmstoff                                                       | Beschreibung                                                                                | Vorteile                                                                                    | Schwierigkeiten                                                                                 | $\lambda$<br>W/mK | notwendige<br>Stärke für<br>$U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$<br>m | mittlerer<br>Materialpreis<br>für<br>$U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$<br>€/m <sup>2</sup> | PEI für<br>$U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$<br>kWh/m <sup>2</sup> | Treibhaus-<br>potenzial<br>GWP <sub>100</sub> für<br>$U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$<br>kg CO <sub>2</sub> äq./kg | Heizwert<br>MJ/m <sup>3</sup> |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Vakuum-<br>Isolations-<br>Paneel (VIP)                          | bestehen aus porösem Stützkern, gasdicht abgeschlossen und evakuiert                        | sehr geringe $\lambda$ -Werte, geringe Dämmstärken, Anwendung im Innen- und Außenbereich    | Wärmebrückengefahr<br>Bei Beschädigung Verlust der Wärme-dämmeigenschaften;<br>Sehr hoher Preis | 0,008             | 0,08                                                             | 532,50                                                                                   | 624                                                              | 3,615                                                                                                             | 0                             |
| Aerogel-<br>Granulat<br>(Nanogel)                               | als Granulat vorliegendes Aerogel                                                           | Einblasdämmstoff auch in sehr schmalen Hohlräumen, als TWD in Stegplatten und Profیلgläsern | als Einblasdämmstoff Spezialgeräte erforderlich                                                 | 0,021             | 0,21                                                             | 315,00                                                                                   | k.A.                                                             | k.A.                                                                                                              | 0                             |
| Aerogel<br>Dämm-platten<br>(StoTherm In Aevero, BASF Slentite)  | Als feste Dämmplatte vorliegendes Aerogel                                                   | Einfache Handhabung und Verlegung                                                           | Hoher Preis                                                                                     | 0,016             | 0,16                                                             | 1.920,00                                                                                 | k.A.                                                             | k.A.                                                                                                              | 0                             |
| Aerogel<br>Dämmputz<br>+ Deckputz<br>(Fixit 222 Aerogel)        | Dämmputz mit Aerogel als Zuschlagstoff zur Dämmung der Fassade.                             | Für ein Dämmputzsystem relativ gute Dämmwirkung                                             | Durch eingeschränkte Materialstärke nur geringe Dämmwirkung zu erreichen;<br>Hoher Preis        | 0,028             | 0,28                                                             | 920,92                                                                                   | 1470                                                             | k.A.                                                                                                              | 0                             |
| Aerogel<br>Dämmfilz<br>(Spaceloft Aspen Aerogels)               | Flexibler Dämmfilz als Kombination von Aerogel und Stützfasern                              | Als Dämmfilz einfache Bearbeitung und Verlegung, auch bei komplizierten Formen              | Hoher Preis                                                                                     | 0,014             | 0,14                                                             | 838,58                                                                                   | 300                                                              | k.A.                                                                                                              | 0                             |
| Verbund-<br>dämmplatten<br>mit Aerogelen<br>(Rockwool Aerorock) | Verbunddämmplatte auf Basis von Steinwolleplatten, bereits mit einer Dampfbremse ausgeführt | Bereits mit Dampfbremse ausgeführt                                                          | Plattenanschlüsse müssen luftdicht verklebt werden;<br>hoher Preis                              | 0,019             | 0,19                                                             | 867,35                                                                                   | k.A.                                                             | k.A.                                                                                                              | 0                             |
| Harnstoff-<br>formaldehyd<br>Hartschaum-<br>platte              | Geschäumter, synthetisch organischer Dämmstoff                                              |                                                                                             | Es kann Formaldehyd freigesetzt werden                                                          | 0,029             | 0,29                                                             |                                                                                          | 158                                                              | k.A.                                                                                                              | k.A.                          |
| EPS                                                             | Plattendämmstoff aus geschäumten Polystyrol                                                 | Einfache Bearbeitung und Verlegung als Plattendämmstoff;<br>geringe Kosten                  | Als Erdölprodukt begrenzte Verfügbarkeit der Rohstoffe                                          | 0,036             | 0,36                                                             | 31,68                                                                                    | 214                                                              | 4,169                                                                                                             | 798                           |
| XPS                                                             | Plattendämmstoff aus extrudiertem Polystyrol                                                | Einfache Bearbeitung und Verlegung als Plattendämmstoff                                     | Als Erdölprodukt begrenzte Verfügbarkeit der Rohstoffe                                          | 0,036             | 0,36                                                             | 65,97                                                                                    | 407                                                              | 4,205                                                                                                             | 1833                          |
| PU-Platten                                                      | Plattendämmstoff aus geschäumten Polyurethan                                                | Einfache Bearbeitung und Verlegung als Plattendämmstoff                                     | Begrenzte Verfügbarkeit der Rohstoffe, zum Teil Erdöl als Ausgangsstoff                         | 0,030             | 0,30                                                             | 38,43                                                                                    | 340                                                              | 4,299                                                                                                             | 825                           |
| Perlite                                                         | Durch starkes Erhitzen aufgeblähtes vulkanisches Gesteinsglas                               | Natürlicher Rohstoff;<br>geringe Kosten                                                     | Als Plattenwerkstoff organische Bindemittel                                                     | 0,042             | 0,42                                                             | 14,98                                                                                    | 101                                                              | 0,295                                                                                                             | 0                             |

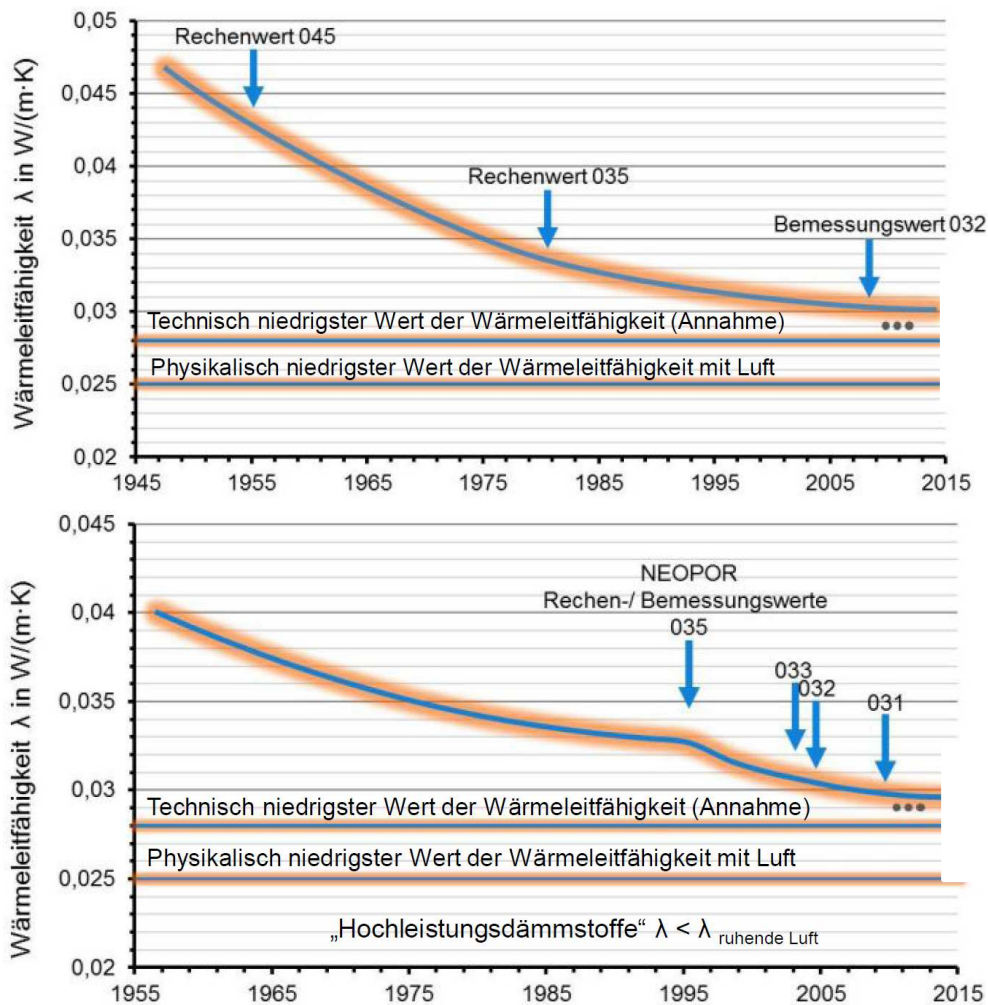
**Tabelle 4.1:** Dämmstoffübersicht marktüblicher Dämmstoffe (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

| Dämmstoff                           | Beschreibung                                                                                                                     | Vorteile                                                                                | Schwierigkeiten                                                                                           | $\lambda$<br>W/mK | notwendige<br>Stärke für<br>$U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$<br>m | mittlerer<br>Materialpreis<br>für<br>$U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$<br>€/m <sup>2</sup> | PEI für<br>$U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$<br>kWh/m <sup>2</sup> | Treibhaus-<br>potenzial<br>GWP <sub>100</sub> für<br>$U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$<br>kg CO <sub>2</sub> äq./kg | Heizwert<br>MJ/m <sup>3</sup> |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Calcium-silikat-<br>Platte          | Durch Wasserdampf<br>gehärtete Dämmplatte<br>aus Kalziumsilikaten und<br>Zellulose                                               | Klimaregulierende<br>Eigenschaften durch<br>hohes Wasserauf-<br>nahmevermögen           | Hohe Kosten bei relativ<br>geringer<br>Wärmedämmleistung                                                  | 0,045             | 0,45                                                             | 343,35                                                                                   | 69                                                               | 1,400                                                                                                             | 0                             |
| Mineralwolle<br>Dämmplatte          | Als Plattendämmstoff<br>verfügbare Glas- oder<br>Steinwolle. Gewonnen<br>durch Schmelzen und<br>Zerfasern des<br>Ausgangsstoffes | Einfache Bearbeitung<br>und Verlegung als<br>Plattendämmstoff                           | Entstehung von<br>Faserstäuben bei der<br>Verarbeitung                                                    | 0,033             | 0,33                                                             | 31,25                                                                                    | 149                                                              | 2,195                                                                                                             | 0                             |
| Mineralwolle<br>Dämmfilz            | Als Dämmfilz verfügbare<br>Glas- oder Steinwolle.<br>Gewonnen durch<br>Schmelzen und<br>Zerfasern des<br>Ausgangsstoffes         | Als Dämmfilz einfache<br>Bearbeitung und<br>Verlegung, auch bei<br>komplizierten Formen | Entstehung von<br>Faserstäuben bei der<br>Verarbeitung                                                    | 0,035             | 0,35                                                             | 21,40                                                                                    | 47                                                               | 2,195                                                                                                             | 0                             |
| Schaumglas <= 120 kg/m <sup>3</sup> | Überwiegend aus<br>recyceltem Glas<br>geschäumter Dämmstoff                                                                      | Recyclingprodukt                                                                        | Energieintensive<br>Herstellung                                                                           | 0,045             | 0,45                                                             | 27,38                                                                                    | 327                                                              | 2,433                                                                                                             | 0                             |
| Flachs-<br>dämmplatte               | Aus Fasern der<br>Flachspflanze<br>hergestellter Dämmstoff                                                                       | Natürlicher<br>nachwachsender Rohstoff                                                  | Behandlung mit<br>Borsalzen und teilw.<br>Verwendung von<br>Polyester-Stützfasern<br>erschweren Recycling | 0,040             | 0,40                                                             | 59,76                                                                                    | 111                                                              | -0,448                                                                                                            | 554                           |
| Holzfaser-<br>platte                | Unter Hitzeeinwirkung<br>und durch holzeigene<br>Harze zu Dämmplatten<br>gepresste Holzfasern                                    | Natürlicher<br>nachwachsender<br>Rohstoff;<br>Herstellung aus<br>Abfallprodukten        | Ungeziefer- und<br>Schimmelschutz sowie<br>Brandschutzes kritisch;<br>Energieintensive<br>Herstellung     | 0,045             | 0,45                                                             | 21,08                                                                                    | 454                                                              | -0,804                                                                                                            | 2182                          |
| Korkdämm-<br>platte                 | Als Plattendämmstoff<br>verfügbares Kork-<br>granulat. Bindung durch<br>Rohstoffeigene Harze                                     | Natürlicher<br>nachwachsender Rohstoff                                                  | Durch steigende<br>Nachfrage zunehmend<br>hohe Preise                                                     | 0,040             | 0,40                                                             | 120,00                                                                                   | 96                                                               | -1,224                                                                                                            | 2672                          |
| Korkschröt<br>expandiert            | Expandiertes<br>Korkgranulat                                                                                                     | Natürlicher<br>nachwachsender Rohstoff                                                  | Durch steigende<br>Nachfrage zunehmend<br>hohe Preise                                                     | 0,042             | 0,42                                                             | 94,52                                                                                    | 84                                                               | -1,224                                                                                                            | 2672                          |
| Zellulose                           | Aus recyceltem Papier<br>durch Zerkleinerung<br>hergestellter<br>Schüttdämmstoff                                                 | Recyclingprodukt;<br>Sehr geringer<br>Materialpreis                                     | Durch<br>Feuchtigkeitseinwirkung<br>Verlust der<br>Dämmeigenschaften                                      | 0,039             | 0,39                                                             | 28,91                                                                                    | 25                                                               | -0,885                                                                                                            | 1112                          |

**Tabelle 4.2:** Dämmstoffübersicht marktüblicher Dämmstoffe, Fortsetzung von vorheriger Seite

#### 4.1.2 Entwicklungstendenzen

Trotz des aktuellen Rückgangs sind die letzten 15 Jahre des Baugeschehens durch eine massive Zunahme der Dämmaktivitäten von Gebäuden geprägt. Bereits eingeführte Dämmstoffe werden zusehends verbessert, neue Materialien kommen auf den Markt und neue Kombinations- oder Verbunddämmstoffe werden angeboten. Zudem verbessern sich auch die Wärmeleitfähigkeiten. Galt vor wenigen Jahren noch die Wärmeleitgruppe (WLG) 040 als Vergleichs- oder Standardwert, so ist dies heute die WLG 035. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach weiteren, in Zukunft zur Verfügung stehenden Baustoffen und deren Einfluss auf den Dämmstandard von Gebäuden und somit auf den Heizwärme- oder Primärenergiebedarf der Gebäude. Die Grafiken zeigen beispielhaft die Entwicklungen der Wärmeleitfähigkeiten von Mineralwolle und expandiertes Polystyrol (EPS).



**Abbildung 4.2:** Entwicklung der Wärmeleitfähigkeiten von Mineralwolle und expandiertem Polystyrol in den vergangenen Dekaden (FTW, 2013)

Allerdings sind den Bemühungen um reduzierte Wärmeleitfähigkeiten physikalische Grenzen gesetzt, so dass man sich heute vermehrt auch um Beimischungen, Veränderungen der Zellstrukturen oder andere Treibgase bemüht.

Zu den neuen Dämmstoffen, die zurzeit in den Markt eingeführt werden, gehören die Aerogele. Dies sind hochporöse Feststoffe, die aus getrocknetem Siliziumdioxid-Gel bestehen. Die Zellgröße der eingeschlossenen Poren beträgt wenige Nanometer, wodurch die Bewegung der Luftmoleküle weitgehend verhindert wird. Die Wärmeleitung findet folglich nur über den Feststoffanteil des Materials statt, welcher mit einem Anteil von weniger als 10 Vol.-% sehr gering ausfällt. Die ebenfalls verwendete Bezeichnung Nanogel bezieht sich hier auf die Porengröße, nicht auf die Partikelgröße des Materials. So weist ein Würfel mit der Kantenlänge 1 mm des Aerogels mehr als 100 Billionen Poren auf. Hiermit lassen sich in Form von Schüttungen, als gepresste Platte mit Mineralwolle oder als gebundenes Granulat Lambdawerte von rund 0,02  $\text{W}/\text{mK}$  erzielen. Gleichzeitig weisen Aerogele grundsätzlich eine hohe Lichtdurchlässigkeit auf, wodurch es auch als transparente Wärmedämmung eingesetzt werden können.

Eine weitere aktuelle Entwicklung stellen die Vakuum-Isulationspaneele dar. Sie bestehen aus einem inneren, porösen Stützkern, welcher mit einer Hochbarrierefolie nahezu gasdicht abgeschlossen und anschließend evakuiert wurde. Als Stützkernmaterialien kommen z.B. EPS oder pyrogene Kieselsäuren zum Einsatz, wobei sich ein höherer Porenanteil positiv auf die

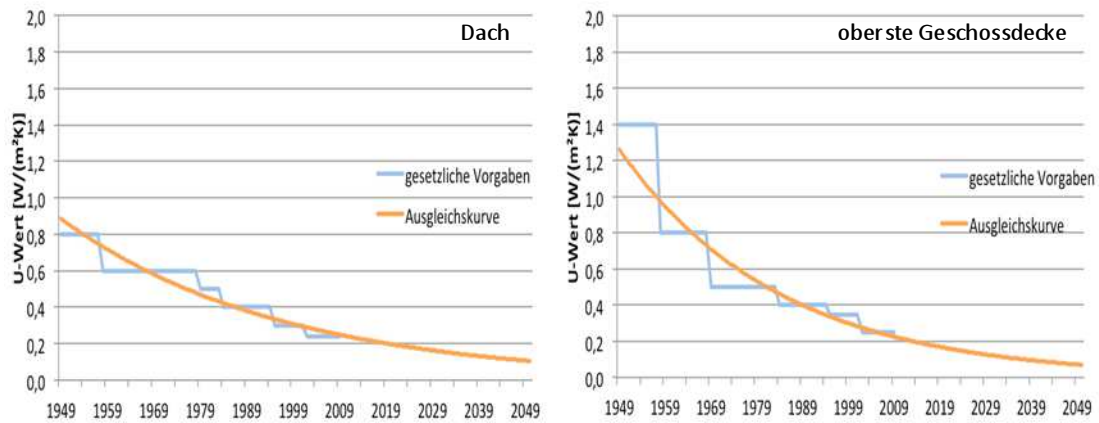
Dämmeigenschaften auswirkt, da eine Wärmeleitung nur noch über den Feststoffanteil erfolgen kann. Da eine vollkommene Gasdichtheit nicht erzeugt werden kann, erhöht sich mit zunehmendem Alter der Paneele auch die Wärmeleitfähigkeit, da Gasmoleküle in das System eindringen und somit die Dämmwirkung verschlechtern. Dies gilt ebenso bei mechanischer Beschädigung der Paneele während des Einbaus oder innerhalb der Nutzungsphase, wodurch die Dämmeigenschaften größtenteils verloren gehen. Dieser Umstand führt dazu, dass Vakuum-Isolationspaneele nur werksmäßig auf das erforderliche Maß gefertigt werden können und eine spätere Bearbeitung auf der Baustelle nicht mehr möglich ist. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit können jedoch sehr geringe Dämmstärken realisiert werden, wodurch Vakuum-Isolationspaneele in Bereichen eingesetzt werden können, in denen aus räumlichen Gründen Dämmung mit gewöhnlichen Dämmstoffen nicht möglich ist. Auf dem Markt erhältliche Vakuumdämmungen sind überwiegend mit einem Kern aus pyrogener Kieselsäure ausgeführt und erreichen Berechnungswerte für die Wärmeleitfähigkeit von 0,007 bis 0,008 W/mK.

Zu den weiteren sichtbaren Tendenzen gehören Verbundwerkstoffe, wie sie z.B. aus beidseitigem EPS mit innenliegenden Vakuum-Isolierpaneelen oder als PU-Dämmplatte mit verklebten EPS-Lagen angeboten werden. Auch die vermehrte Nutzung natürlicher und nachwachsender Dämmstoffe bereichert die Dämmstoffmärkte, jedoch sind hier aus heutiger Sicht keine Verbesserungen der Wärmeleitfähigkeiten zu erwarten. Diese liegen oberhalb der bereits genannten Dämmstoffe. Zudem besteht das Problem einer begrenzten Verfügbarkeit von zum Anbau dieser Stoffe notwendigen Flächen.

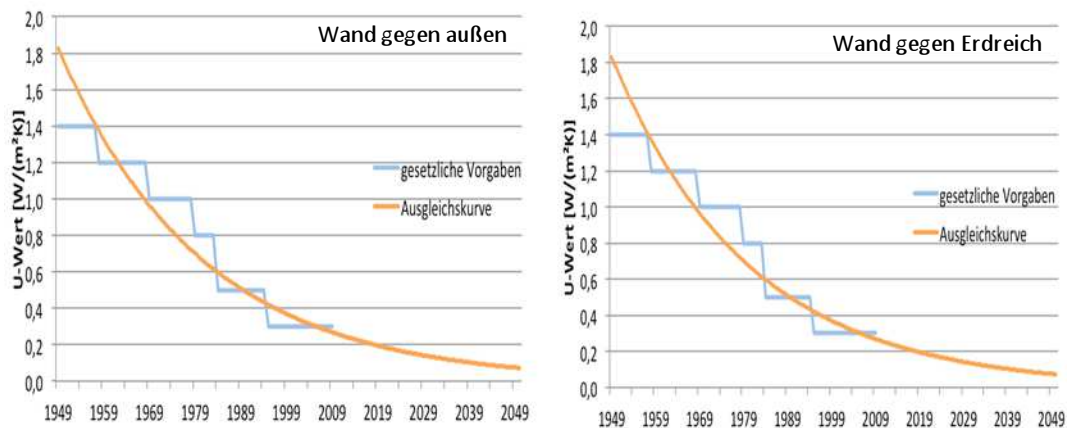
Zusammenfassend kann ein sichtbar in Bewegung befindlicher Markt mit vielfältigem Produktangebot und vielen innovativen Materialien konstatiert werden. Dabei werden sukzessive die minimal möglichen Wärmeleitfähigkeiten gesenkt. Gute Werte liegen in der Größenordnung von 0,02 W/mK, sehr gute bei 0,007 W/mK, was im Vergleich zu dem heutigen mittleren Standardwert von 0,035 W/mK eine erhebliche Verbesserung darstellt. Auch wenn sich mit diesen modernen Dämmstoffen vergleichsweise niedrige U-Werte im (üblichen) Bereich von 0,15 bis 0,25 W/m<sup>2</sup>K ermöglichen lassen, kann die ausschließliche Betrachtung der baustofflichen Fortschritte in die Irre führen, da sich mit diesen guten Dämmstoffen gleichzeitig auf willkommene Art die Dämmstoffstärken leicht senken lassen – so ergeben sich also u.U. wieder ähnliche U-Werte wie zuvor auch mit den schlechteren Dämmstoffen.

## 4.2 Extrapolation der Trends historischer U-Werte

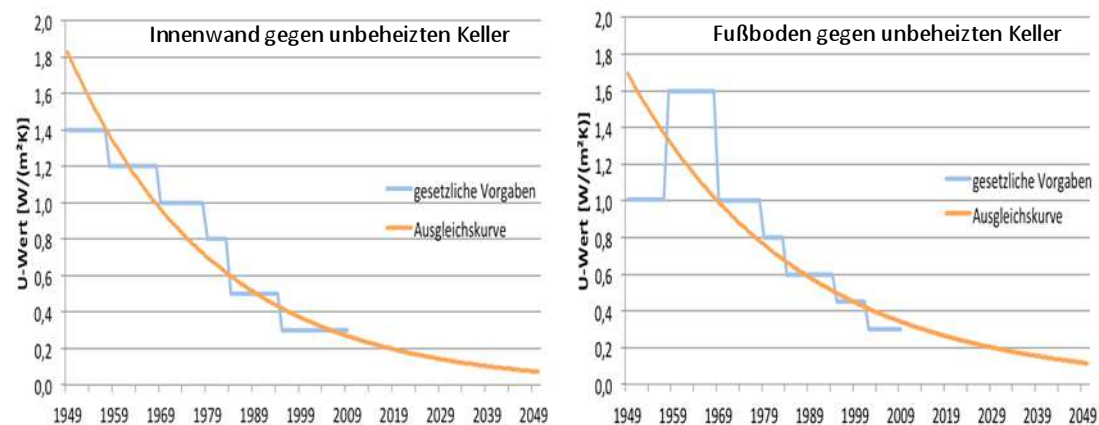
Ein Ansatz den zukünftigen zeitlichen Verlauf der Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Bauteile der thermischen Hülle abzuschätzen, ist die Fortschreibung der bisherigen historischen Entwicklungen. Dabei wird nicht die Entwicklung der rechtlichen Mindestanforderungen betrachtet, sondern die Entwicklung der gebauten Praxis. Dazu wurden die vom IWU für das TABULA-Projekt (IWU, 2011) ermittelten U-Werte für Einfamilienhäuser zusammengetragen und ihr Verlauf bis zum Jahr 2050 extrapoliert. Der Betrachtungszeitraum beginnt mit der Baualtersklasse 1949 - 1957, da erst ab hier eine signifikante Entwicklung der U-Werte eingesetzt hat, und endet mit dem Betrachtungsjahr 2050. Die Trendkurven verlaufen asymptotisch gegen einen Grenzwert.



**Abbildung 4.3: Extrapolation bisheriger U-Werte für die Bauteile Dach (2050:  $U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und oberste Geschossdecke (2050:  $U = 0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$ )**



**Abbildung 4.4: Extrapolation bisheriger U-Werte für die Bauteile Wand gegen außen (2050:  $U = 0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und für die Bauteile Wand gegen Erdreich (2050:  $U = 0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$ )**

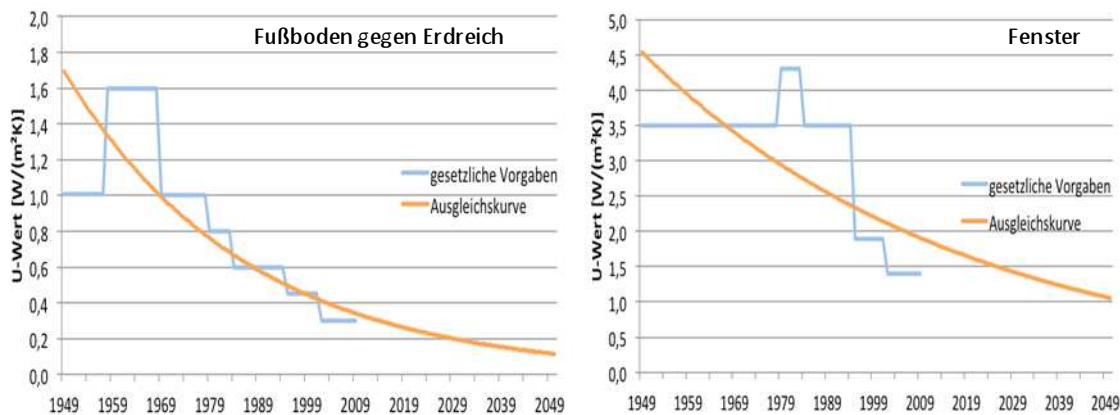


**Abbildung 4.5: Extrapolation bisheriger U-Werte für die Bauteile Innenwand gegen unbeheizten Keller (2050:  $U = 0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und für die Bauteile Fußboden gegen unbeheizten Keller (2050:  $U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ )**

Die Fortschreibung der U-Werte für das Dach erreicht bis zum Jahr 2050 einen U-Wert von  $0,11 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Die Entwicklung im Betrachtungszeitraum erfolgt weitestgehend gleichmäßig, jedoch lässt sich eine stagnierende Entwicklung zwischen 1958 und 1978 feststellen.

Die Fortschreibung der U-Werte für die oberste Geschossdecke erreicht bis zum Jahr 2050 einen U-Wert von  $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die Entwicklung im Betrachtungszeitraum zeigt einen deutlichen Sprung von 1,4 auf  $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  um 1959 und flacht zum Ende hin ab.

Die U-Werte für Wände gegen Außenluft, Wände gegen Erdreich sowie Innenwände gegen unbeheizte Keller zeigen nach den vorliegenden Werten des IWU eine identische Entwicklung. Die Fortschreibung der Werte erreicht für alle drei Bauteile bis zum Jahr 2050 einen U-Wert von  $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die Entwicklung im Betrachtungszeitraum erfolgt weitestgehend gleichmäßig und zeigt keine deutlichen Auffälligkeiten.



**Abbildung 4.6:** Extrapolation bisheriger U-Werte für das Bauteil Fußboden gegen Erdreich (2050:  $U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) und für das Bauteil Fenster (2050:  $U = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ )

Die U-Werte für Fußböden gegen unbeheizte Keller und Fußböden gegen Erdreich zeigen nach den vorliegenden Werten des IWU eine identische Entwicklung. Die Fortschreibung der Werte erreicht für beide Bauteile bis zum Jahr 2050 einen U-Wert von  $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Deutlich wird hier eine negative Entwicklung im Bereich zwischen 1958 und 1968, in welcher der U-Wert von 1,0 auf  $1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zurückspringt, wodurch die Extrapolation der Werte abflacht. Die Fortschreibung der U-Werte für Fenster erreicht bis zum Jahr 2050 einen U-Wert von  $1,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Eine positive Entwicklung beginnt im Betrachtungszeitraum allerdings erst ab 1995, was zu einer stark abgeflachten Entwicklungskurve führt. Der erreichte U-Wert liegt somit nur geringfügig unterhalb der durch die EnEV 2009 bereits geforderten Werte und höher als bereits auf dem Markt erhältliche Produkte. Eine Fortschreibung ist zudem durch die geringe Anzahl an Werten nach Beginn einer erkennbaren Entwicklung nur schwach aussagekräftig.

| U-Werte (EFH, 2050)             |                                 |                                 |                                 |                                   |                                  |                                 |                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Dach                            | oberste Geschossdecke           | Wand gegen außen                | Wand gegen Erdreich             | Innenwand gegen unbeheizte Keller | Fußboden gegen unbeheizte Keller | Fußboden gegen Erdreich         | Fenster                         | Haustür                         |
| $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$   | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ |
| 0,07                            | 0,11                            | 0,07                            | 0,07                            | 0,07                              | 0,11                             | 0,11                            | 1,10                            | 1,67                            |

**Tabelle 4.3:** Übersicht aller durch Extrapolation bisheriger gesetzlicher Vorgaben ermittelten U-Werte im Jahr 2050 am Gebäudetyp Einfamilienhaus für die verschiedenen Bauteile

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass wenn man die Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten der letzten 60 Jahre fortschreibt, sich im Jahr 2050 bei allen

Bauteilen, mit Ausnahme von Fenstern ein U-Wert etwa im Bereich von  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  einstellt. Aus technischer Sicht ist dieser Wert auch mit den heute gängigen Dämmstoffen durchaus vorstellbar, wie bereits Kapitel 4.1.1 zeigen konnte. Ob dies jedoch auch aus wirtschaftlicher und ökobilanzieller Sicht möglich und sinnvoll ist, wird im Anschluss genauer geprüft werden.

Die Grenzwerte für Fenster hingegen fallen sehr hoch aus und werden bereits heute von am Markt erhältlichen Produkten deutlich unterschritten. Eine Extrapolation dieser Werte ist jedoch durch die in der Datengrundlage erst sehr spät einsetzende Entwicklung deutlich fehlerbehaftet und findet hier keine weitere Verwendung.

### 4.3 Bestimmung des gesamtenergetischen Minimums

Aus gesamtenergetischer Sicht sind Aufwand und Nutzen von Dämmmaßnahmen zu bilanzieren. Aufwände in diesem Zusammenhang sind der (nicht erneuerbare) kumulierte Energieaufwand (KEA) bzw. Primärenergieinhalt (PEI) für Produktion, Transport und Montage der Dämmung. Der Nutzen der Dämmmaßnahmen ist der Endenergiebedarf (Aufwandszahl = 1), der gegenüber dem ungedämmten Zustand während der Nutzungsdauer der Dämmmaßnahme vermieden wird. In Abbildung 4.7 ist die eingesparte Endenergie (blau) dem kumulierten Energieaufwand für die Herstellung des Materials (orange) in Abhängigkeit von der Dämmstärke gegenübergestellt. Zieht man die Aufwände von den gesamten Einsparungen ab, so bleibt die Nettoeinsparung als Differenz übrig (rote Kurve). Die maximale Netto-Energieeinsparung wird an dem markierten Punkt erreicht. Bei geringeren Dämmstärken (links des Maximums) bewirkt ein zusätzlicher Zentimeter Dämmstärke eine höhere Energieeinsparung als er bei seiner Produktion verursacht. Rechts des Maximums ist der Energiebedarf bei der Produktion höher als die Energieeinsparung. Dieselbe Netto-Energieeinsparung, die ein Punkt rechts des Maximums erzielt, kann auch mit einer geringeren Dämmstärke links des Maximums erreicht werden, obwohl der Wärmedurchgangskoeffizient dort kleiner ist. So ist die Netto-Einsparung, die mit einem Meter Dämmstärke erreicht werden könnte, gleich der Netto-Einsparung einer 12 cm-Dämmschicht.

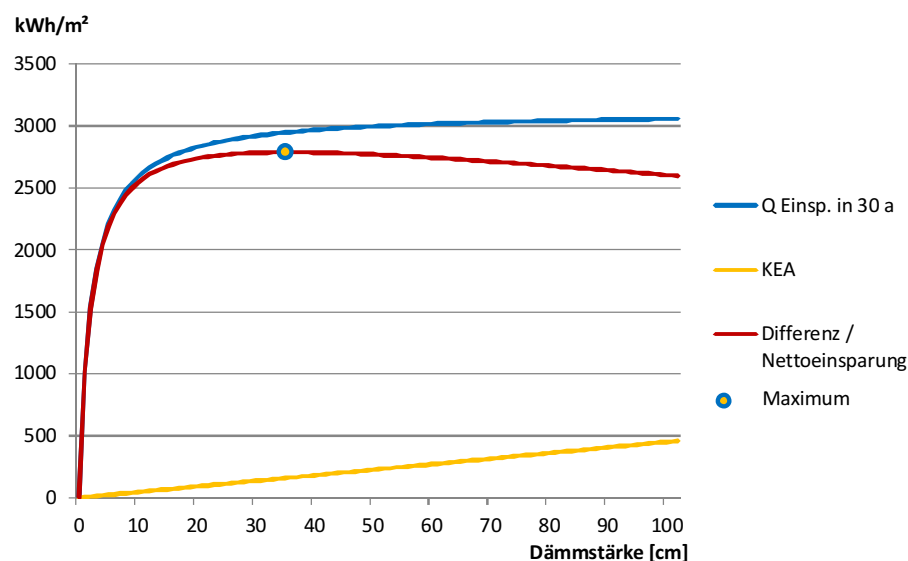
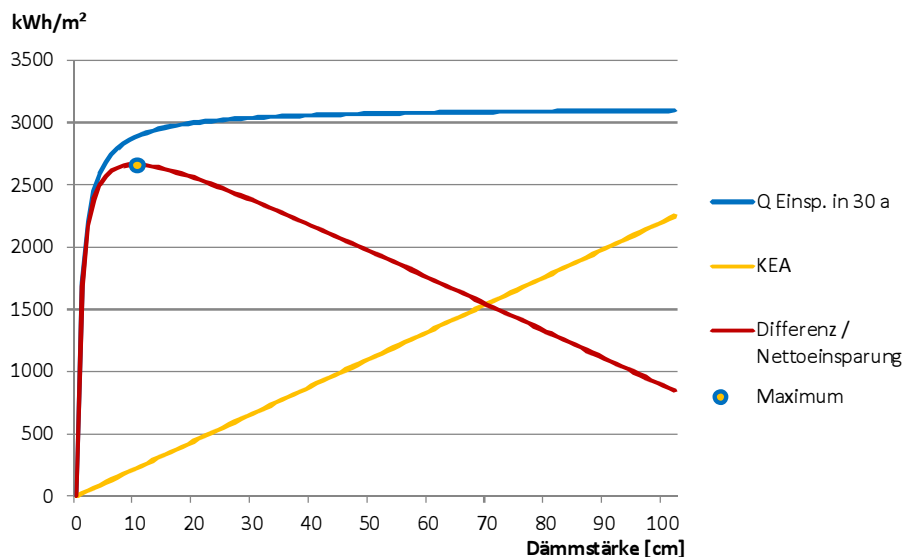


Abbildung 4.7: Maximale Energieeinsparung durch Dämmung unter Berücksichtigung des Aufwands für die Herstellung (Mineralfaser mit  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ , Zeitraum 30 a) optimale Dämmstärke 33 cm,  $U = 0,092 \text{ W/m}^2\text{K}$

Die ökobilanziell optimale Dämmstärke ist abhängig von

- dem kumulierten Energieaufwand für den Dämmstoff  
Ein höherer KEA verschiebt das Maximum hin zu geringeren Dämmstärken
- der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs  
Eine höhere Wärmeleitfähigkeit verschiebt das Maximum hin zu höheren Dämmstärken
- dem Wärmedurchgangskoeffizienten des ungedämmten Bauteils  
Ein höherer U-Wert verschiebt das Maximum hin zu größeren Dämmstärken
- der Nutzungsdauer der Dämmschicht  
Eine längere Nutzungsdauer verschiebt das Maximum hin zu größeren Dämmstärken
- den Wärmeverlusten bei Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe der Wärme  
Höhere Verluste verschieben das Maximum hin zu größeren Dämmstärken

Das Beispiel in Abbildung 4.7 zeigt eine Mineralfaserdämmung. Die gesamtenergetisch optimale Dämmstärke beträgt hier 36 cm. Der Wärmedurchgangskoeffizient, der sich daraus ergibt, liegt bei 0,092 W/m²K. Abbildung 4.8 zeigt einen hochwertigen Aerogeldämmstoff. Die optimale Dämmstärke beträgt hier – bei sonst gleichen Randbedingungen – 10 cm. Der Wärmedurchgangskoeffizient ergibt sich zu 0,129 W/m²K.



**Abbildung 4.8:** Maximale Energieeinsparung durch Dämmung unter Berücksichtigung des Aufwands für die Herstellung (Aerogel-Dämmfilz mit  $\lambda = 0,0136$  W/mK, Zeitraum 30 a) optimale Dämmstärke 10 cm,  $U = 0,129$  W/m²K

Die entscheidenden Dämmstoffeigenschaften, die den ökobilanziell minimierten Wärmedurchgangskoeffizienten beeinflussen, sind die Wärmeleitfähigkeit und der kumulierte Energieaufwand. Diese werden durch Multiplikation zum wärmeleitfähigkeitsgewichteten, volumenspezifischen Energieaufwand – im Folgenden kurz „spezifischen Energieaufwand“ - zusammengefasst.

$$\text{spezifischer Energieaufwand} = \lambda \cdot \text{KEA} \left[ \frac{\text{kWh} \cdot \text{W}}{\text{m}^5 \text{K}} \right]$$

In Abbildung 4.9 ist der spezifische Energieaufwand für verschiedene Dämmstoffe in Abhängigkeit von ihrer Wärmeleitfähigkeit aufgetragen. Es wird deutlich, dass moderne Dämmstoffe mit besonders niedriger Wärmeleitfähigkeit – also auf der linken Seite – den höchsten Energieaufwand

erfordern. Er ist zehn- bis zwanzigmal höher als bei den besten Dämmstoffen Zellulose und Schafwolle-Dämmfilz, die hier aus Platzgründen nicht dargestellt werden konnten. Dies impliziert, dass ihre niedrige Wärmeleitfähigkeit durch den höheren Energieaufwand bei der Produktion mehr als kompensiert wird.

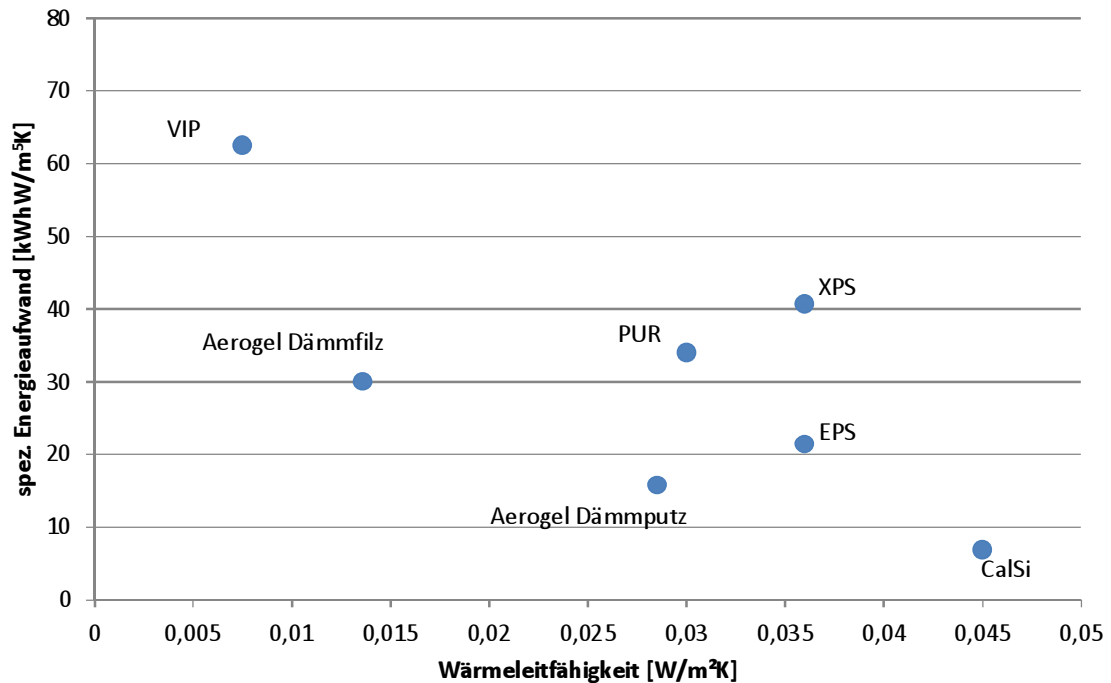
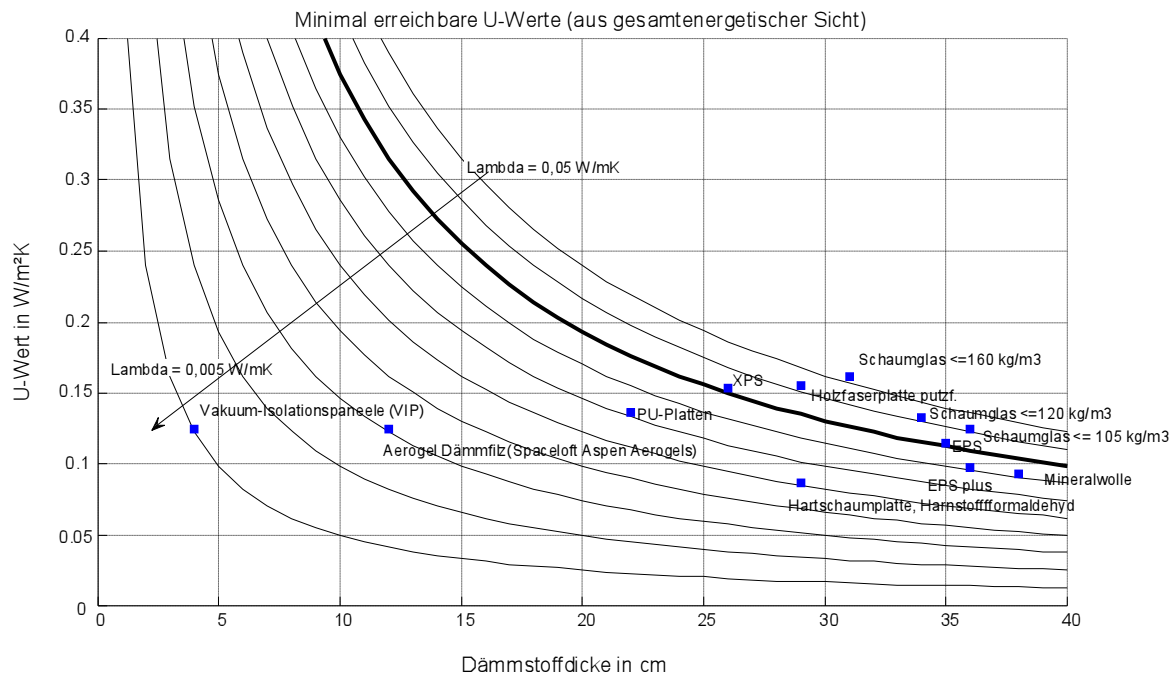


Abbildung 4.9: Spezifischer Energieaufwand verschiedener Dämmstoffe

Nachfolgende Grafik veranschaulicht nochmals die schon bekannte hyperbolische Abhängigkeit des U-Wertes von der Dämmstoffdicke. Diese ist für diverse Wärmeleitfähigkeiten dargestellt. Den Hyperbeln können die gängigen Dämmstoffe mit ihren jeweiligen  $\lambda$ -Werten zugeordnet werden. Setzt man nun die durch Dämmung erzielbare (flächenspezifische) Energieeinsparung den Herstellungskosten der einzelnen Dämmstoffe gleich, so ergeben sich die eingetragenen blauen Punkte. Sie stellen die gesamtenergetischen Optima der jeweiligen Dämmstoffe dar. Die blauen Punkte beschreiben damit eindeutig die maximal sinnvollen Dämmdicken und damit auch die hieraus resultierenden minimalen U-Werte. Sie liegen in einem Bereich zwischen 0,08 und 0,16  $\text{W/m}^2\text{K}$ . Werte unter 0,10  $\text{W/m}^2\text{K}$  werden erst bei Dämmstärken über 28 cm erreicht, die aus Gründen der Geometrie oder Akzeptanz oftmals nicht realisiert werden können. Eine nennenswerte Unterschreitung dieses gesamtenergetischen Sockelwertes erscheint daher aus heutiger Sicht als nicht absehbar.



**Abbildung 4.10: Ermittlung der gesamtenergetisch minimalen Wärmedurchgangskoeffizienten für verschiedene Dämmstoffe**

Wie oben beschrieben, hängt das gesamtenergetische Minimum auch von den Aufwänden bei der Wärmeerzeugung ab – also von den Anlagenverlusten und dem Primärenergiefaktor. In den obigen Berechnungen wurde die primärenergetische Anlagenaufwandszahl mit 1,0 angesetzt. Wenn sie in einem fiktiven, zukünftigen Versorgungssystem nur 0,5 betrüge, so würden die gesamtenergetisch minimal erreichbaren U-Werte deutlich ansteigen.

## 4.4 Kostenoptimale Wärmedurchgangskoeffizienten

### 4.4.1 Spezifische Kosten von Dämmstoffen

Grundsätzlich hängt die Wirtschaftlichkeit von Dämmmaßnahmen von den vermiedenen Energiekosten und den Kosten der Sanierung ab. Letztere setzen sich zusammen aus den variablen Materialkosten und den fixen Grundkosten, also Kosten für Montage, Baustelleneinrichtung, etc. Auch wenn angenommen wird, dass ein zukünftiger Dämmstoff nur sehr geringe Materialkosten verursachte, verblieben mindestens die Grundkosten als Kostensockel. Die Materialkosten nehmen bei den meisten heutigen Dämmstoffen annähernd linear mit der Dämmstoffdicke zu (Abbildung 4.11). Der Wärmedurchgangskoeffizient fällt jedoch nicht linear mit steigender Dämmstoffdicke, sondern verhält sich hyperbolisch. Anders ausgedrückt, führt der erste Zentimeter Dämmstoff auf einem Bauteil zu einer höheren U-Wert-Differenz als der zweite. Der 29. Zentimeter bewirkt dann nur noch eine geringe U-Wert-Differenz (Abbildung 4.12). Dieser Effekt tritt umso stärker zu Tage, je geringer die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs ist (Abbildung 4.13).

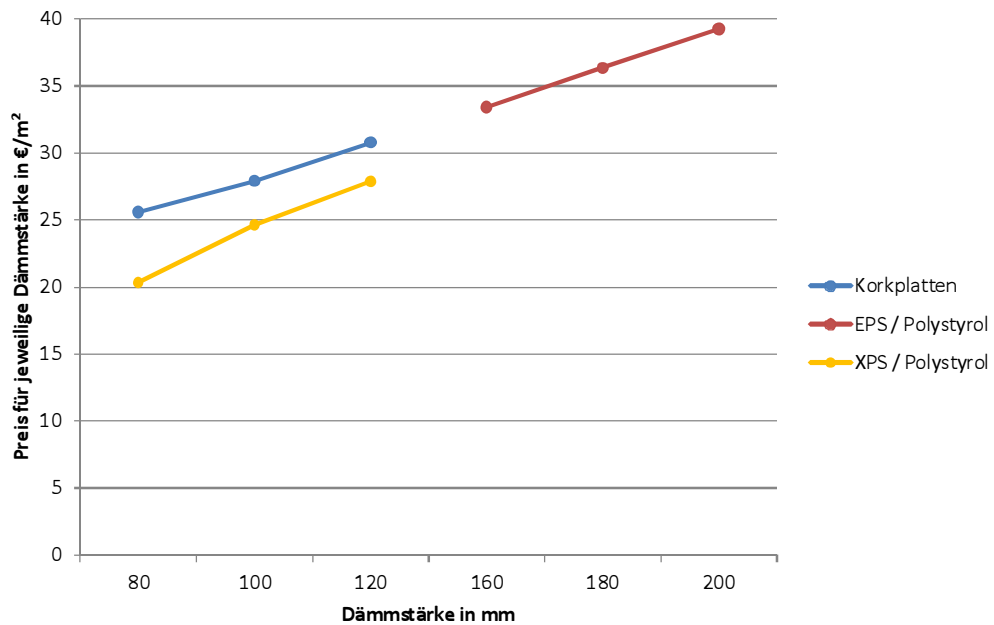


Abbildung 4.11: Materialkostenanstieg bei zunehmender Dämmstoffdicke (eigene Darstellung)

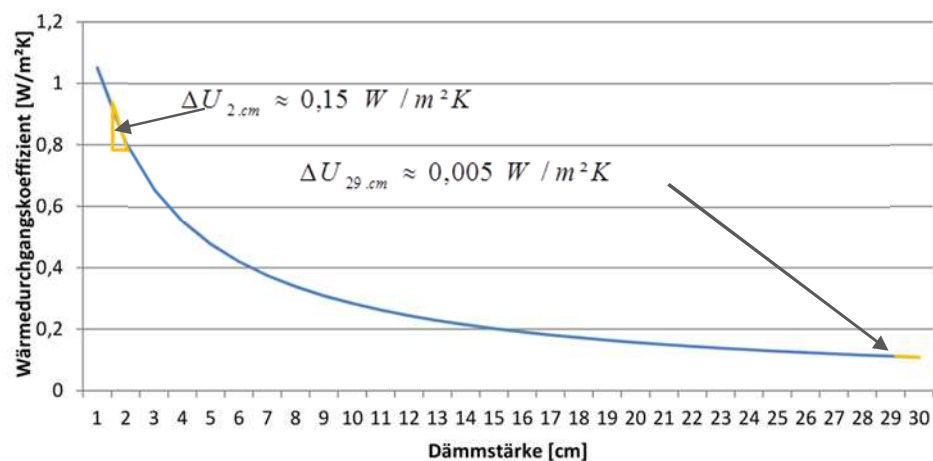
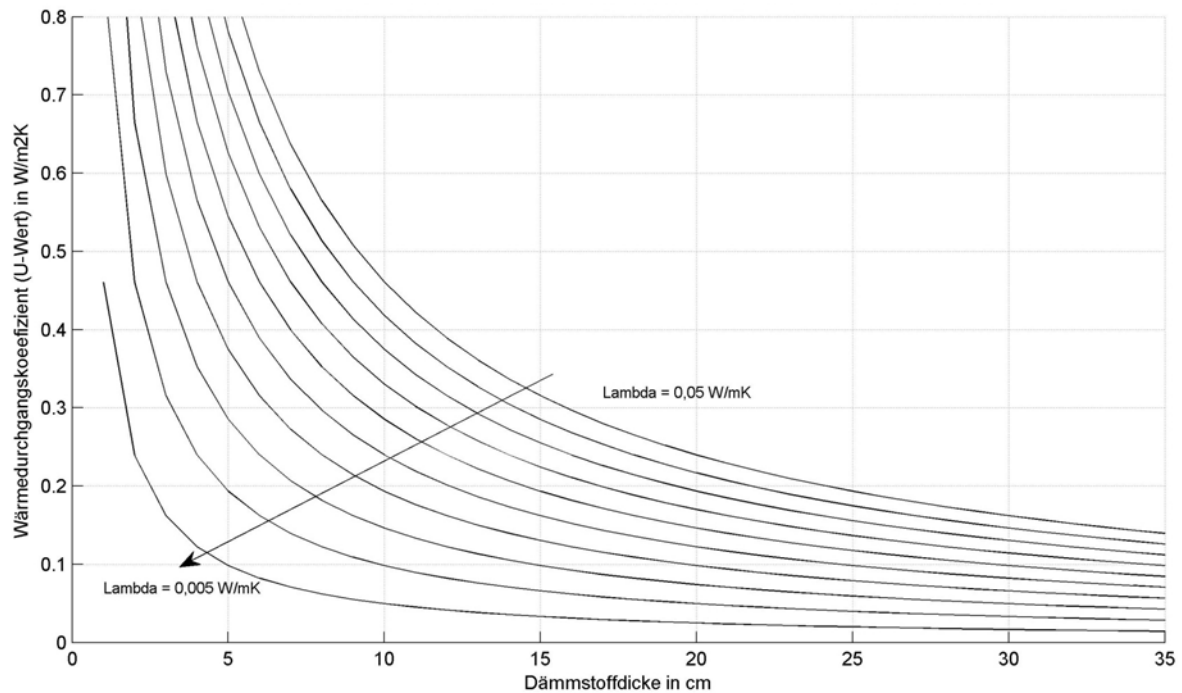


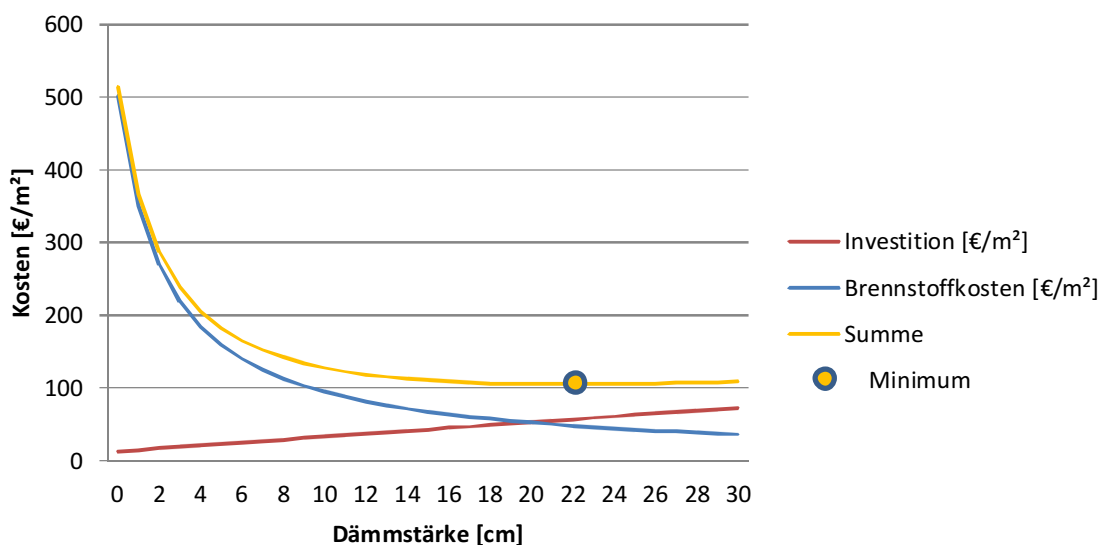
Abbildung 4.12: Wärmedurchgangskoeffizient über Dämmstärke, Effekt des 2. und 29. Zentimeters (vorhandene Konstruktion  $U = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $\lambda = 0,035 \text{ W/m}^2\text{K}$ )

Die wirtschaftlich optimale Dämmstärke wird im Folgenden berechnet, indem einerseits die nach der Maßnahme verbleibenden Energiekosten und andererseits die Investitionskosten für die Maßnahme als Funktion der Dämmstoffdicke aufgetragen werden. Beide Größen werden auf einen Quadratmeter Bauteilfläche bezogen. Werden die Kurven addiert, kann aus der Summenkurve das Kostenminimum abgelesen werden. In der Berechnung wird ein realer Anstieg der Brennstoffpreise von 3 % p.a. berücksichtigt, der aus (BMWi, 2013) hergeleitet wurde.

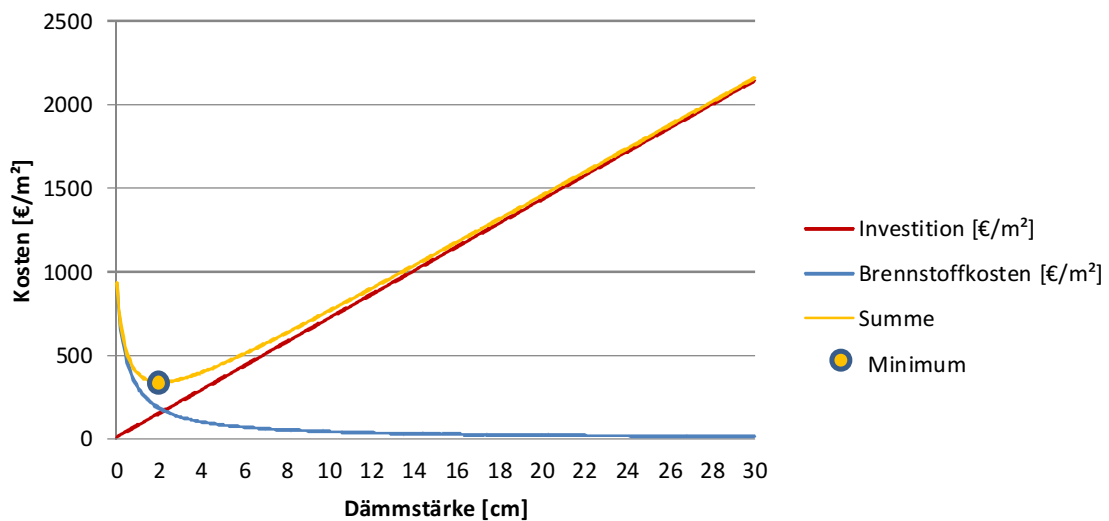


**Abbildung 4.13: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten**

Im ersten Beispiel (Abbildung 4.14) ist ein Dämmstoff mit heute gängigen Eigenschaften und Kosten abgebildet ( $\lambda=0,035 \text{ W/mK}$ , ca.  $2 \text{ €/cm m}^2$ ). Die kostenoptimale Dämmstärke liegt für ihn bei 22 cm. Daraus resultiert ein Wärmedurchgangskoeffizient von  $0,144 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Das zweite Beispiel (Abbildung 4.15) zeigt einen besonders leistungsfähigen Dämmstoff mit hohen spezifischen Kosten ( $\lambda = 0,0136 \text{ W/mK}$ , ca.  $62 \text{ €/cm m}^2$ ). Hier liegt die kostenoptimale Dämmstärke lediglich bei 2 cm. Sie führt zu einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



**Abbildung 4.14: Kostenminimum für Mineralfaserdämmung mit  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ , 78 € Fixkosten und 2 €/cm variablen Kosten, resultierender U-Wert =  $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$**



**Abbildung 4.15:** Kostenminimum für Aerogel-Dämmfilz mit  $\lambda = 0,0136 \text{ W/mK}$ , 78 € Fixkosten und 62 €/cm variablen Kosten, resultierender U-Wert =  $0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$

Die kostenoptimale Dämmstärke hängt von den folgenden Einflüssen ab:

1. Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs  
Eine höhere Wärmeleitfähigkeit verschiebt das Kostenminimum hin zu höheren Dämmstärken.
2. Kosten des Dämmstoffs  
Höhere Kosten verschieben das Kostenminimum hin zu geringeren Dämmstärken.
3. Brennstoffkosten  
Höhere Brennstoffkosten verschieben das Kostenminimum hin zu höheren Dämmstärken.
4. Wärmedurchgangskoeffizient im ungedämmten Zustand  
Ein höherer U-Wert im ungedämmten Zustand verschiebt das Kostenminimum hin zu höheren Dämmstärken.

Die beiden erstgenannten Faktoren sind bei heutigen Dämmstoffen eng aneinander gekoppelt: Dämmstoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit haben in der Regel einen niedrigen Materialpreis und umgekehrt. Für den erreichbaren minimalen U-Wert ist es dabei ohne Bedeutung, ob eine dicke Dämmschicht mit hoher Wärmeleitfähigkeit aufgebracht wird oder eine dünne mit niedriger Wärmeleitfähigkeit.

Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, werden Aufwände und Nutzen von Dämmstoffen in einem einzigen Kennwert dargestellt. Er ergibt sich aus der Multiplikation von Wärmeleitfähigkeit und volumenspezifischen Endkosten eines Dämmstoffs. Das Produkt sind die wärmeleitfähigkeitsgewichteten, volumenspezifischen Kosten – im Folgenden kurz „spezifische Kosten“ in  $[\text{€W/m}^5\text{K}]$ . Die Endkosten umfassen sowohl die spezifischen Materialkosten in  $[\text{€/m}^3]$  als auch die mittleren Montagekosten als Fixkosten in  $[\text{€}]$ . Eine Beschränkung auf die reinen Materialkosten ist nicht zielführend, weil die Fixkosten weit über die Hälfte der Endkosten ausmachen und weil alternative Montagemöglichkeiten sonst unberücksichtigt blieben.

$$\text{spezifische Kosten} = \lambda \cdot \text{Endkosten} \left[ \frac{\text{€W}}{\text{m}^5 \text{K}} \right]$$

Die spezifischen Kosten sind ein Maß für das wirtschaftliche Potenzial eines Dämmstoffs. Je kleiner der Wert ist, desto höher ist der Nutzen eines Dämmstoffs im Verhältnis zu den Endkosten. In Abbildung 4.16 sind die spezifischen Kosten für eine Auswahl gängiger und zukunftsweisender Dämmstoffe dargestellt. Es wird deutlich, dass die Dämmstoffe mit besonders geringer Leitfähigkeit (links) überproportional hohe Kosten verursachen. Ein Dämmstoff, der eine hohe Dämmwirkung bei geringen Kosten aufweist, ist derzeit nicht verfügbar. Die Materialkosten der leistungsfähigeren Dämmstoffe liegen im Vergleich zu ihrem Nutzen derzeit um den Faktor 10 bis 100 zu hoch.

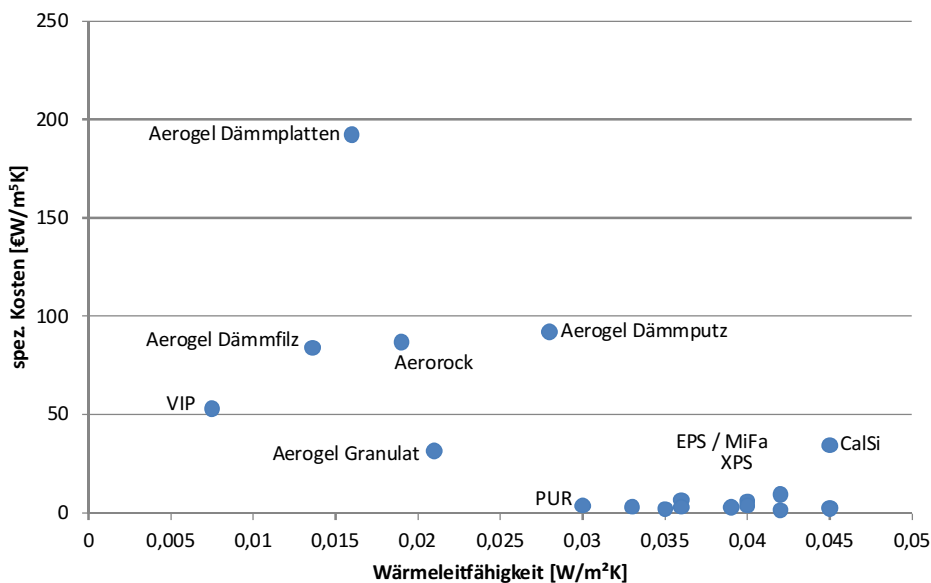


Abbildung 4.16: Spezifische Kosten verschiedener Dämmstoffe im Vergleich

Betrachtet man nur die Wirtschaftlichkeit von Dämmmaßnahmen und lässt dabei Kriterien wie Gestaltung und Ökobilanz außer Acht, so berechnet sich die optimale Dämmstärke nur aus den Kosten und Einsparungen. Die so ermittelte kostenoptimale Dämmstärke kann in Analogie zu dem in Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15 gezeigtem Beispiel direkt in den entsprechenden U-Wert umgerechnet werden. So kann das wirtschaftliche Minimum des U-Wertes in Abhängigkeit der spezifischen Kosten der Dämmstoffe dargestellt werden. Der Zusammenhang ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Während Dämmstoffe mit hohen spezifischen Kosten nur kostenoptimale U-Werte von 0,25 bis 0,55 W/m²K erreichen, erreichen die kosteneffizienteren (herkömmlichen) Dämmstoffe U-Werte knapp unter 0,1 W/m²K.

In dieser Darstellung wurden Fixkosten von 78 €/m² berücksichtigt sowie ohnehin erforderliche Instandhaltungskosten von 65 €/m². Die Brennstoffkosten wurden mit 0,075 €/kWh angesetzt, jedoch mit einer realen Steigerung von 3 % linear bis 2050 hochgerechnet – schließlich werden die minimalen U-Werte für 2050 gesucht. Sie betragen damit 0,205 €/kWh in 2050. Der Nutzungszeitraum der Dämmstoffe wurde mit 30 Jahren angesetzt. Durch die resultierenden hohen Brennstoffkosten ergibt sich ein niedrigerer minimaler U-Wert als nach heutigen Brennstoffkosten.

Auf diese Weise ist die Untergrenze tendenziell zu niedrig berechnet worden. Das Minimum ist insofern als robust zu bezeichnen.



Abbildung 4.17: Ableitung der kostenoptimalen U-Werte aus den spezifischen Kosten

Es wird damit gerechnet, dass das wirtschaftliche Minimum des U-Wertes auch künftig oberhalb von  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  bleiben wird. In Abbildung 4.17 gibt es zwar Dämmstoffe, die diese Grenze unterschreiten, dies sind jedoch allesamt Dämmstoffe mit vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeiten. Um den wirtschaftlich optimalen U-Wert realisieren zu können, wären hier Dämmstoffdicken über 30 cm erforderlich, für die in der Regel andere Restriktionen bestehen.

Inwieweit die Produktionskosten für neu entwickelte Dämmstoffe durch Skaleneffekte sinken könnten und dadurch zu niedrigeren spezifischen Kosten führen, wird in dem folgenden Exkurs untersucht.

#### 4.4.2 Exkurs: Marktpotenzial von Dämmstoffen in Deutschland

Wie alle neu entwickelten Produkte unterliegen auch neue Dämmstoffe einer Kostendegression, die aus Skaleneffekten bei der Produktion resultiert. Klassische Lernkurven geben an, auf welchen Anteil die Herstellungskosten sinken, wenn die produzierte Menge verdoppelt wird. Wenn neu entwickelte Dämmstoffe, wie etwa Vakuumpaneele oder Aerogele, die heute sehr hochpreisig sind, in größeren Mengen produziert werden würden, dann säne ihr Einheitspreis entsprechend ab. Solche Skaleneffekte könnten dazu führen, dass künftig geringere spezifische Kosten – und somit niedrigere wirtschaftliche U-Wert-Optima - realisiert werden. Um die Wahrscheinlichkeit solcher Mengeneffekte abzuschätzen, werden die Treiber und Hemmnisse für den Dämmstoffmarkt untersucht.

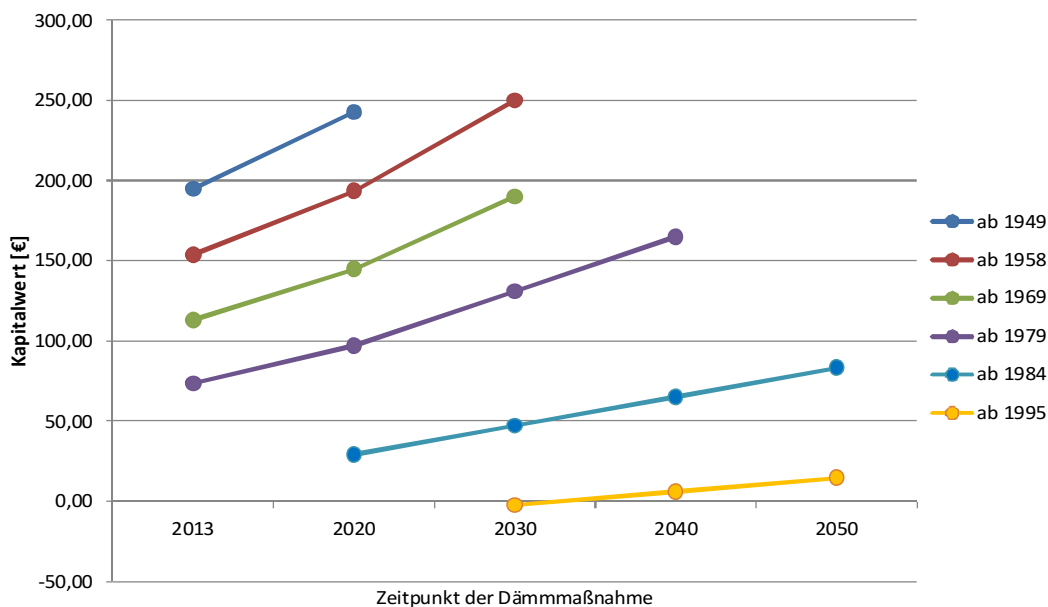
Im Folgenden wird die Wirtschaftlichkeit von Dämm-Maßnahmen als Kapitalwert dargestellt. Im Kapitalwert werden sämtliche Einnahmen und Ausgaben, die mit der Dämm-Maßnahme in Zusammenhang stehen, erfasst, auf den Zeitpunkt ihres jeweiligen Auftretens abdiskontiert und für den gesamten Betrachtungszeitraum addiert. Ausgaben sind die Investitionskosten für das Material

und die Montage der Dämmung. Einnahmen sind in diesem Zusammenhang die gegenüber dem ungedämmten Zustand eingesparten Brennstoffkosten.

Ein wichtiger Treiber für die Wirtschaftlichkeit von Dämmmaßnahmen sind die Marktpreise für Brennstoffe. Sie bestimmen die Kosten der eingesparten Energie und somit das Amortisationspotenzial. In diesem Beispiel wird ein realer Anstieg der Brennstoffkosten von 3 % p.a. zu Grunde gelegt. Bei Annahme konstanter Endkosten für die Dämmung bewirkt dies, dass die eingesparten Energiekosten steigen, je später eine Dämm-Maßnahme durchgeführt wird. Abbildung 4.18 zeigt dies in Form steigender Kapitalwerte für verschiedene Dämmzeitpunkte und Gebäudetypen.

Ein Hemmnis für die Wirtschaftlichkeit von Dämmmaßnahmen hingegen ist die Entwicklung des Einsparpotenzials in Abhängigkeit vom Baualter der Gebäude. Das Einsparpotenzial hängt von der Güte des Wärmeschutzes im Errichtungszustand der Gebäude ab. So haben Gebäude, die vor 1978 errichtet wurden, im Ist-Zustand nur einen geringen Wärmeschutz. Werden sie energetisch saniert, sinkt der absolute Wärmebedarf signifikant. Bei jüngeren Baujahren ist das Einsparpotenzial hingegen deutlich geringer, da sie bereits im Ausgangszustand über Dämmschichten verfügen. Sichtbar wird dies an den sinkenden Kapitalwerten für die Gesamtwirtschaftlichkeit der Dämm-Maßnahmen. So ist für Gebäude, die nach der 3. Wärmeschutzverordnung (1995) gebaut wurden, eine nachträgliche Dämmmaßnahme kaum noch wirtschaftlich durchführbar.

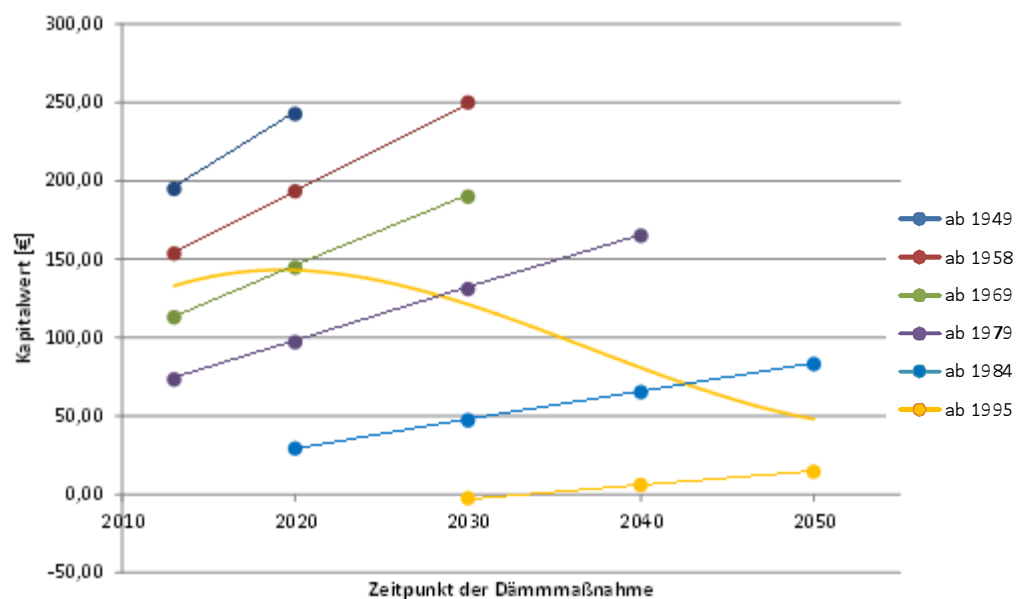
In Abbildung 4.18 ist dieser Effekt durch die Staffelung der Kurven für die einzelnen Baualtersklassen zu erkennen. Hier ist auch berücksichtigt, dass die verschiedenen Baualter zu verschiedenen Zeiten in den Sanierungszyklus eintreten. So werden Gebäude, die ab 1995 gebaut wurden, erst ab 2030 saniert während Gebäude, die zwischen 1958 und 1968 gebaut wurden, zu diesem Zeitpunkt überwiegend bereits saniert sein werden, insofern ist kein weiterer Anstieg des Kapitalwertes mehr zu erwarten (und auch nicht eingezeichnet).



**Abbildung 4.18:** Kapitalwert von Dämmmaßnahmen in Abhängigkeit von Zeitpunkt der Maßnahme und Baualter des Gebäudes

Sichtbar wird auch die relative Unwirtschaftlichkeit von Dämmmaßnahmen an neueren Gebäuden der 80er und 90er Jahre.

In Abbildung 4.19 ist der Gesamttrend der Wirtschaftlichkeit energetischer Sanierungen unter Berücksichtigung steigender Energiekosten und sinkender Einsparpotenziale dargestellt (orangefarbene Trendkuve). Es wird deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit von Dämmmaßnahmen in Zukunft tendenziell abnehmen wird. Dieser Tendenz kann insbesondere mit leistungsfähigeren Dämmstoffen mit geringeren spezifischen Kosten entgegengewirkt werden. Dies wären also Dämmstoffe mit besserer Dämmwirkung und/oder geringeren Investitionskosten (für Material und Montage). Da jedoch die Montagekosten bei praktisch allen Dämmstoffen und –verfahren den größten Kostenanteil ausmachen, hätte eine reine Senkung der Herstellungskosten nur eingeschränkte Auswirkungen auf den Endpreis. Solange kosteneffektivere Dämmstoffe oder Dämmverfahren nicht absehbar verfügbar sind, wird das Marktpotenzial für Dämmstoffe in Deutschland kurz- und mittelfristig als steigend, langfristig jedoch als fallend eingestuft.



**Abbildung 4.19: Trend des Kapitalwerts von Dämmmaßnahmen in Abhängigkeit von Zeitpunkt der Maßnahme und Baualter der Gebäude**

Diese Betrachtung ist nur auf den deutschen Dämmstoffmarkt beschränkt. Das internationale Marktpotenzial könnte durchaus Preissenkungen durch Skaleneffekte bei den Herstellungskosten auslösen. Auch gehen in diese Betrachtung nur Dämmstoffe ein, die nachträglich zur Verbesserung der Effizienz angebracht werden – also wirtschaftliche Kriterien erfüllen sollen. Dämmstoffe, die zum Beispiel bei der Instandhaltung vorhandener Dämmschichten oder im Neubau eingesetzt werden, sind hier nicht berücksichtigt. Dem steht wiederum dämpfend die Tatsache gegenüber, dass viele Dämmstoffe schon seit vielen Jahrzehnten am Markt eingeführt sind – nicht unbedingt im Effizienzbereich, sondern auch als Verpackungsmaterial oder als Schalldämmung. Die Herstellungsprozesse und -kapazitäten sind also bereits in einem gewissen Maßstab vorhanden – wesentliche Kostensenkungspotenziale sind daher bei vielen Dämmstoffen kaum mehr vorhanden.

Wie in Abbildung 4.16 gezeigt, sind die spezifischen Kosten der Hochleistungsdämmstoffe zurzeit um den Faktor 10 – 100 höher als bei konventionellen Dämmstoffen. Es ist mindestens sehr fraglich, ob diese Diskrepanz allein durch Skaleneffekte aufgehoben werden kann.

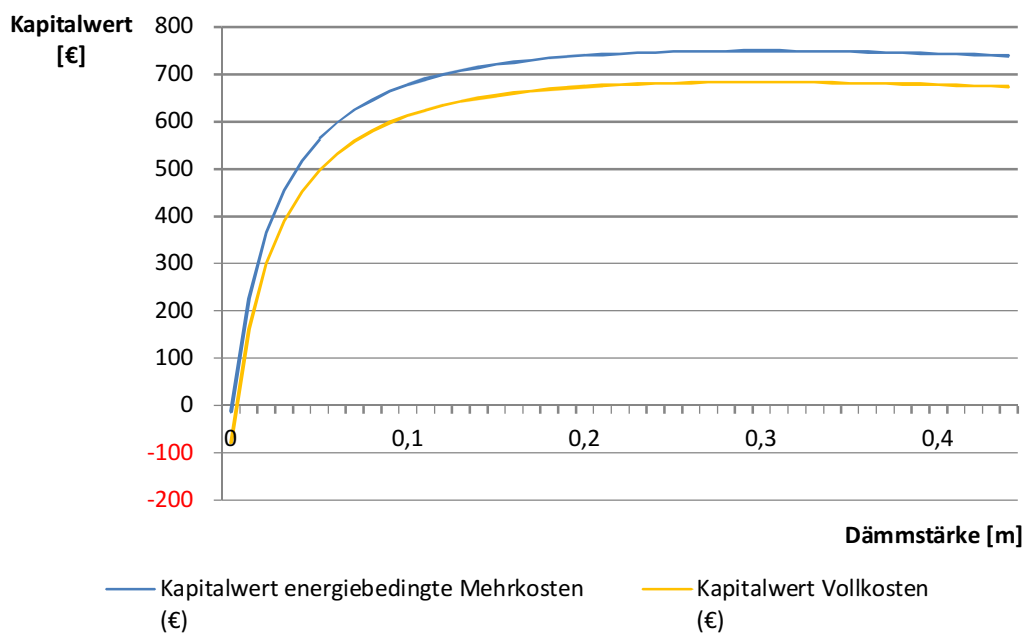
#### 4.4.3 Bestimmung des wirtschaftlichen Minimums auf Bauteilebene

Zur Bestimmung der kostenoptimalen Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen wird eine Kapitalwertberechnung für einen Quadratmeter eines gedämmten Bauteils durchgeführt. Alle relevanten Parameter werden variiert und der resultierende Wärmedurchgangskoeffizient berechnet. Die jeweils ungünstigsten und die jeweils günstigsten Parameter werden kombiniert, um den oberen und unteren Grenzbereich darzustellen. Folgende Parameter wurden untersucht:

- Wärmedurchgangskoeffizient des Dämmstoffs
- U-Wert des ungedämmten Bauteils
- Brennstoffkosten
- Fixkosten der Dämmung als Vollkosten
- Fixkosten der Dämmung als energiebedingte Mehrkosten
- Variable Kosten der Dämmung
- Lernfaktor des Dämmstoffpreises
- Kalkulatorischer Zins
- Brennstoffkostenanstieg

Die Berechnung des Optimums führt unabhängig von der Wahl zwischen Vollkosten oder energiebedingten Kosten zu denselben Ergebnissen. Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen wird vom gewählten Kostenansatz zwar beeinflusst, nicht jedoch die Lage des Optimums.

Die absolute Höhe des Kapitalwerts zeigt an, dass der Wirtschaftlichkeit bei der Wahl der Dämmstärke nur ein geringes Gewicht beigemessen werden kann. Im Optimum beträgt die Einsparung rund 750 Euro in einem Zeitraum von 30 Jahren. Die Kurven verlaufen in dem gezeigten Fall, bei dem die Randbedingungen eine hohe Dämmstärke begünstigen, zudem sehr flach. Dadurch variiert der Kapitalwert oberhalb von 10 cm nur um rund 100 Euro.



**Abbildung 4.20: Lage des Kapitalwerts bei der Berechnung mit Vollkosten oder energiebedingten Mehrkosten nach 30 Jahren (Beispiel für ein WDVS aus Mineralfaser oder EPS jeweils unter Randbedingungen, die eine hohe Dämmstärke begünstigen)**

Bei der Berechnung eines wirtschaftlich optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten, der für das Jahr 2050 Gültigkeit haben kann, werden die Entwicklungen der genannten Parameter mit einer gewissen Bandbreite antizipiert. Ziel ist eine Wirtschaftlichkeitsberechnung unter den Randbedingungen des Jahres 2050. Dazu wird der Energiepreis bis 2050 mit einem konstanten Anstieg berechnet, der sich für einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren weiter fortsetzt. Die Berechnung wird für die Bauteile Außenwand, Steildächer, Flachdächer, oberste Geschossdecke und Kellerdecke durchgeführt. Für jedes Bauteil werden mehrere Dämmstoffe untersucht, sowohl heutige als auch Neuentwicklungen, die 2050 den gängigen Standard darstellen könnten.

Die Entwicklung der Dämmstoffkosten wird mit Hilfe von Lernraten berücksichtigt. Sie wurden für konventionelle Dämmstoffe hergeleitet in (IFEU et al., 2014). Dabei wurde berücksichtigt, dass die Lernraten ihrerseits vom Ambitionsgrad der Zielerreichung abhängen. Für Dämmstoffe, die heute noch nicht breit in den Markt eingeführt sind, werden die Lernraten mit großen Bandbreiten abgeschätzt, um das wirtschaftliche Potenzial dieser Dämmstoffe nicht im Vorfeld zu unterschätzen. Die Lernraten beziehen sich in den folgenden Berechnungen sowohl auf die Material- als auch auf die Montagekosten.

Die Berechnung der Energieeinsparung erfolgt mit Hilfe von Gradtagzahlen. Als Basis dient die Gradtagzahl für das langjährige Mittel in Potsdam, da die Potsdamer Klimadaten als Referenzdaten für das bundesweite Klima in EnEV-Berechnungen dienen. Es wird eine Klimaerwärmung von 1 Kelvin bis zum Jahr 2050 angenommen und die Gradtagzahl entsprechend umgerechnet. Da die Gradtagzahl von der Heizgrenztemperatur - und damit vom Dämmstandard des Gebäudes - abhängt, wird sie in Abhängigkeit des erreichten U-Werts kontinuierlich angepasst.

## Dämmung von Außenwänden

### a) Konventionelle Dämmstoffe

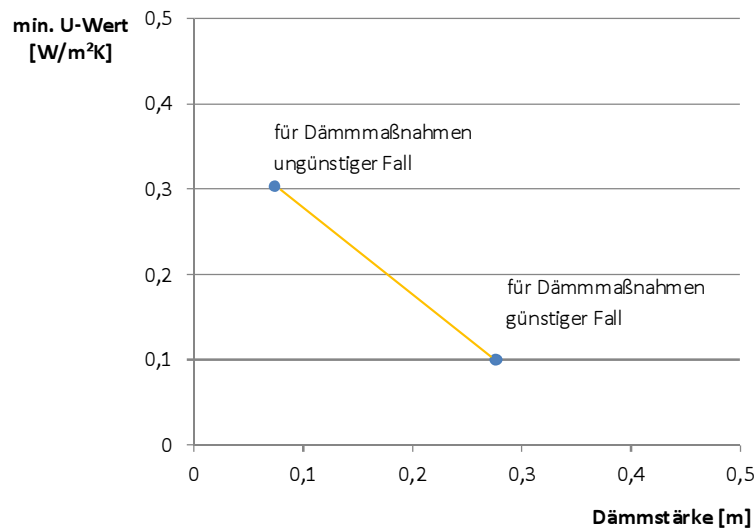
Übliche konventionelle Dämmstoffe sind heute Mineralfaser- oder Polystyrolschaumdämmungen. Die Wärmeleitfähigkeit erreicht bei beiden Materialien bei 0,030 W/mK ihr physikalisches Minimum. In Tabelle 4.4 sind die Eckdaten für die Berechnung unter für Dämm-Maßnahmen günstigen und ungünstigen Randbedingungen dargestellt sowie die entsprechend berechneten wirtschaftlich optimalen U-Werte.

| Material         | Lambda<br>[W/mK] | U-Wert<br>ungedämmt<br>[W/m²K] | Fixkosten<br>[€] | var. Kosten<br>[€/cm] | Lernfaktor<br>[%] | Kalk. Zins<br>[%] | Brennstoff-<br>kosten-<br>anstieg<br>[% p.a.] | min.<br>U-Wert<br>[W/m²K] |
|------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|
| Mineralfaser/EPS | 0,030            | 1,20                           | 87,35            | 2,431                 | 95                | 2                 | 0                                             | 0,303                     |
| Mineralfaser/EPS | 0,030            | 1,20                           | 87,35            | 2,431                 | 91                | 0                 | 3                                             | 0,0997                    |

**Tabelle 4.4:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von zuvor ungedämmten Außenwänden mit konventionellen Dämmstoffen

Abbildung 4.21 zeigt die Bandbreite der berechneten minimalen U-Werte in Abhängigkeit von der jeweiligen Dämmstärke. Die - relativ zu anderen Dämmstoffen – geringe Steigung der Kurve steht gleichzeitig für einen flachen Verlauf des Optimums. Unter ungünstigen Randbedingungen liegt der optimale U-Wert bei 0,3 W/m²K. Unter sehr optimistischen Randbedingungen liegt der

wirtschaftlich optimale U-Wert der konventionellen Dämmstoffe bei 0,1 W/m<sup>2</sup>K. Dieser Wert wird mit einer baupraktisch grenzwertigen Dämmstärke von rund 28 cm erreicht.



**Abbildung 4.21: Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Außenwänden, die vor 2002 errichtet wurden, mit WDVS aus Mineralfaser oder Polystyrol**

Der U-Wert des ungedämmten Bauteils beeinflusst die kostenoptimale Dämmstärke und die Höhe des Kapitalwertes, jedoch nicht den kostenoptimalen U-Wert. Im folgenden Beispiel wurde der U-Wert von 1,2 auf 0,35 W/m<sup>2</sup>K abgesenkt (Niveau der EnEV 2002). Die kostenoptimalen U-Werte werden dadurch mit geringeren Dämmstärken erreicht, der Höhe nach sind sie jedoch unverändert.

| Material         | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m <sup>2</sup> K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m <sup>2</sup> K] |
|------------------|---------------|---------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Mineralfaser/EPS | 0,030         | 0,35                                  | 87,35         | 2,431              | 95             | 2              | 0                                | 0,3039                           |
| Mineralfaser/EPS | 0,030         | 0,35                                  | 87,35         | 2,431              | 91             | 0              | 3                                | 0,0994                           |

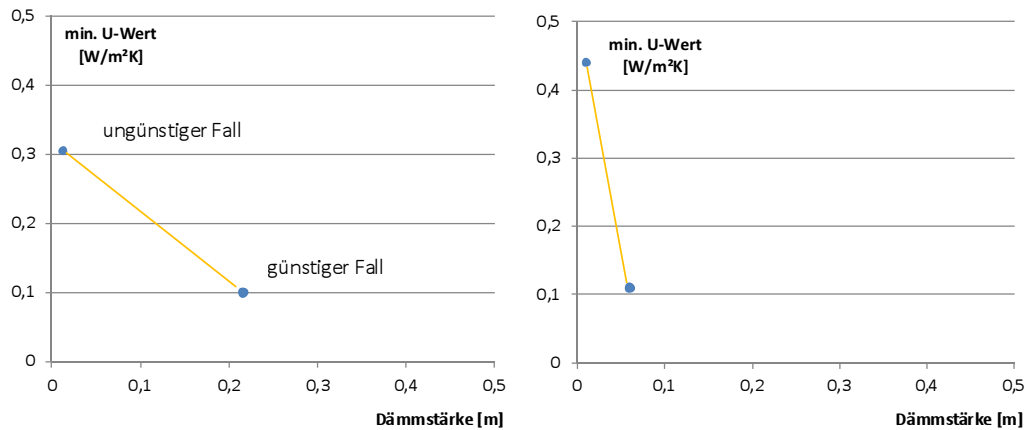
**Tabelle 4.5: Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Außenwänden gemäß EnEV 2002 mit konventionellen Dämmstoffen**

#### b) Zukunftsweisende Dämmstoffe

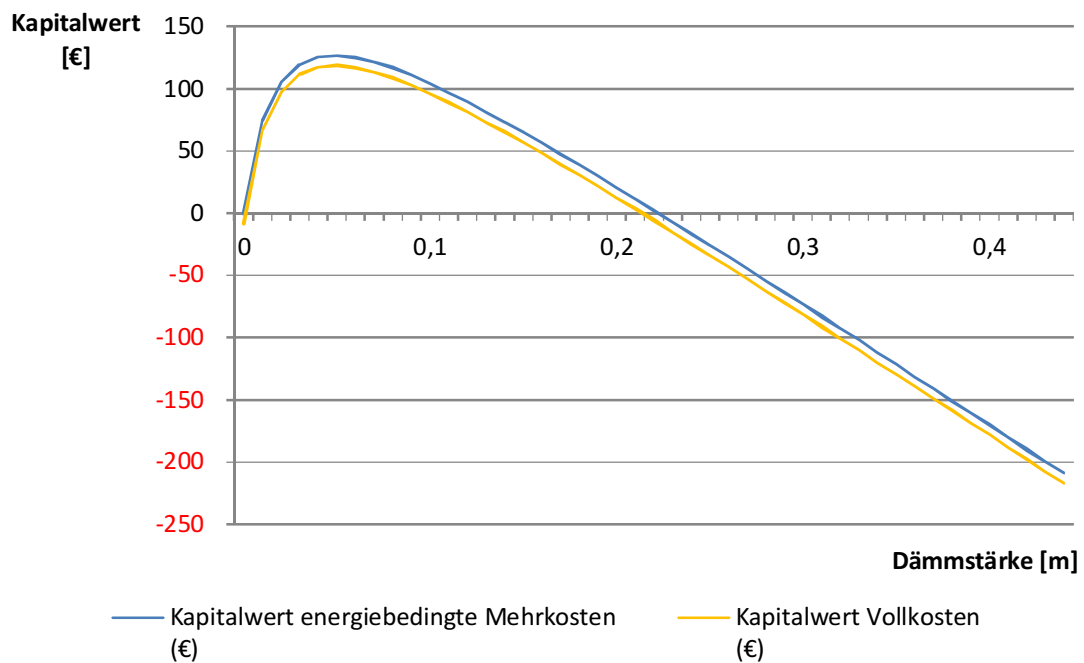
Für Hochleistungsdämmstoffe liegen die Optima naturgemäß bei wesentlich geringeren Dämmstärken. Die Optima für verschiedene Randbedingungen liegen nur wenige Zentimeter auseinander, die verbindende Kurve ist sehr steil. Die Randbedingungen haben einen größeren Einfluss auf den optimalen U-Wert als bei den konventionellen Dämmstoffen. Unter ungünstigen Randbedingungen liegt er deutlich höher als bei Mineralfaser oder Polystyrolschaum. Auch unter Zugrundelegung sehr steil abfallender Lernkurven und damit geringer Material- und Montagekosten fällt der minimale U-Wert nicht unter 0,11 W/m<sup>2</sup>K.

| Material | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m²K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m²K] |
|----------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| VIP      | 0,007         | 1,20                     | 87,35         | 100                | 33             | 2              | 0                                | 0,44                |
| VIP      | 0,007         | 1,20                     | 87,35         | 100                | 10             | 0              | 3                                | 0,11                |

**Tabelle 4.6:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Außenwänden mit Vakuumisolierpaneelen (VIP)



**Abbildung 4.22:** Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Außenwänden, die nach EnEV 2002 errichtet wurden, mit WDVS aus Mineralfaser oder Polystyrol (links) oder mit Vakuumisulationspaneelen



**Abbildung 4.23:** Kapitalwert als Funktion der Dämmstärke bei der Dämmung von Außenwänden mit Vakuumisulationspaneelen unter für Dämmmaßnahmen günstigen Randbedingungen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkostensteigerung)

Das Kapitalwert-Optimum ist deutlicher ausgeprägt als bei konventionellen Dämmstoffen. Zu hohe oder zu niedrige Dämmstärken wirken sich also stärker aus als bei konventionellen Dämmstoffen. Die Gesamtvarianz beträgt jedoch nur rund 350 Euro für das Intervall bis 45 cm Dämmstärke.

Für Aerogel-Dämmplatten zeigt sich ein ähnliches Bild wie für Vakuumpaneele: Die Bandbreite der wirtschaftlich optimalen Dämmstärken ist sehr gering. Unter ungünstigen Randbedingungen liegt der minimale U-Wert weit über den heutigen Standards. Unter günstigen Randbedingungen sinkt der optimale U-Wert auf 0,17 W/m<sup>2</sup>K.

| Material    | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m <sup>2</sup> K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m <sup>2</sup> K] |
|-------------|---------------|---------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Aerogel-    | 0,016         | 1,20                                  | 87,35         | 120                | 30             | 2              | 0                                | 0,83                             |
| Dämmplatten | 0,016         | 1,20                                  | 87,35         | 120                | 10             | 0              | 3                                | 0,17                             |

**Tabelle 4.7:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Außenwänden mit Aerogel-Dämmplatten

## Dämmung von Steildächern

### a) Konventionelle Dämmstoffe

Bei der Sanierung von Dächern kommen häufig Mineralfaserdämmstoffe zum Einsatz. Sie können in Kombinationen aus Zwischen- und Unter- bzw. Aufsparrendämmung in großen Dämmdicken eingebracht werden. Wie bei der Außenwanddämmung wird ein sehr guter Wärmedurchgangskoeffizient von 0,030 W/mK zugrunde gelegt. Im Ergebnis zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei der Außenwanddämmung.

| Material     | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m <sup>2</sup> K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m <sup>2</sup> K] |
|--------------|---------------|---------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Mineralwolle | 0,030         | 0,80                                  | 172,82        | 2,702              | 91             | 2              | 0                                | 0,32                             |
| Mineralwolle | 0,030         | 0,80                                  | 172,82        | 2,702              | 95             | 0              | 3                                | 0,105                            |

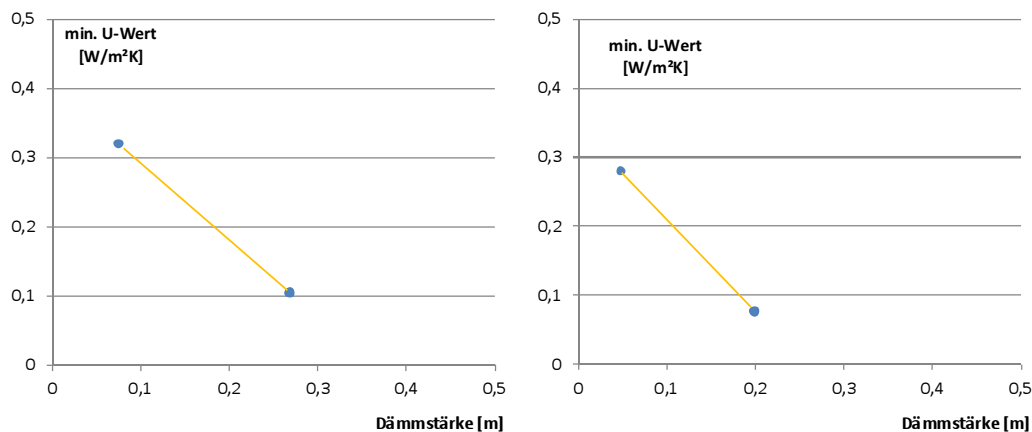
**Tabelle 4.8:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Steildächern mit Mineralwolle

### b) Zukunftsweisende Dämmstoffe

Polyurethan-Dämmstoffe (PU/PUR/PIR) werden heute in Dächern oft als Alternative zur Zwischensparrendämmung eingesetzt. Sie werden oberhalb der Sparren montiert und übernehmen gleichzeitig die Funktion der Unterdeckbahnen. Im Bereich der Polyurethan-Dämmstoffe gibt es Forschungsanstrengungen, die Zellgröße auf 1 µm zu verringern. Dadurch könnten Lambda-Werte erreicht werden, die mit 0,012 W/mK nah an der physikalischen Untergrenze liegen.

| Material | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m²K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m²K] |
|----------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| PU       | 0,012         | 1,60                     | 172,82        | 8                  | 45             | 2              | 0                                | 0,28                |
| PU       | 0,012         | 1,60                     | 172,82        | 8                  | 30             | 0              | 3                                | 0,077               |

**Tabelle 4.9:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Steildächern mit PU



**Abbildung 4.24:** Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Steildächern mit Mineralwolle (links) und mit Polyurethan (rechts)

Ein so optimierter PU-Dämmstoff würde unter günstigen Randbedingungen wirtschaftliche Optima von 0,077 W/m²K erreichen.

## Dämmung von Flachdächern

### a) Konventionelle Dämmstoffe

Die variablen Kosten bei der Dämmung von Flachdächern wurden in (IWU, 2012) als deutlich niedriger eingestuft als bei Steildächern. Aus diesem Grund wird für Flachdächer auch mit konventionellen Dämmstoffen schon ein sehr geringer U-Wert von 0,08 W/m²K unter günstigen Randbedingungen erreicht. Um diesen zu realisieren sind hohe Dämmstärken über 30 cm erforderlich. Diese stellen auf Flachdächern jedoch in der Regel kein technisches Problem dar.

| Material     | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m²K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m²K] |
|--------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| Mineralwolle | 0,030         | 0,80                     | 15,1          | 1,505              | 91             | 2              | 0                                | 0,241               |
| Mineralwolle | 0,030         | 0,80                     | 15,1          | 1,505              | 95             | 0              | 3                                | 0,079               |

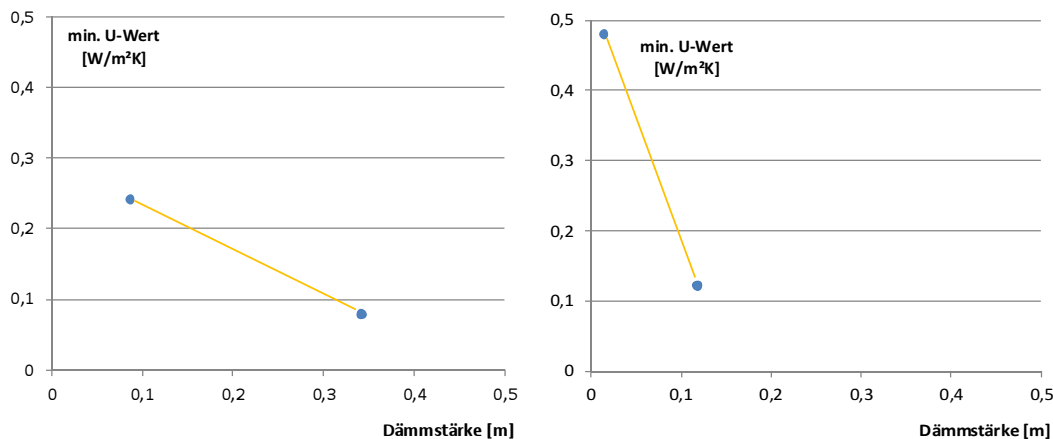
**Tabelle 4.10:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Flachdächern mit Mineralwolle

## b) Zukunftsweisende Dämmstoffe

Es werden bereits Polyurethan-Aerogel-Dämmplatten am Markt angeboten. Es wird angenommen, dass die Fixkosten für deren Montage in Flachdächern denen von konventionellen Dämmstoffen entsprechen. Unter der Annahme sehr günstiger Randbedingungen können wirtschaftlich optimale U-Werte von  $0,122 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht werden. Unter ungünstigen Randbedingungen wird das Optimum schon bei einer Dämmstärke von wenigen Zentimetern erreicht.

| Material   | Lambda<br>[W/mK] | U-Wert<br>ungedämmt<br>[W/m <sup>2</sup> K] | Fixkosten<br>[€] | var. Kosten<br>[€/cm] | Lernfaktor<br>[%] | Kalk. Zins<br>[%] | Brennstoff-<br>kosten-<br>anstieg<br>[% p.a.] | min.<br>U-Wert<br>[W/m <sup>2</sup> K] |
|------------|------------------|---------------------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|
| Aerogel-PU | 0,017            | 0,80                                        | 15,1             | 30                    | 40                | 2                 | 0                                             | 0,48                                   |
| Aerogel-PU | 0,017            | 0,80                                        | 15,1             | 30                    | 30                | 0                 | 3                                             | 0,122                                  |

**Tabelle 4.11:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Flachdächern mit Aerogel-PU



**Abbildung 4.25:** Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Flachdächern mit Mineralwolle (links) und mit Polyurethan mit Aerogelstruktur (rechts)

## Dämmung von obersten Geschossdecken

Es wird unterschieden in begehbare und nicht begehbare oberste Geschossdecken. Die Kosten für die Dämmung begehbare oberster Geschossdecken liegen etwas höher als bei nicht begehbaren. Dadurch ist der minimale U-Wert für Erstgenannte etwas höher. Insgesamt sind die minimalen U-Werte allerdings auf einem niedrigen Niveau – vergleichbar mit denen von Flachdächern.

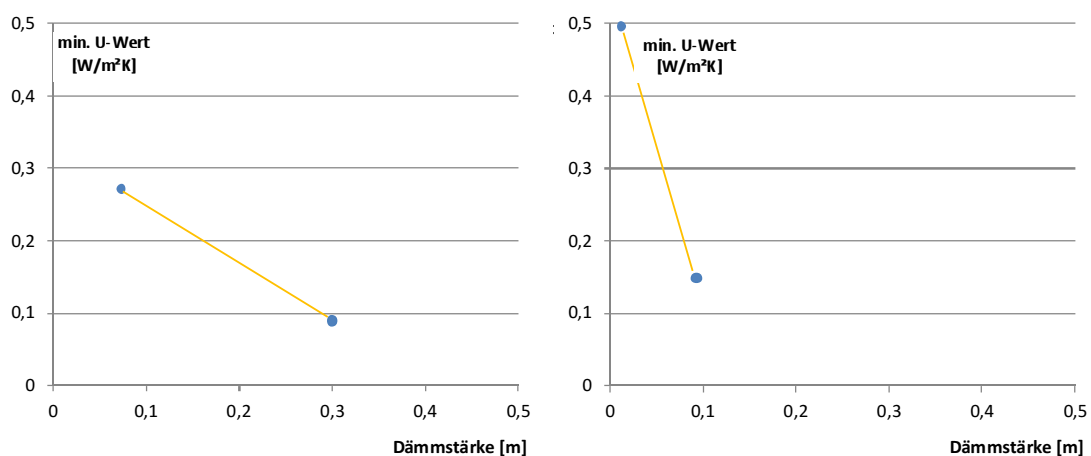
| Material         | Lambda<br>[W/mK] | U-Wert<br>ungedämmt<br>[W/m <sup>2</sup> K] | Fixkosten<br>[€] | var. Kosten<br>[€/cm] | Lernfaktor<br>[%] | Kalk. Zins<br>[%] | Brennstoff-<br>kosten-<br>anstieg<br>[% p.a.] | min.<br>U-Wert<br>[W/m <sup>2</sup> K] |
|------------------|------------------|---------------------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|
| Mineralfaser/EPS | 0,030            | 0,80                                        | 26,003           | 1,9202                | 91                | 2                 | 0                                             | 0,2715                                 |
| Mineralfaser/EPS | 0,030            | 0,80                                        | 26,003           | 1,9202                | 95                | 0                 | 3                                             | 0,089                                  |

**Tabelle 4.12:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von begehbaren obersten Geschossdecken mit Mineralfaser oder EPS

Auch für Polyurethan-Aerogel-Dämmplatten auf obersten Geschossdecken ist der minimale U-Wert auf einem vergleichbaren Niveau wie bei Flachdächern.

| Material   | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m²K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m²K] |
|------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| Aerogel-PU | 0,017         | 0,80                     | 26,003        | 30                 | 40             | 2              | 0                                | 0,496               |
| Aerogel-PU | 0,017         | 0,80                     | 26,003        | 30                 | 30             | 0              | 3                                | 0,149               |

**Tabelle 4.13:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von begehbaren obersten Geschossdecken mit Aerogel-PU

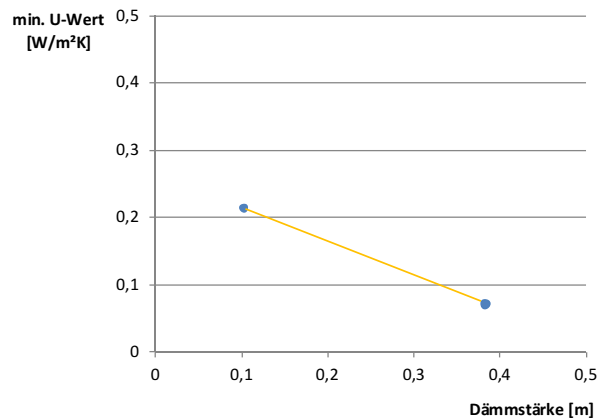


**Abbildung 4.26:** Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von begehbaren obersten Geschossdecken mit Mineralfaser- oder Polystyrol-Dämmstoffen (links) und mit Polyurethan mit Aerogelstruktur (rechts)

Bei der Dämmung von nicht begehbaren obersten Geschossdecken mit konventionellen Dämmstoffen werden unter günstigen Annahmen mit 0,071 W/m²K sehr niedrige U-Werte erreicht. Allerdings sind bei zuvor ungedämmten Decken dazu Dämmstärken von knapp 40 cm erforderlich. Nicht alle Gebäude sind statisch und/oder räumlich für solche Dämmstärken geeignet.

| Material         | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m²K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m²K] |
|------------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| Mineralfaser/EPS | 0,030         | 0,80                     | 0,2137        | 1,1671             | 95             | 2              | 0                                | 0,2135              |
| Mineralfaser/EPS | 0,030         | 0,80                     | 0,2137        | 1,1671             | 91             | 0              | 3                                | 0,071               |

**Tabelle 4.14:** Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von nicht begehbaren obersten Geschossdecken mit Mineralfaser oder EPS



**Abbildung 4.27: Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von nicht begehbaren obersten Geschossdecken mit Mineralfaser- oder Polystyrol-Dämmstoffen**

## Kellerdecken

### a) Konventionelle Dämmstoffe

Bei der Dämmung von Kellerdecken mit konventionellen Dämmstoffen werden die niedrigsten minimalen U-Werte von allen untersuchten Bauteilen erreicht. Allerdings ist dieser Wert für zuvor ungedämmte Kellerdecken in der Praxis kaum zu erreichen, weil dazu Dämmstärken von über 40 cm erforderlich sind. Das Kostenoptimum verläuft jedoch sehr flach, so dass auch unter ungünstigeren Bedingungen noch gute U-Werte unter  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht werden.

| Material         | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m²K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m²K] |
|------------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| Mineralfaser/EPS | 0,030         | 0,80                     | 26,506        | 1,0405             | 95             | 2              | 0                                | 0,202               |
| Mineralfaser/EPS | 0,030         | 0,80                     | 26,506        | 1,0405             | 91             | 0              | 3                                | 0,066               |

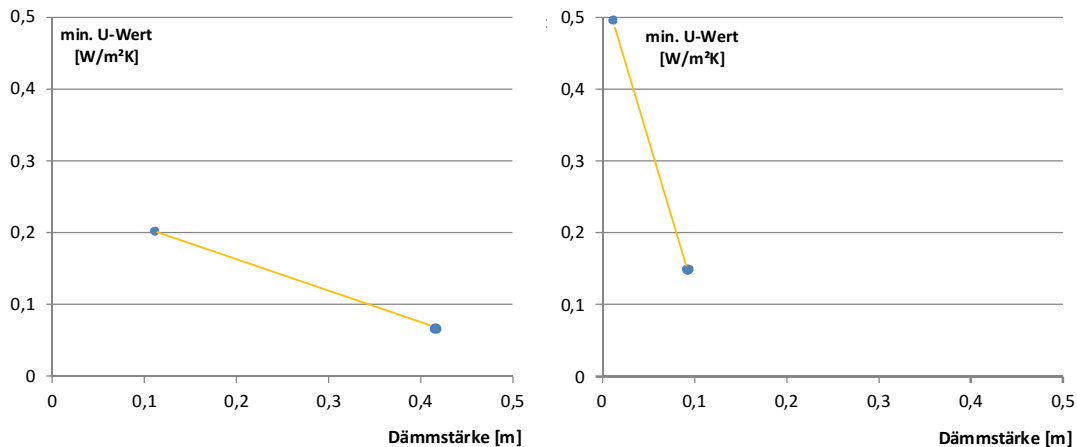
**Tabelle 4.15: Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung der Kellerdecke mit Mineralfaser oder EPS**

### b) Zukunftsweisende Dämmstoffe

Für Polyurethan-Aerogel-Dämmplatten liegt das Minimum bei  $0,149 \text{ W/m}^2\text{K}$  und entspricht damit dem Wert, der mit dem selben Dämmstoff für oberste Geschossdecken berechnet wurde.

| Material   | Lambda [W/mK] | U-Wert ungedämmt [W/m²K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m²K] |
|------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| Aerogel-PU | 0,017         | 0,80                     | 26,506        | 30                 | 40             | 2              | 0                                | 0,496               |
| Aerogel-PU | 0,017         | 0,80                     | 26,506        | 30                 | 30             | 0              | 3                                | 0,1488              |

**Tabelle 4.16: Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung der Kellerdecke mit Aerogel-PU**



**Abbildung 4.28:** Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Kellerdecken mit Mineralfaser- oder Polystyrol-Dämmstoffen (links) und mit Polyurethan mit Aerogelstruktur (rechts)

### Sensitivität der Parameter

Um die Wirkmächtigkeit der einzelnen Einflussgrößen zu bestimmen, wird eine Sensitivitätsanalyse aller Parameter durchgeführt. Die Parameter werden dabei einzeln in Schritten von zehn Prozentpunkten um  $\pm 40\%$  variiert und die resultierende prozentuale Änderung des kostenoptimalen U-Werts wird abgelesen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.29 dargestellt. Für die Sensitivitätsanalyse werden mittlere Parameter als Referenz angesetzt. Als Beispiel wird ein Phenolharz-Dämmstoff mit der Wärmeleitgruppe 020 eingesetzt.

| Material | Lambda [W/mK] | U-Wert vor Dämmung [W/m²K] | Fixkosten [€] | var. Kosten [€/cm] | Lernfaktor [%] | Kalk. Zins [%] | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | min. U-Wert [W/m²K] | Dämmstärke (m) | Kapitalwert Vollkosten (€) |
|----------|---------------|----------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------------------|
| PF 020   | 0,02          | 0,70                       | 87,35         | 5                  | 70             | 0,5            | 1,5                              | 0,159               | 0,097          | 74,58                      |

**Tabelle 4.17:** Ausgangsparameter der Sensitivitätsanalyse

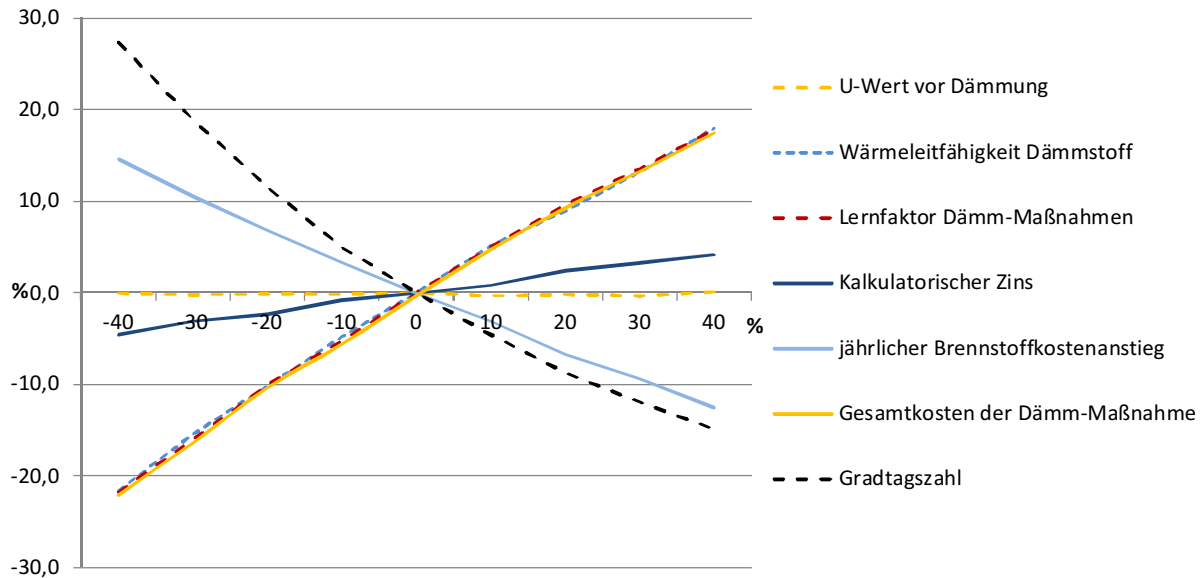
Den stärksten Einfluss auf den wirtschaftlich optimalen U-Wert hat die **Gradtagszahl**. Sie kann jedoch nicht durch Dämm-Maßnahmen beeinflusst werden. Das Nutzerverhalten hat einen immensen Einfluss auf die reale Gradtagszahl. Anders ausgedrückt: bei einem verschwenderischen Nutzer amortisiert sich eine Dämmung am schnellsten – bzw. aufwändige Dämm-Maßnahmen können zu einem guten Teil auch durch ein suffizientes Nutzerverhalten ersetzt werden.

Der **Lernfaktor** für die Dämm-Maßnahmen und damit auch die Gesamtkosten sind der zweitstärkste Einfluss. Sie wiegen schwerer als der Anstieg der Brennstoffkosten. Die Lernkurven sind wiederum vom Marktgeschehen abhängig. Marktanreize können sich also sehr stark auf künftige Dämm-Standards auswirken.

Die **Wärmeleitfähigkeit** der Dämmstoffe geht mit derselben Steigung in die Wirtschaftlichkeitsberechnung ein wie der Lernfaktor. Da eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit bei den bislang bekannten Produkten jedoch tendenziell zu höheren spezifischen Kosten geführt hat (siehe Kapitel 4.4.1), führt sie nicht per se zu niedrigeren minimalen U-Werten. Hochleistungsdämmstoffe werden daher eher als Problemlöser für schwierig zu dämmende Bauteile gesehen.

Der **Anstieg der Brennstoffkosten** geht – in der untersuchten Größenordnung - unterproportional in die Wirtschaftlichkeitsberechnung ein.

Der **U-Wert der Bauteile vor der Dämm-Maßnahme** wirkt sich auf den wirtschaftlich optimalen U-Wert überhaupt nicht aus. Dies sagt jedoch nichts über die Höhe des Kapitalwerts aus. Bei Bauteilen, die bereits im Errichtungszustand einen niedrigen U-Wert haben, ist das Einsparpotenzial oft so gering, dass weitere Dämm-Maßnahmen nicht wirtschaftlich durchführbar sind.



**Abbildung 4.29: Sensitivität einer prozentualen Änderung der Berechnungsparameter auf die Änderung des kostenoptimalen U-Werts**

#### 4.4.4 Bestimmung des wirtschaftlichen Minimums auf Gebäudeebene

In Kapitel 4.4.3 wurden die Bauteile isoliert betrachtet. Der jeweilige wirtschaftlich optimale U-Wert wurde auf Basis der Einsparungen der Transmissionsverluste bestimmt. In diesem Kapitel wird dagegen untersucht, welche wirtschaftlich optimalen U-Werte sich einstellen, wenn mehrere Bauteile eines Gebäudes gleichzeitig gedämmt werden. Die Dämmstärken an Außenwand, Dach und Keller werden dabei simultan erhöht und der jeweils kostenoptimale U-Wert berechnet. Der U-Wert der Fenster wird nicht variiert, sondern konstant gehalten.

Zusätzlich wird der Bilanzrahmen erweitert, indem neben den Transmissionswärmeverlusten auch Lüftungswärmeverluste sowie solare und innere Gewinne betrachtet werden. Es wird also der Einfluss von Dämm-Maßnahmen auf den gesamten Heizwärmeverbrauch untersucht. Die Berechnung des Heizwärmeverbrauchs wird in GEMOD durchgeführt. Der Rebound-Effekt durch das Nutzerverhalten wird dabei ebenso in die Berechnung einbezogen wie die unterschiedlichen Ausnutzungsgrade für die Wärmegewinne.

Die Berechnung wird als Vollkostenrechnung mit denselben Randbedingungen durchgeführt wie die bauteilweisen Berechnungen in Kapitel 4.4.3. Sämtliche Kosten für Investitionen und Brennstoffe werden über einen Zeitraum von 30 Jahren mit einem kalkulatorischen Zins diskontiert und zu einem Kapitalwert aufsummiert. Der kalkulatorische Zinsfuß wird zwischen 0 und 2 % variiert. Die Brennstoffkosten werden für das Startjahr mit 0,065 €/kWh festgelegt. Der Anstieg der Brennstoffkosten variiert zwischen 0 und 3 % pro Jahr. Da in Kapitel 4.4.3 die niedrigsten U-Werte

mit konventionellen Dämmstoffen erzielt wurden, wird hier nur mit diesen Dämmstoffen gerechnet. Die Wärmeleitfähigkeit wird mit 0,030 W/mK angesetzt. Die Kosten für die Sanierungsmaßnahmen wurden nach variablen und fixen Kosten eingeteilt und aus (IWU, 2012) übernommen. Die Lernkurveneffekte variieren zwischen 91 und 95 %.

Die Berechnung wird für mehrere Gebäudetypen jeweils mit oder ohne Wärmerückgewinnungsanlage und für günstige und ungünstige Kombinationen der Randbedingungen durchgeführt.

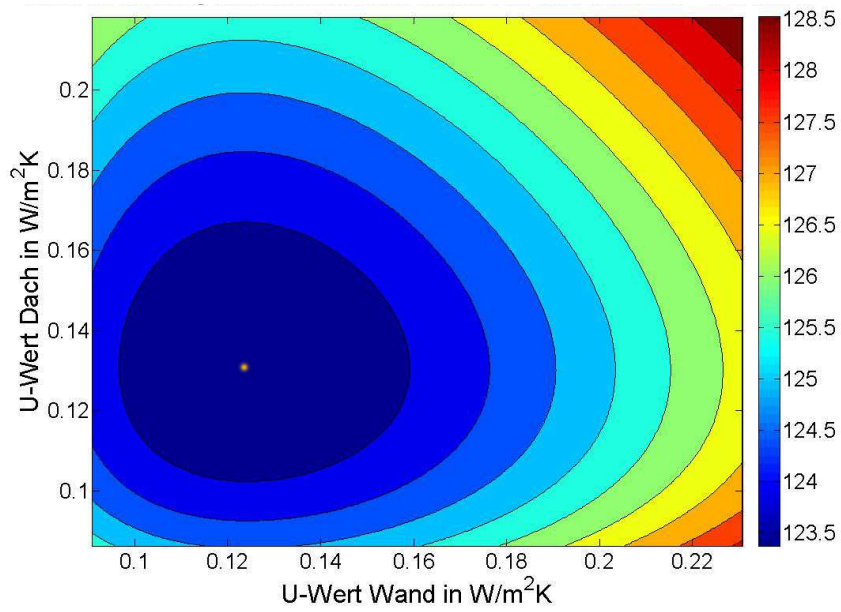
| Gebäudetyp | WRG  | Brennstoffkostenanstieg [% p.a.] | kalk. Zins [% p.a.] | Dach [W/m²K] | Außenwand [W/m²K] | Keller [W/m²K] |
|------------|------|----------------------------------|---------------------|--------------|-------------------|----------------|
| EFH_B      | ohne | 3%                               | 0%                  | 0,13         | 0,12              | 0,13           |
| EFH_B      | mit  | 3%                               | 0%                  | 0,14         | 0,13              | 0,13           |
| EFH_E      | ohne | 3%                               | 0%                  | 0,13         | 0,12              | 0,12           |
| EFH_E      | mit  | 3%                               | 0%                  | 0,13         | 0,13              | 0,13           |
| EFH_E      | ohne | 0%                               | 2%                  | 0,32         | 0,30              | 0,30           |
| EFH_E      | mit  | 0%                               | 2%                  | 0,32         | 0,31              | 0,30           |
| MFH_E      | mit  | 3%                               | 0%                  | 0,15         | 0,12              | 0,12           |
| GMH_E      | ohne | 3%                               | 0%                  | 0,13         | 0,12              | 0,12           |
| GMH_E      | mit  | 3%                               | 0%                  | 0,14         | 0,14              | 0,13           |

**Tabelle 4.18: Kostenoptimale U-Werte ganzer Gebäude auf Basis des Heizwärmeverbrauchs**

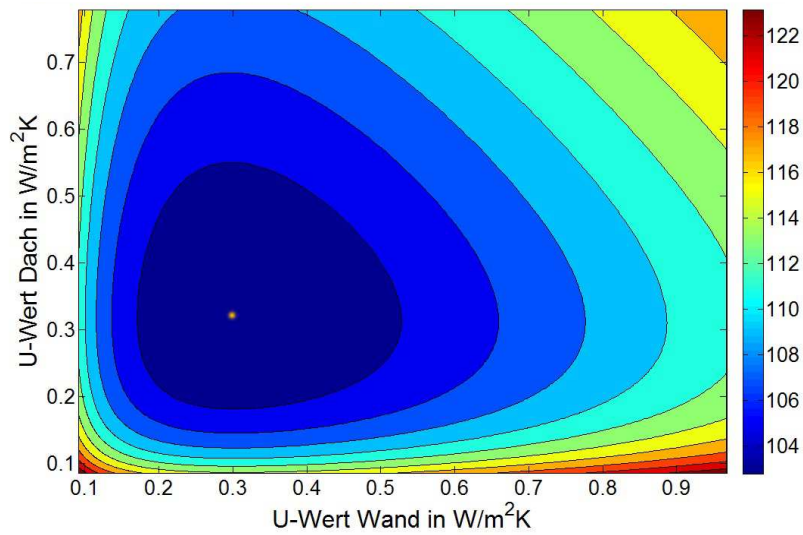
In Tabelle 4.18 sind die verschiedenen Kombinationen der Randbedingungen und die entsprechenden kostenoptimalen U-Werte dargestellt. Es zeigt sich, dass die kostenoptimalen U-Werte etwas höher liegen als nach der bauteilspezifischen Berechnung in Kapitel 4.4.3. Auch unter sehr günstigen Bedingungen wird ein U-Wert von 0,12 W/m²K nicht unterschritten.

In Abbildung 4.30 sind die kapitalwertigen Gesamtkosten für Investition und Brennstoffkosten dargestellt, wie sie sich für die Kombination in Zeile 3 in Tabelle 4.18 ergeben (typisches Einfamilienhaus Typ E der Baujahre 1958 – 1968 ohne Wärmerückgewinnungsanlage, 3 % Brennstoffkostenanstieg, 0 % kalkulatorischer Zins). Die Kosten sind in Abhängigkeit der U-Werte des Daches und der Außenwand in Tausend Euro dargestellt. Jede Farbe bezeichnet einen Kostenbereich von 500 Euro. Der Bereich der niedrigsten Gesamtkosten (dunkelblau) ist verhältnismäßig groß – das Optimum verläuft also relativ flach. Der orangefarbene Punkt kennzeichnet die kostenoptimalen U-Werte von Dach und Außenwand. Um für Dach und Außenwand U-Werte von 0,10 W/m²K zu realisieren, wären Mehrkosten in Höhe von rund 1 % erforderlich. Der U-Wert des Kellers geht in die Berechnung ebenfalls ein, ist in der Abbildung jedoch nicht dargestellt.

In Abbildung 4.31 ist die Berechnung für das gleiche Gebäude unter wirtschaftlichen Randbedingungen dargestellt, die eine Dämmung erschweren (0 % Brennstoffkostenanstieg, 2 % kalkulatorischer Zins). Die Abbildung ist anders aufgelöst als zuvor- jede Farbe bezeichnet nun einen Kostenbereich von 2.000 Euro. Es wird deutlich, dass das Optimum auch in diesem Fall eher flach verläuft. Die kostenoptimalen U-Werte liegen in diesem besonders ungünstigen Fall bereits oberhalb der heutigen Anforderungen.



**Abbildung 4.30: Kapitalwert der Gesamtkosten in Tausend Euro über 30 Jahre in Abhängigkeit von den U-Werten von Außenwand und Dach (kalk. Zins 0 %, Brennstoffkostenanstieg 3 % p.a.)**



**Abbildung 4.31: Kapitalwert der Gesamtkosten in Tausend Euro über 30 Jahre in Abhängigkeit von den U-Werten von Außenwand und Dach (kalk. Zins 2 %, Brennstoffkostenanstieg 0 % p.a.)**

#### 4.5 Ergebnisse für den minimalen Wärmedurchgangskoeffizienten

Tabelle 4.19 zeigt die minimalen U-Werte, die mit den verschiedenen Methoden ermittelt wurden, im Vergleich. Die prozentualen Abweichungen zwischen den Ergebnissen sind zum Teil recht hoch. Das ist jedoch auch dem sehr geringen Gesamtniveau der Zahlenwerte geschuldet. Die absoluten Abweichungen sind sehr gering. Die kleinsten Zahlenwerte wurden von der Extrapolation erbracht, die eine eher ungenaue Methode ist. Die Ermittlung des wirtschaftlichen Minimums auf Gebäudeebene erbrachte konsequent die höchsten Zahlenwerte. Jedoch verlaufen die Optima häufig sehr flach, so dass ein niedrigerer U-Wert mit nur geringen Mehrkosten zu realisieren ist.

| Bauteil       | minimaler U-Wert          |                              |                                       |                                       |                    |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
|               | Minimum aus Extrapolation | gesamt-energetisches Minimum | wirtschaftliches Minimum Bauteilebene | wirtschaftliches Minimum Gebäudeebene | in GEMOD verwendet |
| Dach / o. Gd. | 0,07                      |                              | 0,08                                  | 0,13                                  | 0,08               |
| Außenwand     | 0,07                      | 0,1                          | 0,1                                   | 0,12                                  | 0,1                |
| Keller        | 0,11                      |                              | 0,07                                  | 0,12                                  | 0,08               |

**Tabelle 4.19:** Vergleich der ermittelten minimalen U-Werte in W/m<sup>2</sup>K und Festlegung der Werte für die Modellrechnung

Die letzte Spalte zeigt die minimalen U-Werte, die in die Szenarienberechnung mit GEMOD eingehen. Dort bezeichnen sie den besten erreichbaren Standard, der – je nach Szenario – erst zu einem späten Zeitpunkt und nur bei einem Teil der Sanierungen erreicht wird. Die letzte Baualtersklasse der Neubauten in GEMOD (Baujahre 2035 bis 2050) wird mit diesen U-Werten errichtet.

## 5 Szenarien zum Nutzenergieverbrauch

Es werden drei Planspiele näher analysiert. Es sind dies

1. das Trendszenario, welches die Entwicklung bis 2050 bei Fortschreibung des heutigen Ambitionsniveaus abbildet (Kapitel 5.1)
2. das Szenario „Engagierter Klimaschutz“ (Kapitel 5.2), welches aus Sicht der Autoren den höchstmöglichen - aber dennoch realistischen – Ambitionsgrad darstellt und somit das realisierbare Potenzial von Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich aufzeigt („Realsockel“)
3. die Analyse des Nutzwärmesockels, der mit technischen Mitteln nicht weiter gesenkt werden kann („Normsockel“). Dieser stellt das theoretische Potenzial von Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich dar (Kapitel 5.3).

Auch wenn es hier von Interesse ist, das theoretische Potenzial (Normsockel) zu bestimmen, so ist dieses doch weit weniger gewichtig als das realisierbare Potenzial (Realsockel) im Szenario „Engagierter Klimaschutz“, da nur dieses sich auf die konkrete künftige Entwicklung auswirkt.

### 5.1 Trendszenario

Ziel des Trendszenarios ist es, die Entwicklung des Heizwärmebedarfs bis zum Jahr 2050 unter der Annahme darzustellen, dass der heutige Ambitionsgrad in Bezug auf energieeffizientes Bauen und Sanieren beibehalten wird. Die relevanten Einflussgrößen werden dabei nicht auf dem heutigen Niveau eingefroren, sondern werden in der heutigen Geschwindigkeit fortgeschrieben. Das Trendszenario stellt somit gleichzeitig die Obergrenze der zu erwartenden Verbrauchsentwicklung dar – unter der Voraussetzung, dass der Ambitionsgrad in Zukunft nicht sinken wird. Das Szenario wird bewusst zusätzlich zu ähnlichen Trendszenarien (z.B. Prognos, 2014) berechnet, auch um die technische Richtigkeit des Gebäudemodells GEMOD und der Bottom-Up-Methodik zu validieren. Die wichtigsten Einflussgrößen, die das Trendszenario abgrenzen, werden im Folgenden beschrieben.

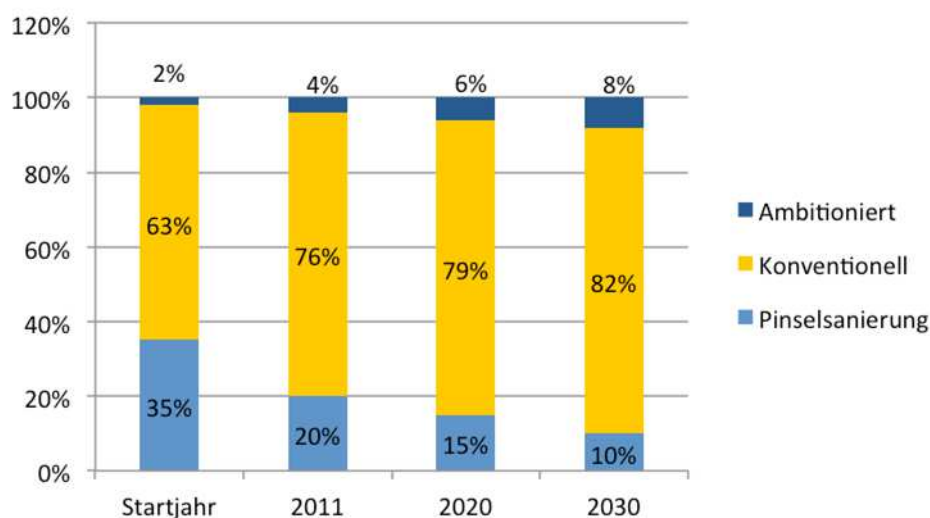
#### 5.1.1 U-Wert-Szenarien

Für die Bauteile Dach/oberste Geschossdecke, Außenwand, Kellerdecke/Kellerfußboden und Fenster wurden die U-Werte festgelegt, die im Falle einer Sanierung realisiert werden. Sie werden in die beiden Varianten „konventionelle Sanierung“ und „ambitionierte Sanierung“ eingeteilt. Die U-Werte für die konventionellen Sanierungen im Startjahr 2011 orientieren sich an den Vorgaben von Anlage 3 EnEV, jedoch werden sie um 25 % angehoben, um einen mangelhaften technischen Vollzug der EnEV zu berücksichtigen. Die U-Werte werden in mehreren gleichmäßigen Stufen bis zum Jahr 2050 abgesenkt. Der Zielwert für die konventionelle Sanierung liegt im Bereich der heutigen Passivhaus-Anforderungen, bei Dächern noch darunter. Für ambitionierte Sanierungen entspricht der Startwert den Anforderungen der KfW an Einzelmaßnahmen, der Endwert wurde auf den voraussichtlich minimal erreichbaren U-Wert gesetzt (Kapitel 4.5). Für Fenster wird für 2050 ein U-Wert von  $0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$  eingesetzt. Heute absehbare Entwicklungen werden damit berücksichtigt und sukzessive in die Breite der Sanierungsfälle gebracht.

Weitergehende Qualitäten – wie etwa 12-fach-Verglasungen – werden nicht mit einer nennenswerten Verbreitung bis 2050 gesehen.

### 5.1.2 Sanierungstiefe

Die jährlich errechneten Sanierungsfälle werden auf die Varianten „konventionelle Sanierung“ und „ambitionierte Sanierung“ verteilt. Zusätzlich ist auch die Variante „Pinselsanierung“ möglich. In diesem Fall wird die energetische Qualität durch die Sanierung nicht verändert, das Bauteil ist jedoch für die Länge der Nutzungsdauer von einer weiteren Sanierung ausgeschlossen. Für das Startjahr wird ein Anteil von Pinselsanierungen von gut einem Drittel angenommen. Genaue Zahlen über den tatsächlichen Vollzug der EnEV liegen jedoch leider nicht vor. Bis 2050 steigen die Anteile der konventionellen und ambitionierten Sanierungen kontinuierlich an.



**Abbildung 5.1:** Prozentuale Verteilung der Sanierungsarten Pinsel, konventionell und ambitioniert (entsprechend Sanierungstiefen) bei Ablauf der Nutzungsdauer eines Bauteils

Die energetische Sanierungsrate wird in GEMOD nicht unmittelbar vorgegeben, sondern berechnet sich aus den Nutzungsdauern der Bauteile und dem Anteil der energetischen Sanierungen gegenüber den Pinselsanierungen. Bedingt durch die weibullverteilten Sanierungszyklen jedes einzelnen Bauteils, weisen diese wellenförmige zeitliche Verteilungen auf, die sich für den gesamten Gebäudebestand überlagern. Daher ist die Sanierungsrate keine konstante Größe. Die berechneten durchschnittlichen Sanierungsraten der jeweiligen Zeiträume zeigt Tabelle 5.1.

|     | mittlere Sanierungsrate 2011 | mittlere Sanierungsrate 2020 | mittlere Sanierungsrate 2030 | mittlere Sanierungsrate 2040 |
|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| WG  | 1,12%                        | 1,38%                        | 1,47%                        | 1,55%                        |
| NWG | 1,64%                        | 2,02%                        | 2,14%                        | 2,27%                        |

**Tabelle 5.1:** Sanierungsraten im Trendszenario

Für Nichtwohngebäude wird sowohl eine kürzere Nutzungsdauer der Bauteile angenommen als auch ein geringerer Anteil von Pinselsanierern, weil dort ein höherer Anteil von professionellem Gebäudemanagement vermutet wird als bei Wohngebäuden.

### 5.1.3 Anteil Wärmerückgewinnung

In Bezug auf die Lüftungswärmeverluste werden nur Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung im Modell erfasst. Andere Lüftungsanlagen sind für den Heizwärmebedarf nur mittelbar wirksam. Der Anteil der Gebäude mit Wärmerückgewinnungsanlagen im Startjahr ist mit aktuellen Marktdaten sowie mit der IWU-Datenbasis (IWU, 2010) abgeglichen. Der jährliche Zubau erfolgt in einer Fortschreibung des aktuellen Marktgeschehens mit einem kontinuierlichen Anstieg. Bei Wohngebäuden steigt der jährliche Zubau von rund 30.000 Anlagen im Startjahr auf rund 170.000 Anlagen im Jahr 2050.

Bei Nichtwohngebäuden ist der Ausstattungsgrad mit Wärmerückgewinnungsanlagen im Startjahr mit rund 8 % wesentlich höher als bei Wohngebäuden. Er steigt in Abhängigkeit vom Baujahr der Gebäude bis 2050 an, wo durchschnittlich 35 % der Nichtwohngebäude mit einer Wärmerückgewinnungsanlage ausgestattet sind.

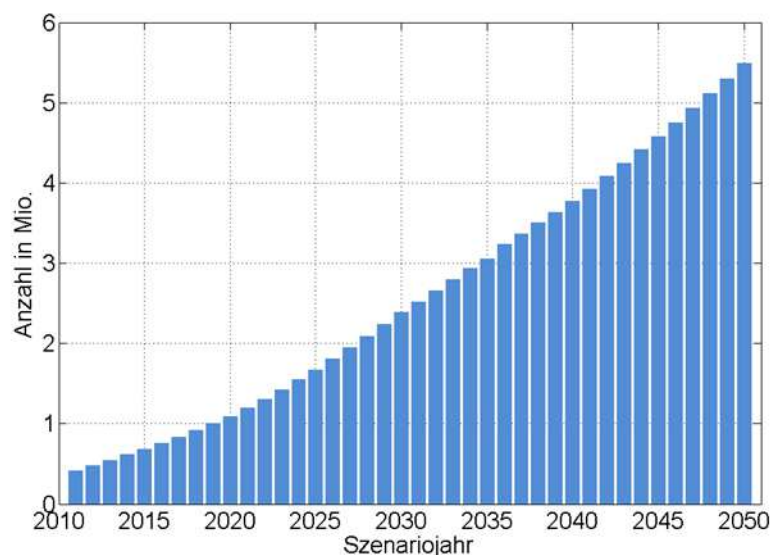


Abbildung 5.2: Anzahl der Wärmerückgewinnungsanlagen in Wohngebäuden

### 5.1.4 Neubau und Abriss

Die Neubauraten fallen im Trendszenario – vom aktuellen Wert ausgehend – gleichmäßig ab. Unter Abriss ist der gesamte Abgang aus dem beheizten Bestand zusammengefasst, also auch Zunahme des Leerstands. Die Abrissrate ist so angepasst, dass die gesamte Wohnfläche in Wohngebäuden den aktuellen Prognosen folgt (siehe Kapitel 3.1).

Für Nichtwohngebäude wird von doppelt so hohen Abriss- und Neubauraten ausgegangen. Eine genauere Angabe der Entwicklung des Nichtwohngebäudebestands ist aufgrund der fehlenden statistischen Erfassung nicht möglich.

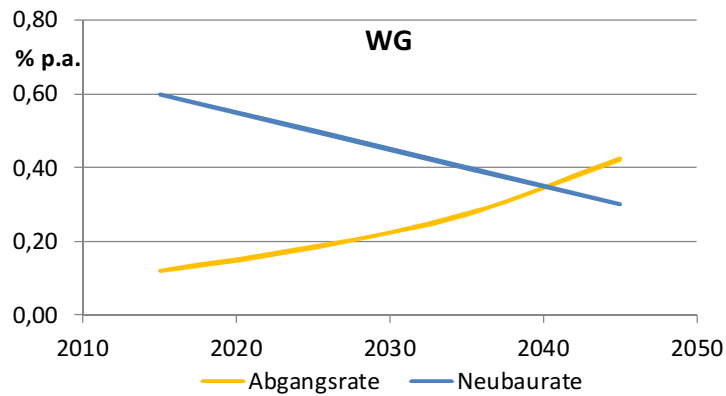


Abbildung 5.3: Entwicklung von Neubau- und Abrissrate für Wohngebäude im Trendszenario

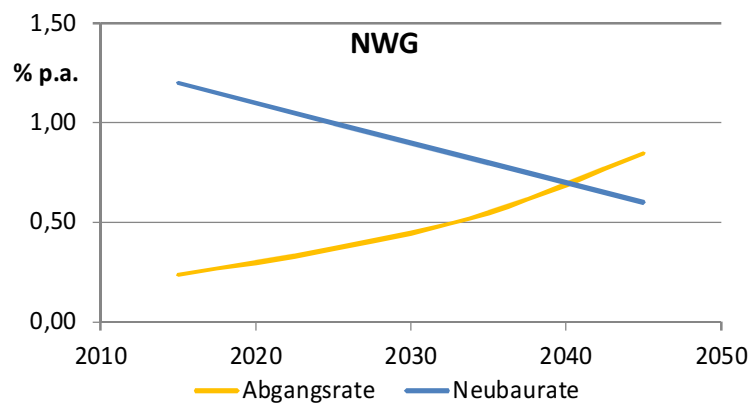


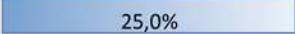
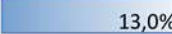
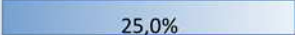
Abbildung 5.4: Entwicklung von Neubau- und Abrissrate für Nichtwohngebäude im Trendszenario

Die Abriss- und Neubauraten werden, wie Kapitel 3.1 beschrieben, für die einzelnen Gebäudetypen differenziert vorgegeben. Es wird davon ausgegangen, dass überproportional viele Einfamilienhäuser sowie Reihenhäuser neu gebaut werden. Die angenommene Verteilung zeigt nachfolgende Tabelle.

| Neubau | 2011-2020 | 2021-2030 | 2031-2040 | 2041-2050 |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| EFH    | 33,0%     | 33,0%     | 33,0%     | 33,0%     |
| RH     | 33,0%     | 33,0%     | 33,0%     | 33,0%     |
| MFH    | 17,0%     | 17,0%     | 17,0%     | 17,0%     |
| GMH    | 17,0%     | 17,0%     | 17,0%     | 17,0%     |

Tabelle 5.2: Prozentuale Verteilung der Gesamtneubaurate auf die Gebäudegrößen

Für den Abgang wird festgelegt, dass überwiegend Gebäude der Baualtersklassen von 1919 bis 1968 abgerissen bzw. leergezogen werden. Der Anteil der älteren Gebäude ist wesentlich geringer, für jüngere Baujahre setzt der Abriss erst später ein.

| Abriss | Verteilung auf BAK                                                                      |                                                                                          |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gesamt | WG                                                                                      | NWG                                                                                      |
| A      |  2,0%  |  2,0%   |
| B      |  3,0%  |  3,0%   |
| C      |  25,0% |  13,0% |
| D      |  25,0% |  20,0% |
| E      |  20,0% |  22,0% |
| F      |  7,0%  |  15,0% |
| G      |  6,0%  |  11,0% |
| H      |  5,0%  |  7,0%   |
| I      |  3,0%  |  3,0%   |
| J      |  2,0%  |  2,0%   |
| K      |  1,0%  |  1,0%   |
| L      |  1,0%  |  1,0%   |
| M      | 0,0%                                                                                    | 0,0%                                                                                     |

**Tabelle 5.3:** Prozentuale Verteilung der Gesamtabrissrate auf die Baualtersklassen im Trendszenario

### 5.1.5 Ergebnisse des Trendszenarios

Der Raumwärmeverbrauch geht im Trendszenario von 625 TWh (2.248 PJ) auf 358 TWh (1.290 PJ) und somit um 43 % zurück. Der Warmwasserwärmeverbrauch steigt hingegen von 69 TWh (247 PJ) in 2011 auf 75 TWh (268 PJ) in 2050. Das ist ein Anstieg um 9 %, der durch den Zuwachs der Wohn- bzw. Nutzflächen getrieben ist.

Der gesamte Nutzwärmeverbrauch für Raumheizung und Warmwasser in Wohn- und Nichtwohngebäuden geht damit im Trendszenario von 693 TWh (2.495 PJ) zurück auf 433 TWh (1.559 PJ). Das ist ein Rückgang um 37 %.

Um bei diesem Nutzwärmeverbrauch die Klimaschutzziele – also eine Primärenergieeinsparung von 80 % - erreichen zu können, müsste bei der mittleren Anlagenaufwandszahl des Gesamtbestands eine Einsparung von rund 68 % realisiert werden. Das heißt, die relativ geringe, durch Dämmmaßnahmen erzielte Einsparung müsste durch sehr hohe Einsparungen im Bereich der Wärmeerzeugung und der Primärenergiefaktoren ausgeglichen werden.

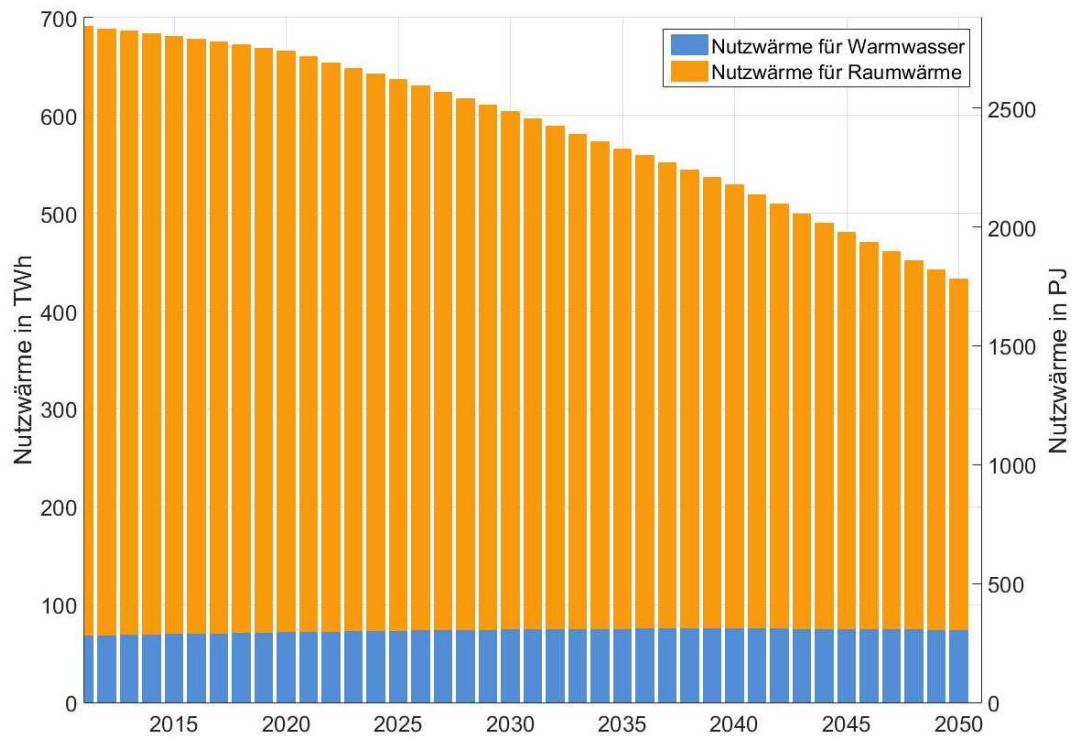


Abbildung 5.5: Nutzwärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser im Trendszenario für Wohn- und Nichtwohngebäude

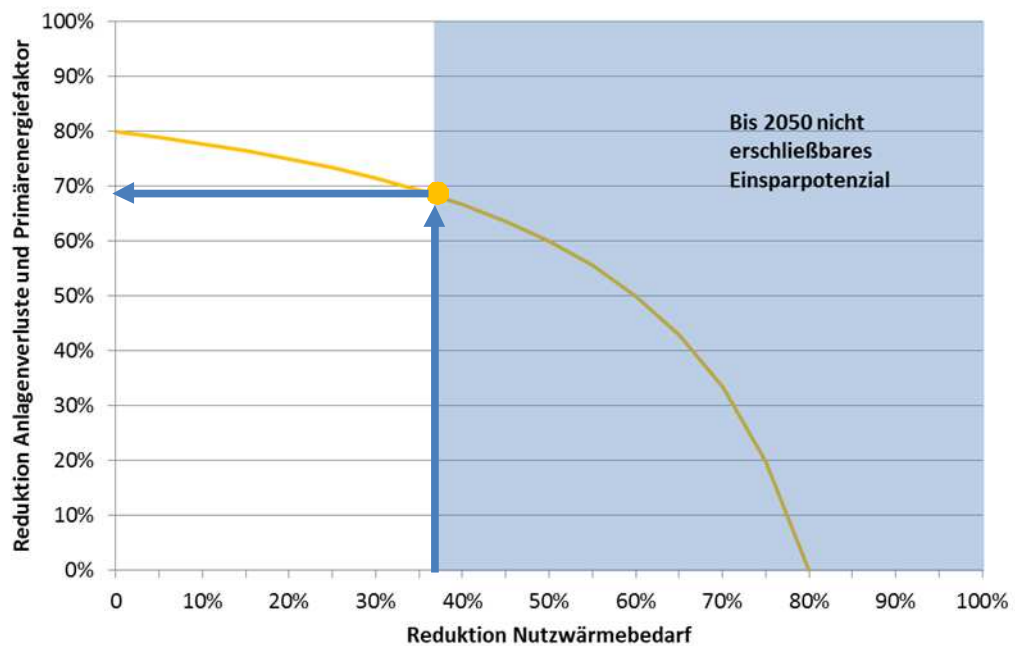


Abbildung 5.6: Die Nutzwärmereduktion um 37 % führt zu einer erforderlichen Reduktion der Anlagenverluste und des Primärenergiefaktors um 68 %

Betrachtet man nur den Raumwärmeverbrauch ohne Warmwasserbereitung, so zeigt sich, dass Nichtwohngebäude etwa halb so viel verbrauchen wie Wohngebäude. Dieses Verhältnis bleibt bis 2050 erhalten.

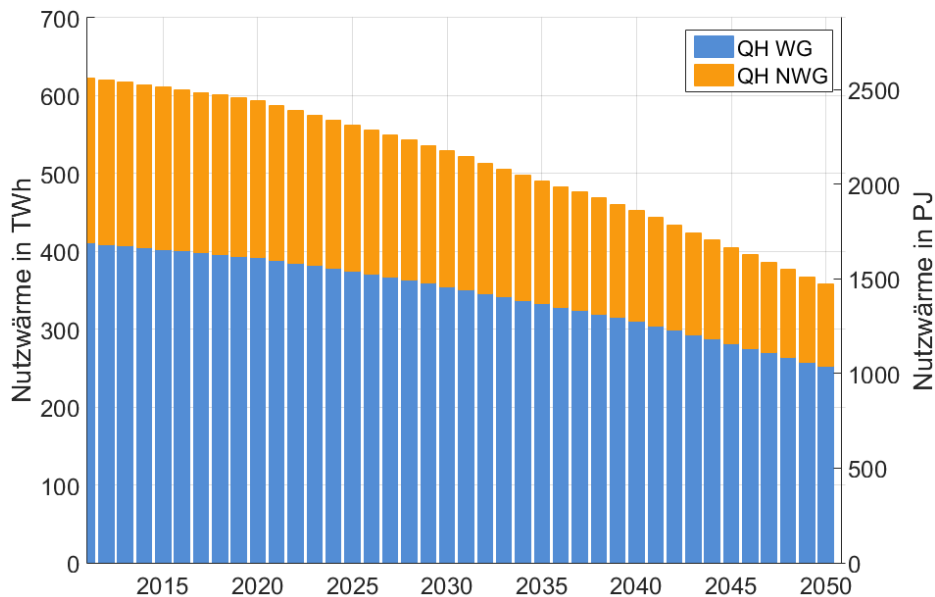


Abbildung 5.7: Heizwärmeverbrauch im Trendszenario nach Wohn- und Nichtwohngebäuden

### 5.1.6 Vergleich mit anderen Studien

Der Wärmeverbrauch für das Jahr 2050 wird den Ergebnissen anderer Studien gegenübergestellt. Die folgenden aktuellen Studien machen Angaben über den Heizwärmebedarf (-verbrauch):

- IFEU, Ecofys, IWU, Uni Bielefeld, 2015; Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich (IFEU et al., 2014)
- Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich (IWU, 2013)
- Wärme- und Kältestrategie (Fraunhofer ISE et al., 2012)

Die Ansätze der Studien unterscheiden sich hinsichtlich der betrachteten Gebäude, des Bilanzrahmens und ihrer Zielrichtung. So bezieht IWU keine Nichtwohngebäude in die Berechnung ein, berücksichtigt jedoch zusätzlich die Verluste für Speicherung, Verteilung und Übergabe der Wärme, die in GEMOD nicht enthalten sind. Das GEMOD-Ergebnis für Raumwärme- und Warmwasserverbrauch in Wohngebäuden liegt ca. 25 % unter dem Ergebnis von IWU.

In (Fraunhofer ISE et al., 2012) werden ebenfalls keine Nichtwohngebäude abgebildet. Außerdem ist der Warmwasserverbrauch nicht in dem Ergebnis enthalten. Der entsprechende Wert in GEMOD liegt ca. 13 % darüber.

Im Trendszenario von Ecofys sind Nichtwohngebäude und Warmwasserverbrauch enthalten. Das Szenario stellt einen recht hohen Ambitionsgrad dar und erzielt deshalb eine um 12 Prozentpunkte höhere Einsparung.

Nachfolgende sind die Ergebnisse dargestellt. Der Bilanzrahmen wurde innerhalb von GEMOD jeweils an den der Vergleichsstudie angepasst, so dass die Ergebnisse direkt miteinander vergleichbar wurden.

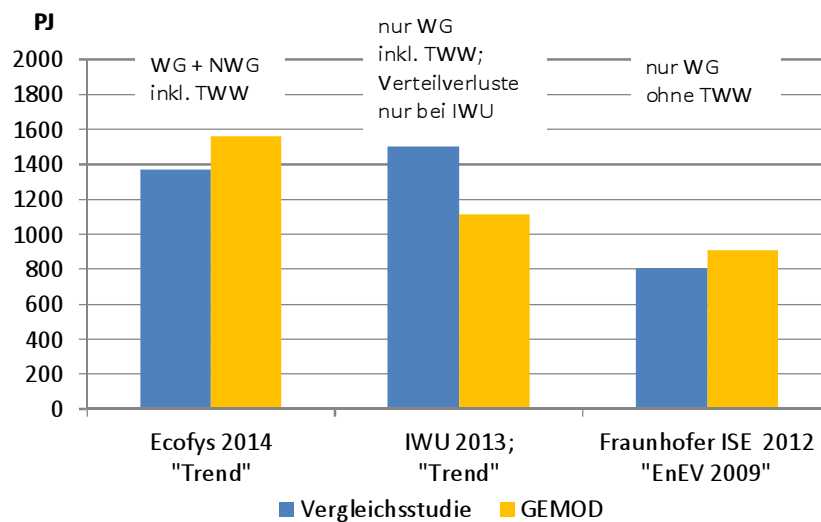


Abbildung 5.8: Vergleich mit den Trendergebnissen anderer Studien

Die Berechnungsergebnisse des Gebäudemodells GEMOD erscheinen im Vergleich zu anderen Berechnungen plausibel. Es gibt sowohl Über- wie auch Unterschreitungen der Ergebnisse. Das Szenario nimmt also keine Extremposition ein.

## 5.2 Engagierter Klimaschutz

Dieses Szenario soll einen sehr ambitionierten aber dennoch realistischen Pfad zeigen. Es ist ausdrücklich kein Zielerreichungsszenario, sondern soll gerade zeigen, welche Einsparungen unter Berücksichtigung sehr ambitionierter Vorgaben erreicht werden können. Es berücksichtigt Lock-In-Effekte, Dämmrestriktionen, Nutzungsdauern von Bauteilen und Vollzugsdefizite der EnEV im zeitlichen Verlauf sowie die vorgestellten Bedarfs-/Verbrauchsanpassungen. Damit stellt das Szenario aus Sicht der Autoren die Grenze der realisierbaren Dämmpotenziale dar („Realsockel“).

Die Grenze des theoretischen Dämmpotenzials wird im Unterschied dazu als ein hypothetisches, absolutes Potenzial gesehen, dass nur realisiert werden kann, indem der gesamte Gebäudebestand auf die bestmögliche Qualität saniert wird. Das theoretische Potenzial („Normsockel“) ist damit weit weniger von der Zeit und von der Sanierungstätigkeit abhängig, da hier schon im Startjahr ein zu 100 % durchsanierter Gebäudebestand angenommen wird. Dies wird in Kapitel 5.3 untersucht.

### 5.2.1 U-Wert-Szenarien

Die U-Werte der Bauteile Dach, Außenwand, Keller und Fenster sind in die beiden Kategorien „konventionell“ und „ambitioniert“ eingeteilt.

Die U-Werte konventioneller Sanierungen entsprechen im Startjahr den Vorgaben von Anlage 3, Tabelle 1, EnEV. Dies impliziert eine flächendeckende Umsetzung der EnEV ohne jedes Vollzugsdefizit. Die U-Werte gehen bis 2050 stufenförmig auf den Endwert zurück. Als Endwert wurden die in Kapitel 4 ermittelten U-Werte herangezogen. Dabei wurde die Bandbreite dieser U-Werte berücksichtigt. Der U-Wert, der 2050 bei konventionellen Sanierungen erzielt wird, entspricht dem Mittelwert dieser Bandbreite und liegt damit etwa auf dem heutigen Passivhausniveau. Nur für Dächer wurde ein niedrigerer U-Wert angesetzt.

Für ambitionierte Sanierungen entsprechen die U-Werte im Startjahr den Vorgaben der KfW für Einzelmaßnahmen. Er geht bis 2050 stufenweise zurück auf den jeweils niedrigsten Wert der U-Wert-Bandbreite aus Kapitel 4.

Die jeweiligen Anteile werden im nachfolgenden Kapitel Sanierungstiefe beschrieben. In beiden Kategorien (konventionell und ambitioniert) ist jedoch die Geschwindigkeit, mit der der End-U-Wert erreicht wird, gegenüber dem Trendszenario erhöht.

### 5.2.2 Sanierungstiefe

Die Anteile der Kategorien konventionelle, ambitionierte oder Pinselsanierung am Sanierungsgeschehen einer Dekade werden als Sanierungstiefe für das Startjahr und die drei Stützjahre (2020, 2030, 2040) vorgegeben. Zwischen den Stützjahren werden sie linear interpoliert. Die Sanierungstiefe im Startjahr wird optimistischer als im Trendszenario angenommen. Für die Zukunft wird eine starke Zunahme der ambitionierten Sanierungen vorgegeben. Um diese zu erreichen, wären sehr wirksame Anreize erforderlich – zum Beispiel Fördermaßnahmen. Der Anteil der Pinselsanierungen geht in diesem Szenario sehr rasch auf ein niedriges Niveau zurück, wird jedoch nicht Null, da dies nicht realistisch erscheint. Voraussetzung für diesen Abfall der Pinselsanierungen wären ein wesentlich wirkungsvollerer Vollzug der EnEV sowie eine Auflösung des Wirtschaftlichkeitsgebots (durch Förderung und/oder Forderung). Durch den geringen Anteil von Pinselsanierungen gehen Lock-In-Effekte stark zurück.

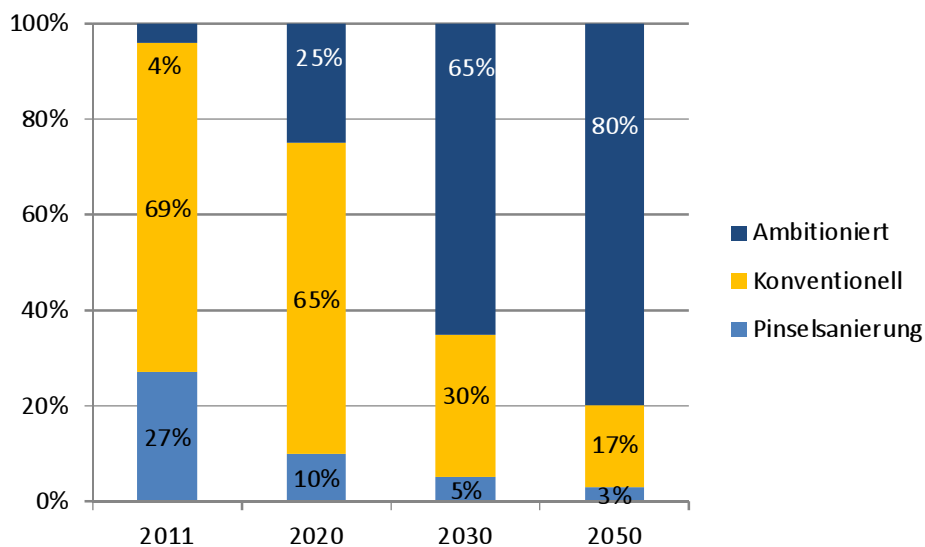


Abbildung 5.9: Anteile der Sanierungskategorien im Szenario „engagierter Klimaschutz“ für die Bauteile Dach, Außenwand und Keller

### 5.2.3 Sanierungsrate

Die energetische Sanierungsrate, die sich aus der Nutzungsdauer der Bauteile und dem Anteil der nicht-energetischen Sanierungen ergibt, ist im Szenario „engagierte Klimaschutz“ wesentlich erhöht gegenüber dem Trendszenario. Die Nutzungsdauern der Bauteile sind in diesem Szenario um durchschnittlich zehn Jahre verkürzt. Damit wird der Spielraum, den die große Bandbreite der Nutzungsdauern gibt, ausgenutzt. Zusätzlich wird ein hoher Anteil an Vorzieheffekten unterstellt wird. Das bedeutet, dass Bauteile deutlich vor Ablauf ihrer Nutzungsdauer energetisch saniert

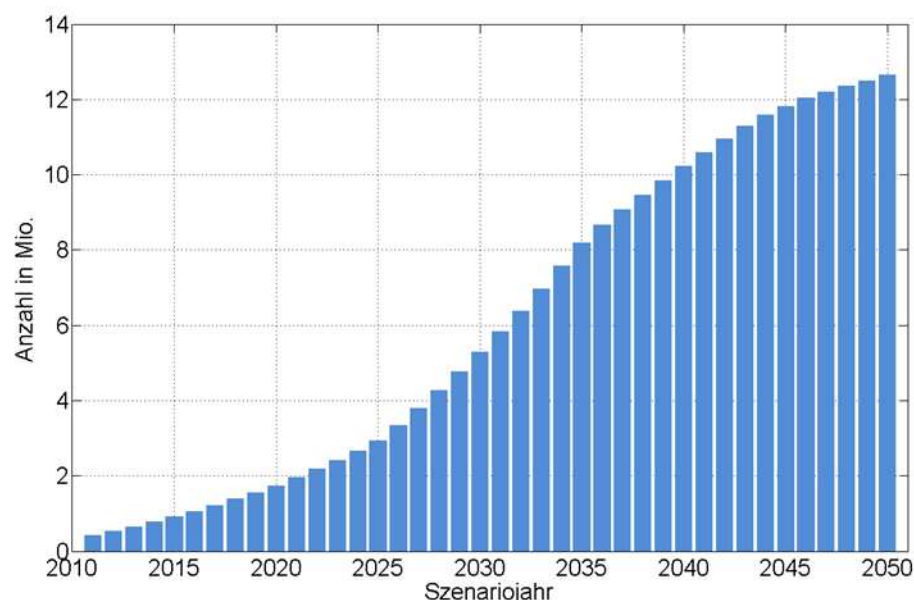
werden. Diese Annahme wird auch für Nichtwohngebäude getroffen, obwohl sie hier für sehr optimistisch anzusehen ist und hoher Anreize bedürfte.

|     | mittlere Sanierungsrate 2011 | mittlere Sanierungsrate 1. Stützjahr | mittlere Sanierungsrate 2. Stützjahr | mittlere Sanierungsrate 3. Stützjahr |
|-----|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| WG  | 1,91%                        | 2,27%                                | 2,37%                                | 2,40%                                |
| NWG | 2,72%                        | 2,95%                                | 3,10%                                | 3,10%                                |

**Tabelle 5.4:** Sanierungsraten im Szenario „engagierter Klimaschutz“

## 5.2.4 Anteil Wärmerückgewinnung

Der Ausstattungsgrad mit Wärmerückgewinnungsanlagen ist im Startjahr gleich mit dem Trendszenario. Der Anstieg ist in den Folgejahren jedoch wesentlich höher. Demnach verfügen in 2050 rund 86 % der Nichtwohngebäude über eine Wärmerückgewinnungsanlage. Die Anzahl der Wärmerückgewinnungsanlagen in 2050 ist damit mehr als doppelt so hoch wie im Trendszenario.

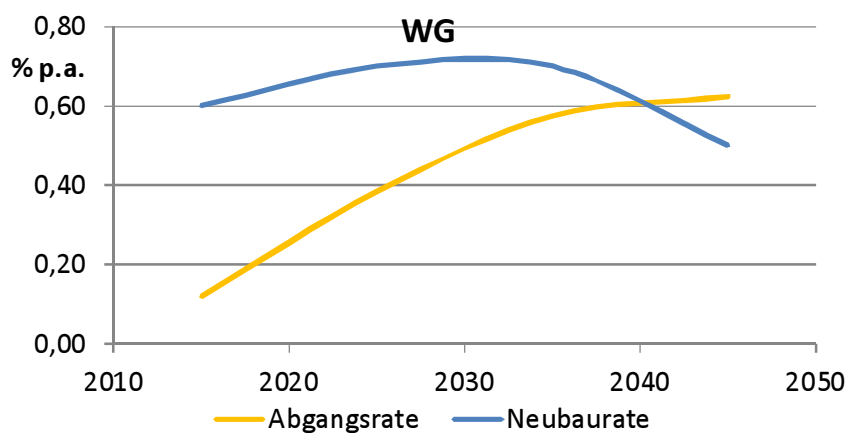


**Abbildung 5.10:** Anzahl der Wärmerückgewinnungsanlagen in Wohngebäuden

## 5.2.5 Neubau und Abriss

Die Neubauraten sind gegenüber dem Trendszenario erhöht. Unter Abriss ist der gesamte Abgang aus dem beheizten Bestand zusammengefasst, also auch Zunahme des Leerstands. Die Abrissrate ist so angepasst, dass die gesamte Wohnfläche in Wohngebäuden den aktuellen Prognosen folgt (siehe Kapitel 3.1). Die höhere Neubaurate impliziert also gleichzeitig eine Erhöhung der Abrissrate und somit eine stärkere Verjüngung des Gebäudebestands.

Für Nichtwohngebäude wird – wie im Trendszenario – von doppelt so hohen Abriss- und Neubauraten ausgegangen.

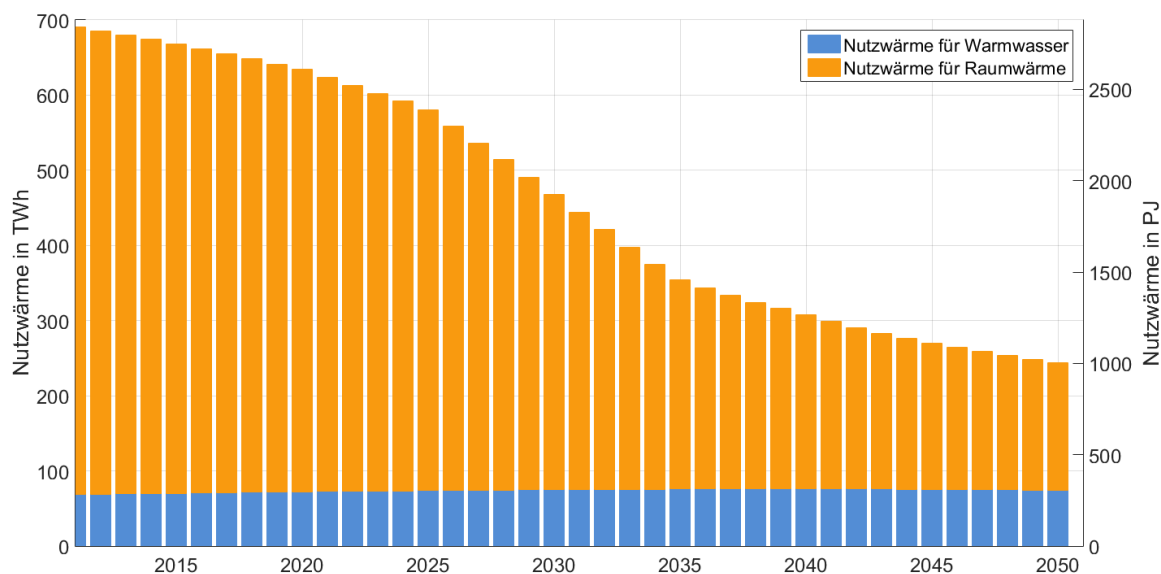


**Abbildung 5.11:** Entwicklung von Neubau- und Abrissrate für Wohngebäude im Szenario „engagierter Klimaschutz“

Die Verteilung der Neubaurate auf die Gebäudegrößen bzw. der Abrissrate auf die Baualterklassen entspricht den Festlegungen im Trendszenario.

### 5.2.6 Ergebnisse des Szenarios „engagierter Klimaschutz“

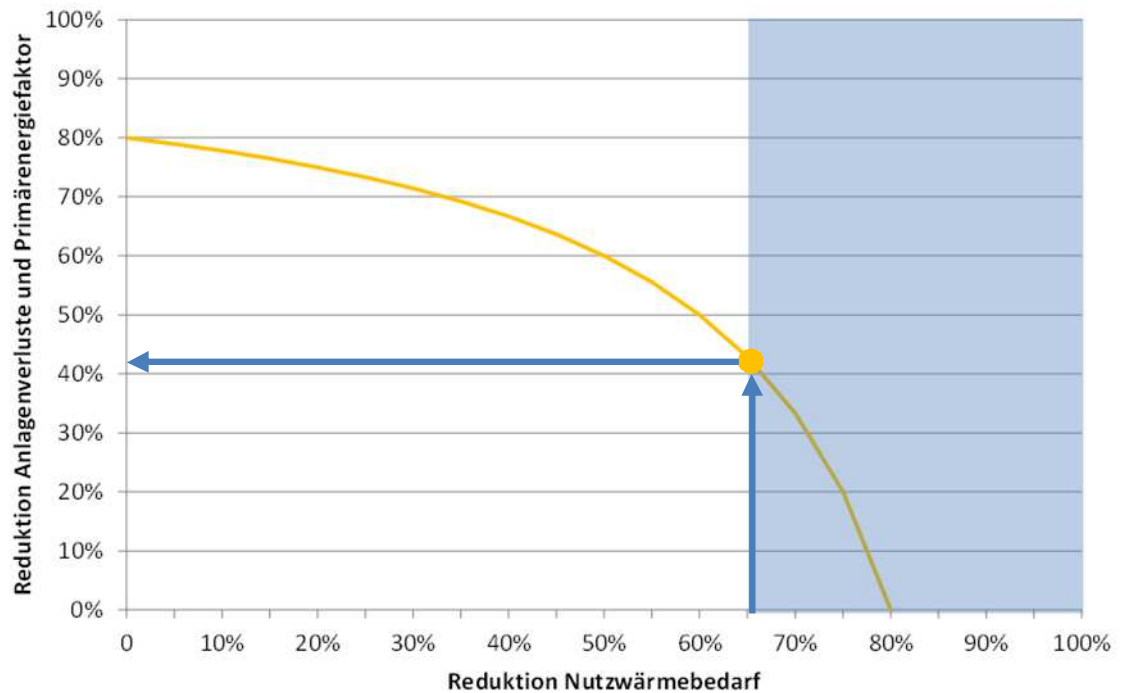
Unter den beschriebenen, äußerst optimistischen Annahmen verringert sich der Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Wohn- und Nichtwohngebäuden von 693 TWh (2.495 PJ) um 65 % auf 244 TWh (878 PJ). Während sich der Raumwärmeverbrauch um 73 % von 625 TWh (2.248 PJ) auf 169 TWh (610 PJ) verringert, steigt der Warmwasserwärmeverbrauch in der gleichen Zeit um etwa 9 % an. Dies ist dem prognostizierten Zuwachs an Wohn- und Nutzfläche geschuldet.



**Abbildung 5.12:** Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Szenario „engagierter Klimaschutz“ für Wohn- und Nichtwohngebäude

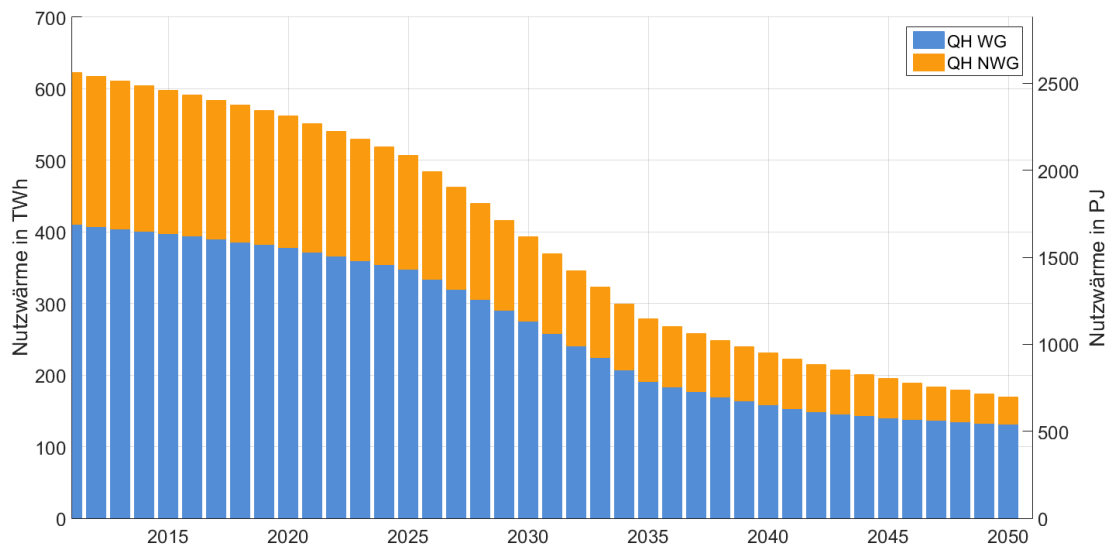
Es ist gut zu erkennen, dass der Anstieg der Sanierungsraten, der durch die Vorzieheffekte bewirkt wird, ab etwa 2025 zu hohen Einsparungen führt. Im weiteren Kurvenverlauf flachen die Einsparungen jedoch wieder ab, weil die Einsparpotenziale der Gebäude geringer werden.

Bei der hier erreichten Reduktion des Nutzwärmeverbrauchs um 65 % müssten die Anlagenverluste und Primärenergiefaktoren zusätzlich nur noch um rund 43 % reduziert werden, um das Klimaschutzziel zu erreichen (Abbildung 5.13).



**Abbildung 5.13: Nutzwärmereduktion im Szenario „engagierter Klimaschutz“**

Der Wärmeverbrauch für Raumwärme in Nichtwohngebäuden hat im Startjahr einen Anteil von 34 % am Gesamttraumwärmeverbrauch. In 2050 beträgt dieser Anteil nur noch 23 %. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei Nichtwohngebäuden höhere Abriss- und Neubauraten angesetzt wurden sowie auch kürzere Nutzungsdauern der Bauteile als bei Wohngebäuden.



**Abbildung 5.14: Raumwärmeverbrauch im Szenario „engagierter Klimaschutz“ nach Wohn- und Nichtwohngebäuden**

### 5.2.7 Vergleich mit anderen Studien

Das Szenario „engagierte Klimaschutz“ stellt aus Sicht der Autoren die Potenzialgrenze für die Entwicklung des Nutzwärmeverbrauchs dar. Die Randbedingungen wurden äußerst optimistisch festgelegt, ohne jedoch in Phantasmen zu verfallen. Ein Vergleich mit Szenarien aus anderen Studien zeigt, dass jene stets oberhalb dieser Potenzialgrenze bleiben – also das Potenzial nicht ausschöpfen. Die Vergleichsszenarien sind allesamt Zielerreichungsszenarien, die zu einer Primärenergieeinsparung von 80 % in 2050 führen. Das Szenario von Ecofys liegt rund 7 % darüber, (Fraunhofer ISE et al., 2012) um 22 %. Letztere treffen jedoch keine Aussage zu Nichtwohngebäuden oder Warmwasserwärmeverbrauch. In (IWU, 2013) sind ebenfalls keine Nichtwohngebäude erfasst. Deren Ergebnis liegt ca. 10 % oberhalb der GEMOD-Potenzialgrenze. Jedoch gehen in (IWU, 2013) die Verluste für Speicherung, Verteilung und Übergabe in das Ergebnis ein. Diese sind in GEMOD nicht enthalten.

Der Bilanzrahmen wurde in GEMOD jeweils an die Vergleichsstudien angepasst. Abbildung 5.15 zeigt das Ergebnis dieser Vergleichsanalyse.

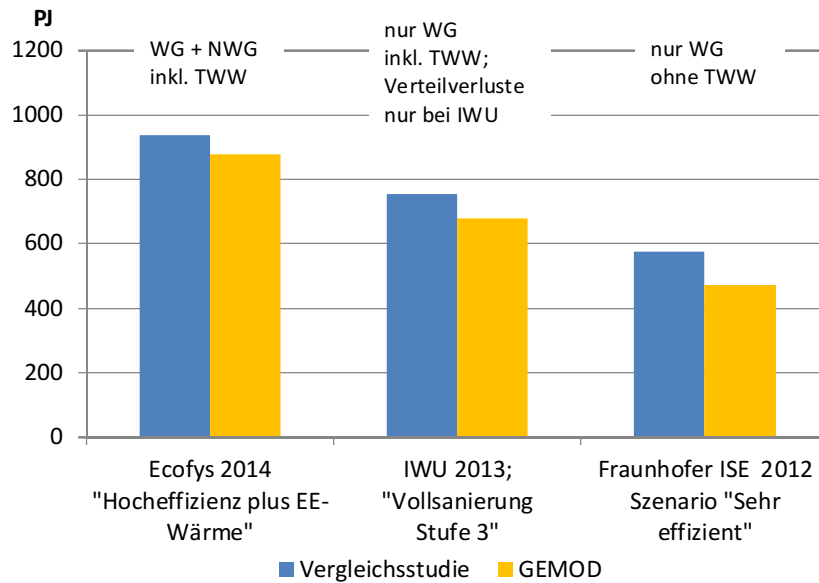


Abbildung 5.15: Vergleich des Wärmeverbrauchs im Jahr 2050 mit Hocheffizienzszenarien anderer Studien

## 5.2.8 Sensitivitätsanalysen

### 5.2.8.1 Minimaler U-Wert

#### Frage

Wie stark wirkt sich der minimal erreichbare U-Wert auf den künftigen Heizwärmebedarf aus?

#### Annahme

Die minimal erreichbaren U-Werte wurden in Kapitel 4 berechnet. Im Folgenden wird ihr Einfluss auf die Gesamtergebnisse untersucht, um ihre Wirkmächtigkeit abzubilden. Die minimal erreichbaren U-Werte der einzelnen opaken Bauteile werden im Modell pauschal um  $\pm 20\%$  innerhalb des Szenarios „engagierte Klimaschutz“ variiert. Dies betrifft zunächst die Ziel-U-Werte für 2050 für ambitionierte Sanierungen und die Neubauvorgaben für die letzte Baualtersklasse (ab 2035), da für diese unmittelbar der minimale U-Wert angesetzt wird. Zusätzlich werden auch die Ziel-U-Werte für 2050 für konventionelle Sanierungen um  $20\%$  variiert, da vermutet wird, dass sie vom minimalen U-Wert beeinflusst werden. In GEMOD sind die U-Wert-Stufen, die zum Ziel-U-Wert führen, stets gleich hoch verteilt. Dadurch beeinflusst eine Änderung des Zielwertes auch den zeitlichen Verlauf des U-Werts (siehe Abbildung 5.16).

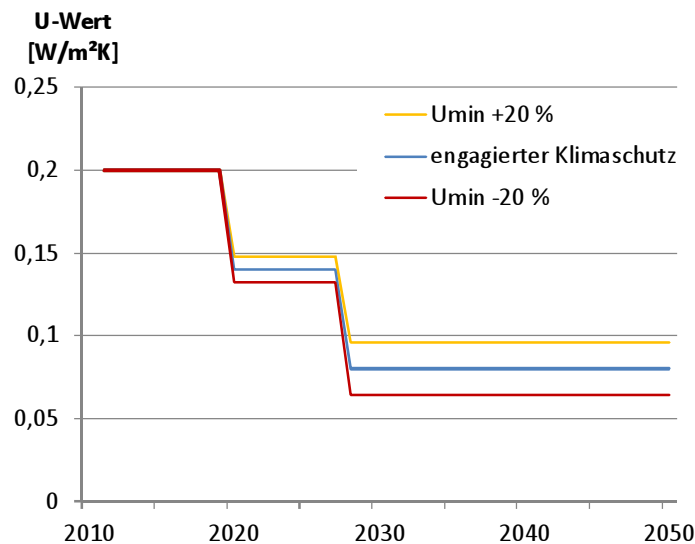


Abbildung 5.16: Variation der minimal erreichbaren U-Werte in der Sanierung und Rückwirkung auf den Verlauf der U-Werte (Beispiel: EFH\_K, ambitionierte Sanierung der Kellerdecke)

### Ergebnis

Im Startjahr 2011 gibt es keine Unterschiede durch die veränderten U-Werte gegenüber der Referenz. Die Differenzen nehmen bis 2050 kontinuierlich zu. Wenn der minimal erreichbare U-Wert um 20 % angehoben wird, steigt der Heizwärmeverbrauch in 2050 um 3,6 % an. Bei einer Verringerung um 20 % fällt der Heizwärmeverbrauch um 3,2 %.

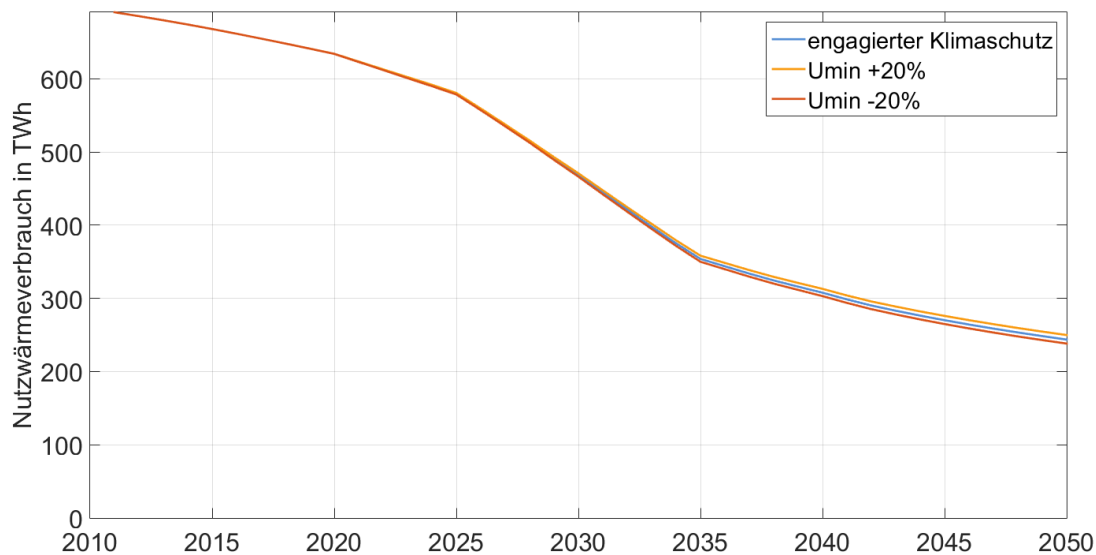


Abbildung 5.17: Sensitivität des minimal erreichbaren Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_{\min}$ )

### Bewertung

Der minimal erreichbare Wärmedurchgangskoeffizient geht – bei der hier angestellten Betrachtung sehr kleiner Werte - relativ schwach in die Gesamtbilanz ein. Die in Kapitel 4 gezeigten Berechnungsmethoden weisen für den minimal erreichbaren UWert Ergebnisse aus, die in dem hier untersuchten Maß variieren. Trotz der dort mit vier Methoden durchgeführten Analysen, bestehen gewisse Unsicherheiten für die Höhe der minimalen U-Werte. Je nach gesetzten Randbedingungen

liegen die dort ermittelten minimalen U-Werte bei 0,07 bis 0,12 W/m<sup>2</sup>K. Aber wie obige Grafik zeigt, relativiert sich die Bedeutung der verbleibenden Unsicherheiten durch die geringe Sensitivität der daraus resultierenden Wärmebedarfswerte. Aufgrund der Griffigkeit eines glatten Zahlenwertes und der nun nachgewiesenen geringen Auswirkungen kleiner Variationen, erscheint es statthaft, im Rahmen der Szenarien für den Wärmemarkt einen Wert von 0,10 W/m<sup>2</sup>K als realistische Untergrenze des U-Wertes anzunehmen.

### 5.2.8.2 Sensitivität der Sanierungstiefe

#### Frage

Wie stark wirkt sich die Sanierungstiefe auf den künftigen Heizwärmebedarf aus?

#### Annahme

Die Anteile der konventionellen und der ambitionierten Sanierungen an der gesamten Sanierungstätigkeit werden um je 10 % erhöht oder vermindert (zum Beispiel von 69 % ambitionierten Sanierungen im Startjahr auf 76 bzw. 62 %). Dadurch ändert sich der Anteil der Pinselsanierungen entsprechend.

Eine 10-prozentige Erhöhung der Anteile ist nicht für alle Jahre linear möglich, da in manchen Jahren allein die Summe der Sanierungsanteile mehr als 100 Prozent ausgemacht hätte (ausgehend zum Beispiel von 65 % ambitionierten und 30 % konventionellen Sanierungen lägen die 10-prozentigen Erhöhungen bei 72 und 33 % und somit in der Summe über 100 %). In diesen Fällen wurden die Anteile der konventionellen Sanierung schwächer gesteigert und dafür der Anteil der ambitionierten Sanierung überproportional erhöht.

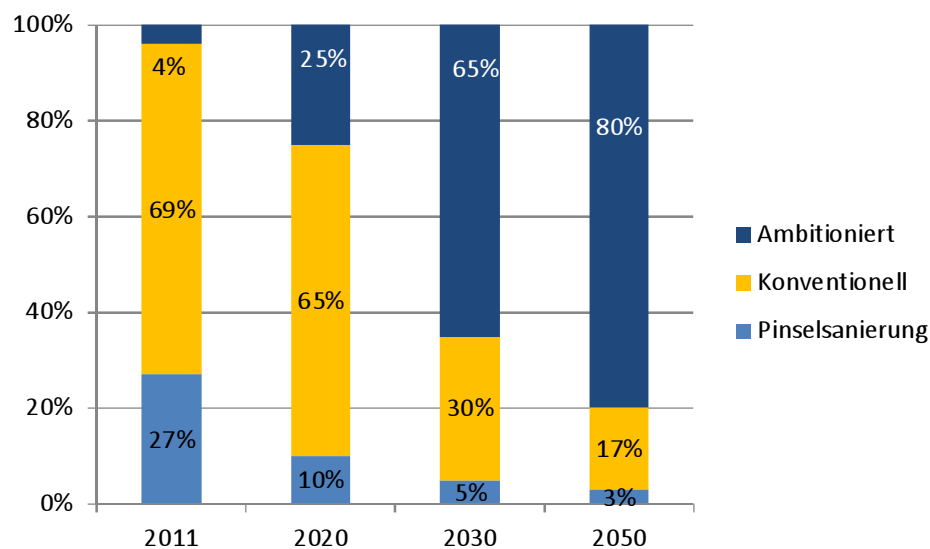
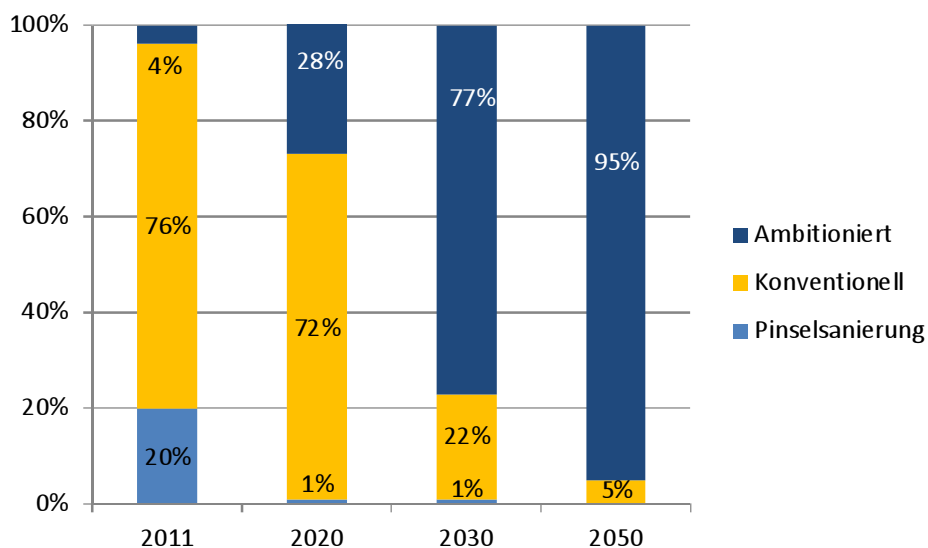
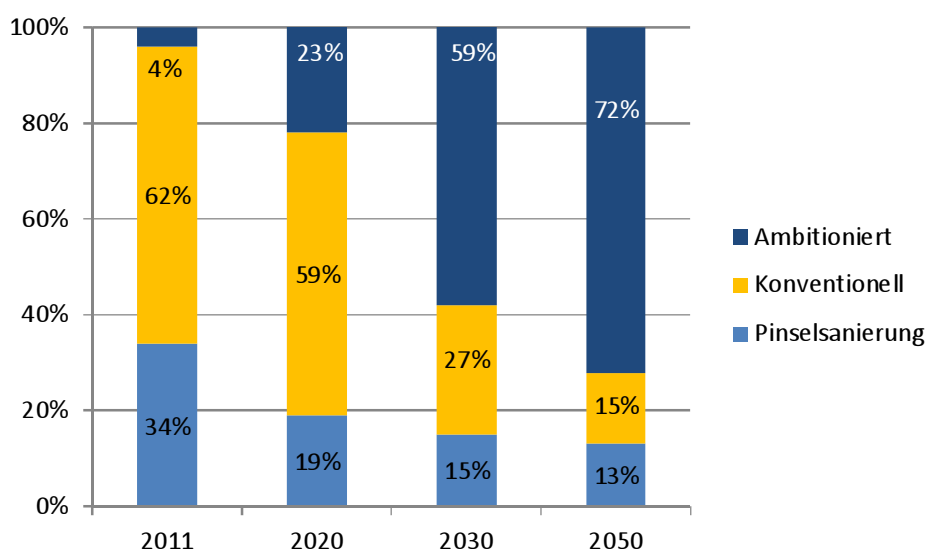


Abbildung 5.18: Referenz-Sanierungstiefen im Szenario „engagierter Klimaschutz“



**Abbildung 5.19: Sanierungstiefen im Szenario „engagierter Klimaschutz“ bei um 10 % erhöhter Sanierungstiefe**



**Abbildung 5.20: Sanierungstiefen im Szenario „engagierter Klimaschutz“ bei um 10 % verminderter Sanierungstiefe**

## Ergebnis

Die Auswirkungen der beschriebenen Änderungen der Sanierungstiefe sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Die Abweichung tritt mit fortschreitender Sanierungstätigkeit immer stärker hervor. Eine Verminderung der Sanierungstiefe um 10 % gegenüber dem Referenzszenario führt zu einem um 14,6 % höheren Raumwärmeverbrauch im Jahr 2050. Eine Erhöhung der Sanierungstiefe vermindert den Raumwärmeverbrauch in 2050 nur um 6,9 %.

Die Kurven zeigen, dass bei einer geringeren Sanierungstiefe schon frühzeitig (ab ca. 2025) deutliche Differenzen zur Referenz auftreten. Diese wachsen bis zum Jahr 2050 kontinuierlich an. Auf der anderen Seite sind die Abweichungen, die durch die höhere Sanierungstiefe bewirkt werden, deutlich geringer. Sie wachsen bis ca. 2035 an und bleiben danach nahezu konstant.

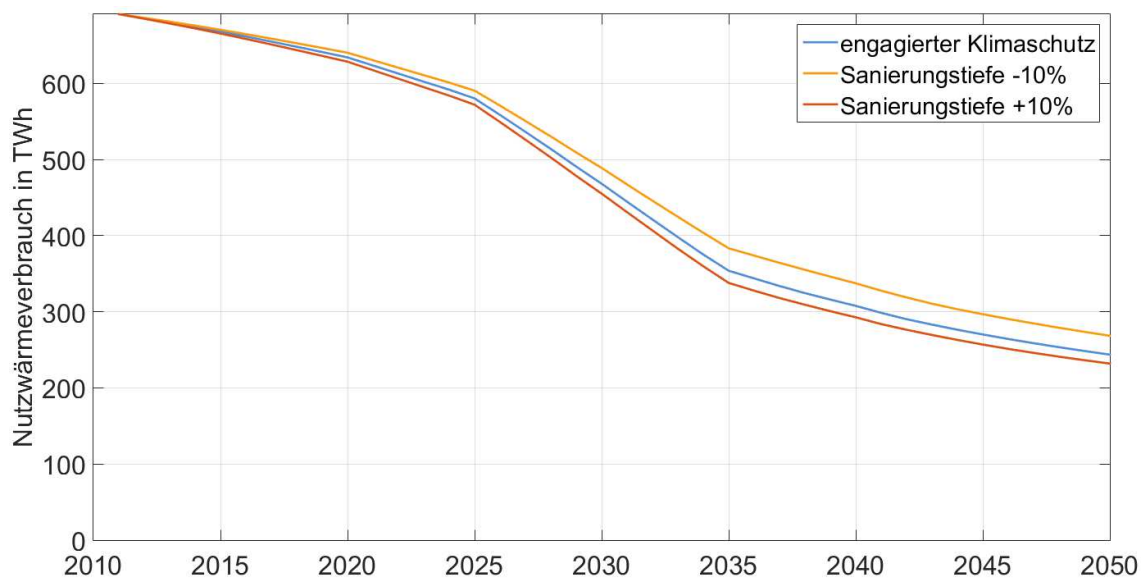


Abbildung 5.21: Sensitivität der Sanierungstiefe

### Bewertung

Die Sanierungstiefe ist kein proportionaler Faktor, deshalb darf auch nicht von einer linearen Beeinflussung des Ergebnisses ausgegangen werden. Dennoch zeigt die Untersuchung, dass zusätzliche absolute Einsparungen immer noch höhere Aufwendungen erfordern (ähnlich wie beim U-Wert). Sie zeigt aber auch, dass ein zu geringer Ambitionsgrad zu einer immer höheren Abweichung vom Zielpfad führt.

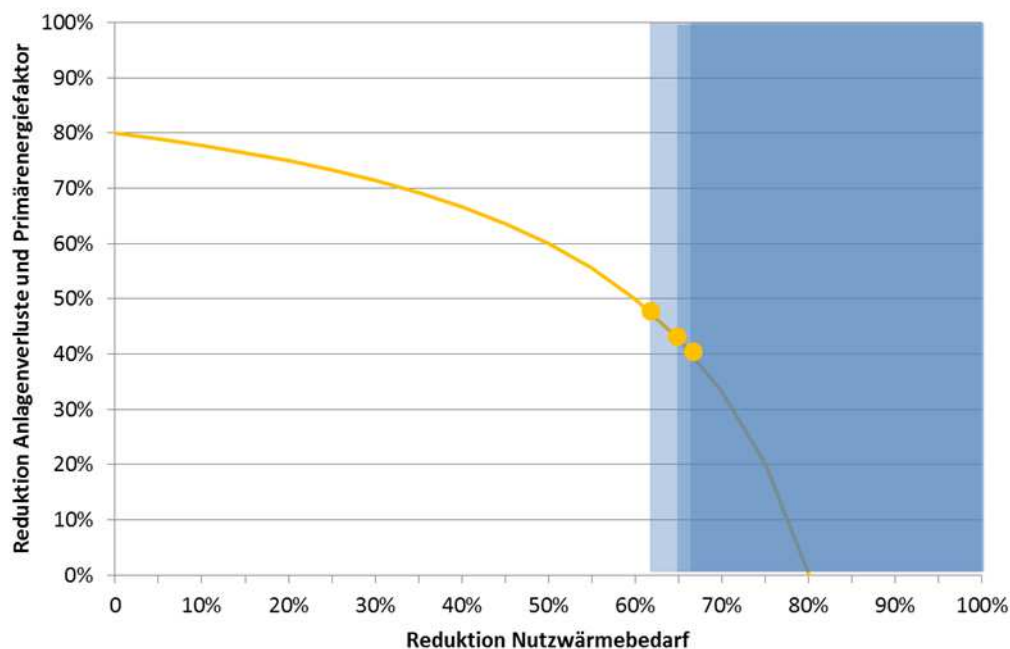


Abbildung 5.22: Sensitivität der Sanierungstiefe und resultierende erforderliche Reduktion der Anlagenverluste

Die Abweichungen wirken sich entsprechend auf die erforderliche Reduktion der Anlagenverluste und Primärenergiefaktoren aus. Bei einer um 10 % gesteigerten Sanierungstiefe reichen Einsparungen auf der Anlagenseite um 39 %, um das 80-Prozent-Ziel zu erreichen. Bei 10 % geringerer Sanierungstiefe müssen die Anstrengungen dort auf 49 % gesteigert werden.

### 5.2.8.3 Sensitivität Reboundeffekt

#### Frage

Wie stark wirkt sich ein umweltbewussteres Nutzerverhalten auf den künftigen Heizwärmeverbrauch aus?

#### Annahme

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, ist der Reboundeffekt ein Maß für das Nutzerverhalten in Gebäuden. Der Reboundeffekt wird durch einen Verbrauchsfaktor numerisch ausgedrückt, der die Abweichung des realen Verbrauchs vom berechneten Bedarf darstellt. Das Szenario „engagierter Klimaschutz“ wird mit variierten Verbrauchsfaktoren neu berechnet:

##### 1. Verminderter Reboundeffekt

Der Verlauf des Verbrauchsfaktors wird flacher eingestellt. Dabei wird der Schnittpunkt mit dem nicht-angepassten Verbrauchsfaktor auf rund 240 kWh/m<sup>2</sup>a eingestellt. Gebäude, deren Energiebedarf darüber liegt, werden dadurch im Verbrauch steigen. Da jedoch für die überwiegende Mehrheit der Gebäude der künftige Energiebedarf deutlich unter diesem Wert liegt, wird auf diese Weise ein zunehmend bewussteres Nutzerverhalten simuliert. Die Abweichung vom Szenario-Verbrauchsfaktor beträgt im Mittel etwa -10 % und maximal -14 %. Diese höchste Abweichung tritt bei Gebäuden der höchsten Effizienzklasse auf.

##### 2. Erhöhter Reboundeffekt

Der Verbrauchsfaktor ist für alle Effizienzklassen um rund 14 % erhöht. Es gibt keinen Schnittpunkt mit dem ursprünglichen Verlauf. Dieser Kurvenverlauf des Verbrauchsfaktors basiert auf einer aktuellen Weiterentwicklung des IWU, die jedoch nicht veröffentlicht wurde.

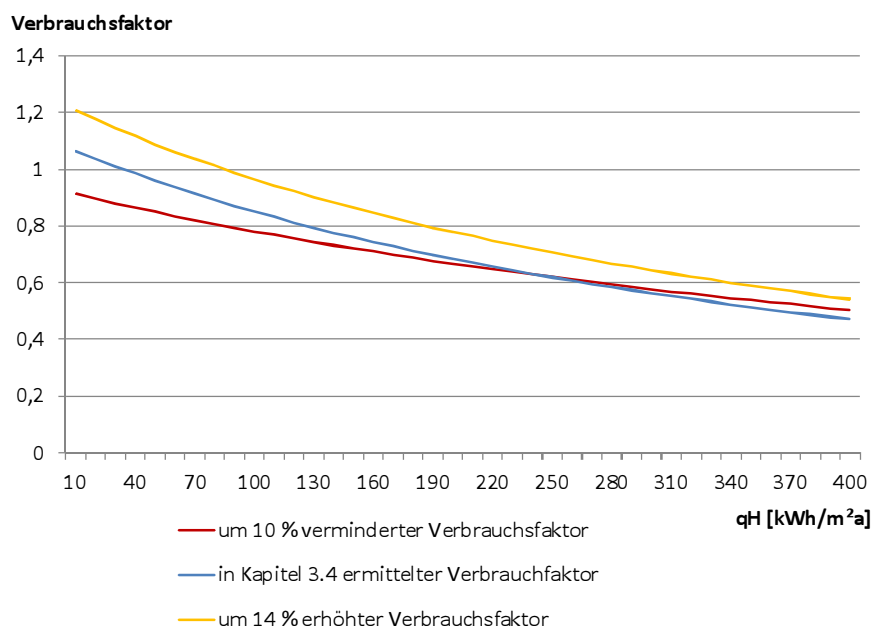


Abbildung 5.23: Variation des Verbrauchsfaktors in Abhängigkeit des Raumwärmebedarfs

## Ergebnis

### 1. Verminderter Reboundeffekt

Die relative Bedeutung des Reboundeffekts nimmt von 4,6 auf 11,3 % zu (rote Kurve in Abbildung 5.24). Das wird darauf zurückgeführt, dass im Zeitverlauf immer mehr Gebäude saniert werden und somit stärker vom Reboundeffekt betroffen sind.

Die höchsten absoluten Einsparungen erzielt das veränderte Nutzerverhalten dagegen im Startjahr 2011 (28,8 TWh). Sie fallen kontinuierlich bis 2050 auf 19,2 TWh ab. Das ist damit zu erklären, dass die Einsparungen durch technische Effizienzmaßnahmen und der Mehrverbrauch durch den Reboundeffekt nicht proportional verknüpft sind. Insbesondere das Verhalten der Nutzer in konventionell sanierten Gebäuden hat einen hohen Einfluss auf die Gesamtenergieeinsparung. Verhaltensänderungen in unsanierten Gebäuden wurden bei dieser Untersuchung bewusst gering bewertet, da hier bereits ein ausgeprägtes Bewusstsein besteht. In hocheffizienten Gebäuden ist dagegen – trotz höherer relativer Einsparung durch den geänderten Verbrauchsfaktor – die absolute Einsparung sehr gering. Hier ist das Nutzerverhalten „fast ohne Belang“. In konventionell sanierten Gebäuden treffen geringeres Energiebewusstsein und – immer noch – relativ hoher Verbrauch zusammen, wodurch der Reboundeffekt sich hier besonders stark auswirkt.

### 2. Erhöhter Reboundeffekt

Der relative Mehrverbrauch durch den erhöhten Reboundeffekt beträgt entsprechend der Vorgabe 14 %. Der absolute Mehrverbrauch sinkt von 87 TWh auf 24 TWh. Seine Bedeutung nimmt mit der fortschreitenden Sanierungstätig kontinuierlich ab.

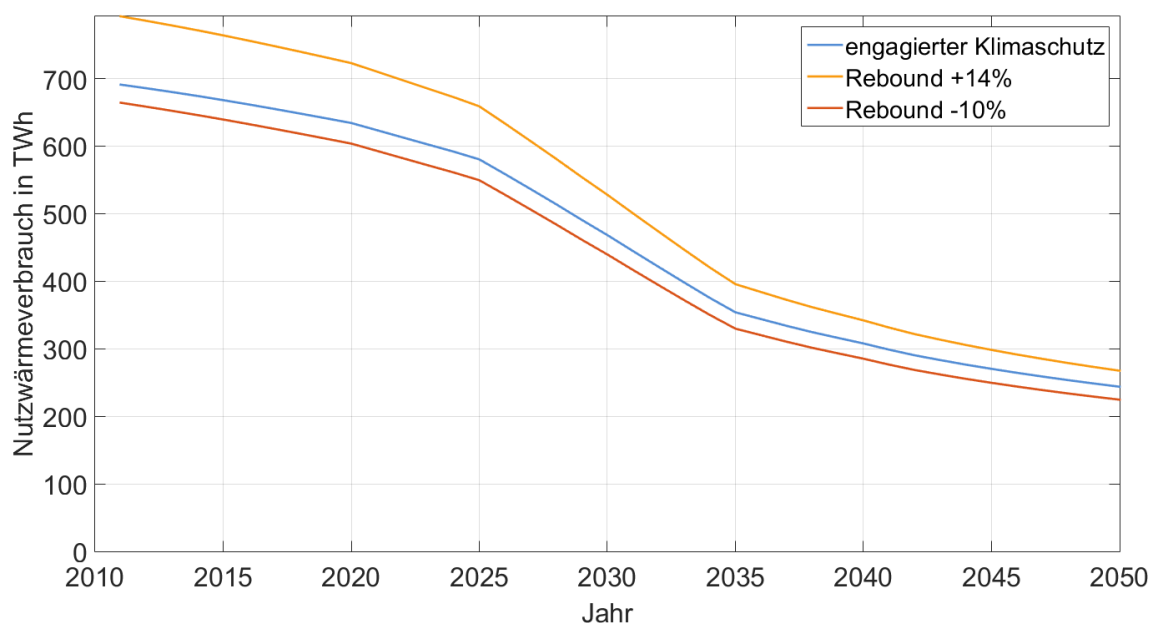
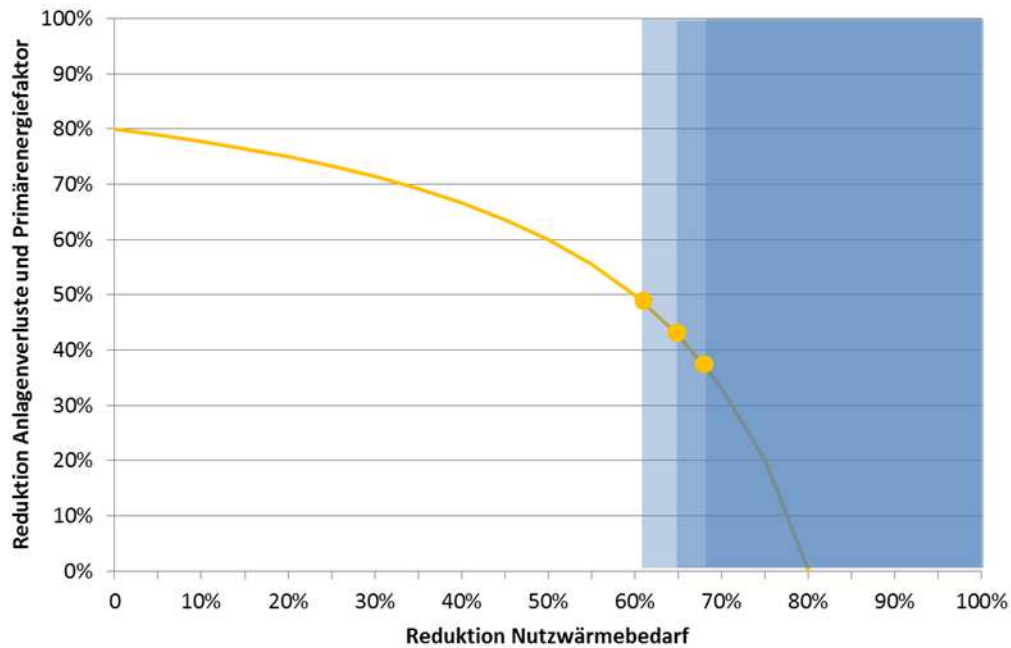


Abbildung 5.24: Sensitivität des Rebound-Effekts

## Bewertung

In Bezug auf den Reboundeffekt ist das Zusammentreffen von Gebäuden mittleren Energiebedarfs (z.B. Sanierungen auf Effizienzhaus 130-Niveau) mit einem unachtsameren Nutzerverhalten – wie es in der Praxis zu beobachten ist – besonders ungünstig.



**Abbildung 5.25: Sensitivität des Rebound-Effekts und Auswirkungen auf die erforderlichen anlagenseitigen Einsparungen**

In Bezug auf die Möglichkeiten zur Zielerreichung in 2050 erlaubt ein um 10 % verminderter Reboundeffekt um 5 Prozentpunkt geringere Anstrengungen im Bereich der Anlagentechnik (Reduktion von 43 % auf 38 %). Ein um 14 % erhöhter Reboundeffekt, wie er sich nach neueren Untersuchungen abzeichnet, würde dazu führen, dass um 6 Prozentpunkte höhere Anstrengungen zur Reduktion der Anlagenverluste und Primärenergiefaktoren erforderlich wären.

### 5.3 Sockelanalyse

In diesem Abschnitt wird der absolute Sockel-Nutzwärmebedarf des Gebäudebestands unter Annahme der Umsetzung bestmöglicher Energiesparmaßnahmen berechnet. Dieser stellt das theoretische Potenzial für Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich dar. Anders ausgedrückt kann der Wert, da er sich als Ergebnis der verschiedenen Berechnungsnormen ergibt, als Normsockel angesehen werden, unter den der Wärmebedarf des Gebäudebestandes nicht fallen kann – es sei denn durch Abriss von Gebäuden. Dieser Sockel setzt sich zusammen aus

a) den Verlusttermen:

- dem verbleibenden Transmissionswärmeverlust
  - durch verbleibende minimale Wärmedurchgangskoeffizienten an opaken Bauteilen,
  - durch Fenster bei bester im Gesamtbestand anzunehmender Qualität,
  - an Wärmebrücken,
  - an Dämmrestriktionen,
- dem verbleibenden Lüftungswärmeverlust
  - durch nicht zurückgewonnene Wärme in Lüftungsanlagen,
  - in Gebäuden, die nicht mit einer Wärmerückgewinnungsanlage ausgestattet werden können,
  - durch Infiltration bei bester im Gesamtbestand anzunehmender Dichtheit der Gebäude,
- dem Warmwasserwärmebedarf.

#### b) den Gewinntermen

- den künftig verbleibenden internen Gewinnen aus Personen und Elektroverbrauchern,
- den solaren Gewinnen durch Fenster.

Senkend auf den Sockelwärmebedarf wirkt sich die Klimaerwärmung aus. Hier wird eine Klimaerwärmung von 1 K bis 2050 angenommen, jedoch wird in einer Sensitivitätsanalyse ebenfalls der Sockel ohne Klimaerwärmung betrachtet.

Für die inneren Gewinne in Wohngebäuden wird angenommen, dass diese aufgrund der zunehmenden Effizienz von Elektrogeräten und der geringeren Belegungsdichte der Gebäude um ca. 40 % bis 2050 absinken. Das führt bei Wohngebäuden je nach Typ zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs um 1 - 10 kWh/(m<sup>2</sup>a). Für Nichtwohngebäude wurde ein Absinken der inneren Gewinne nicht berücksichtigt, da die genannten Effekte durch die immer noch anhaltende zunehmende Technisierung der Arbeitswelt hier nicht absehbar sind.

Der spezifische Warmwasserwärmebedarf bleibt in dieser Betrachtung bis 2050 konstant. Folglich steigt er (normgemäß) proportional zur Gesamtwohnfläche leicht an. Maßnahmen wie zum Beispiel Abwasserwärmerückgewinnungssysteme werden nicht berücksichtigt.

Ferner entwickelt sich der Sockel dynamisch in Abhängigkeit von Neubau, Abriss und Gesamtwohnflächenentwicklung.

#### 5.3.1 Methodisches Vorgehen

Die U-Werte des gesamten Gebäudebestandes werden bereits für das Startjahr 2011 auf die Minimalwerte gemäß Kapitel 4.5 gesetzt. Der Ausstattungsgrad mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung wird auf den für den jeweiligen Gebäudetyp als möglich erachteten Maximalwert gesetzt. Dabei wird berücksichtigt, dass in manche Gebäude keine Wärmerückgewinnungsanlage nachträglich eingebaut werden kann. Dies wird vor allem für einen Teil der Baudenkmale angenommen. Gebäude mit Dämmrestriktionen gehen entsprechend ihrem Anteil am Gesamtbestand bauteilscharf in Analogie zu (Beuth Hochschule, IFEU, 2012) in die Berechnung der U-Werte ein.

Trotz der genannten Modellmodifikationen bezüglich des energetischen Zustandes des Gebäudebestands, die die theoretisch maximal mögliche Durchsanierung schon in 2011 unterstellen, erfolgt die Berechnung des Wärmeverbrauchssockels für den gesamten Zeitraum von 2011 bis 2050. So können die verbleibenden zeitabhängigen Einflüsse sichtbar gemacht werden. Hierzu zählen die Entwicklung der Wohn- und Nutzflächen, die Klimaveränderung und der Rückgang der internen Gewinne.

Neubau und Abriss beeinflussen den Sockelwert – auch bei konstanter Wohn- und Nutzfläche, da für Neubauten unterstellt wird, dass sie keine Dämmrestriktionen aufweisen und sie ggf. Altbauten mit Dämmrestriktionen ersetzen. Wie nachfolgend zu sehen ist, ist der vermeintliche absolute Sockelwert, auch unter der Annahme eines bereits durchsanierten Bestandes, tatsächlich zeitabhängig.

Die Flächenentwicklung des Gebäudebestandes ist in der Sockelanalyse unverändert gegenüber den Szenarien Trend und engagierter Klimaschutz (siehe Abbildung 5.26).

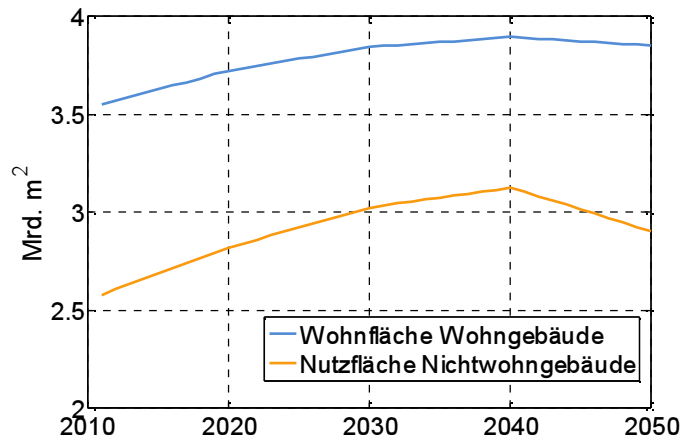


Abbildung 5.26: Entwicklung von Wohnflächen der Wohngebäude und Nutzflächen der Nichtwohngebäude

### 5.3.2 Sockel Trinkwarmwasser

Da der Wärmebedarf für Trinkwarmwasser nach den Berechnungsvorschriften lediglich von der Wohn- bzw. Nutzfläche der verschiedenen Wohngebäude- und Nichtwohngebäudetypen abhängig ist, ist die Entwicklung des „Warmwassersockels“ direkt an die Entwicklung der Nutzflächen gekoppelt. Gebäude vom Typ Einfamilienhaus und Reihenhauser weisen einen Warmwassernutzwärmebedarf von 11 kWh pro m<sup>2</sup> Nutzfläche auf, für Mehrfamilienhäuser liegt er bei 15 kWh/(m<sup>2</sup>a). Bei den Nichtwohngebäuden schwanken die angenommenen flächenspezifischen Warmwasserwärmebedarfe branchenabhängig zwischen ca. 1 und 36 kWh/(m<sup>2</sup>a) (hierin ist Prozesswärmebedarf nicht enthalten). Abbildung 5.27 zeigt den zeitlichen Verlauf des Nutzwärmebedarfs für Trinkwarmwasser. Er ist identisch mit dem Bedarf im ambitionierten Szenario. Durch Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser ließe sich der Sockel weiter absenken, da diese jedoch derzeit noch kaum verbreitet sind, wird ihr Einsatz hier nicht betrachtet.

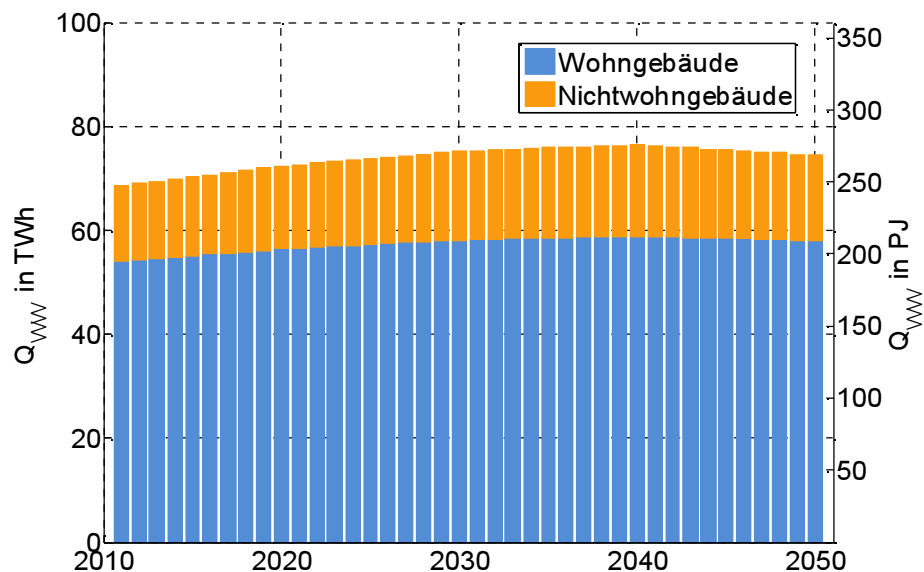


Abbildung 5.27: Nutzwärmebedarf für Warmwasser in Wohn- und Nichtwohngebäuden

### 5.3.3 Sockel Transmission in der Fläche und an Wärmebrücken

Aus der Betrachtung energetischer Kriterien wurden in Kapitel 4 minimale U-Werte für Bauteile abgeleitet. Sie liegen, sofern keine Dämmrestriktionen greifen, bei  $0,08 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für das Dach,  $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für die Fassade,  $0,08 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für die Kellerdecke bzw. den unteren Gebäudeabschluss sowie  $0,50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für Fenster. Um die sich unter Berücksichtigung von Dämmrestriktionen minimal erreichbaren U-Werte festzulegen, werden die U-Werte, die sich bei Dämmrestriktionen ergeben, mit den minimalen U-Werten anteilig für jeden Gebäudetyp verrechnet. Unter diesen Annahmen ergibt sich gemittelt für alle Gebäude ein mittlerer spezifischer Transmissionswärmeverlust ( $H_T$ ) von  $0,175 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  für das Jahr 2011.

Die sich bei diesen U-Werten ergebenden Transmissionswärmeverluste werden als Summe über die einzelnen Monate errechnet:

$$Q_{T, \text{Monat}} = H_T \cdot (T_{\text{innen}} - T_{\text{ausser, Monat}}) \cdot t_{\text{Monat}}$$

Hierbei handelt es sich um eine hypothetische Betrachtung, da die Transmissionswärmeverluste zum Teil durch innere und solare Gewinne kompensiert werden und daher bei einer gesamtbilanziellen Betrachtung nicht mehr direkt in Erscheinung treten.

Abbildung 5.28 zeigt den Verlauf der gesamten Transmissionswärmeverluste des Wohngebäudebestands, wie er sich durch Neubau und Abriss – ohne Klimaerwärmung - ergibt. In 2050 liegen die Transmissionswärmeverluste der Wohngebäude bei 161 TWh. Abbildung 5.29 zeigt die Transmissionswärmeverluste im Wohngebäudebestand bei einer Erwärmung von 1 K bis 2050. Sie liegen dann in 2050 bei 150 TWh. Der Unterschied in 2050 beträgt also ca. 11 TWh bzw 7 %. Der leichte Anstieg der Transmissionswärmeverluste von 2011 bis 2050 durch die zunehmende Wohn- und Nutzfläche wird durch die Klimaerwärmung leicht überkompensiert. Ein weiterer, in der Grafik nicht direkt ersichtlicher Effekt ist der Abriss von Gebäuden mit Dämmrestriktionen und der Neubau von Gebäuden ohne Dämmrestriktionen.

Der Anteil der Verluste durch Wärmebrücken am gesamten Transmissionswärmeverlust beträgt 17%. Er wird für alle Gebäude ohne Dämmrestriktionen mit einem pauschalen Wärmebrückenzuschlag von  $0,03 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  berücksichtigt. Gebäude mit Restriktionen erhalten je nach Ausprägung der Restriktionen höhere Wärmebrückenzuschläge.

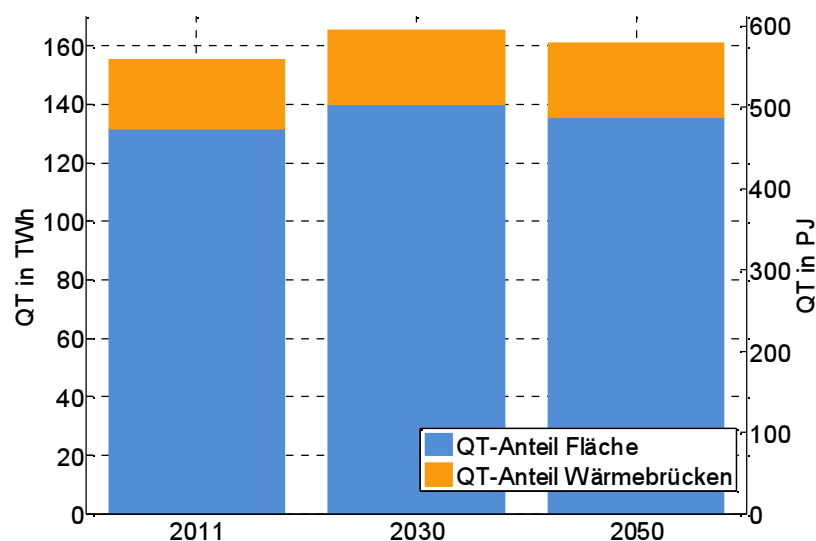
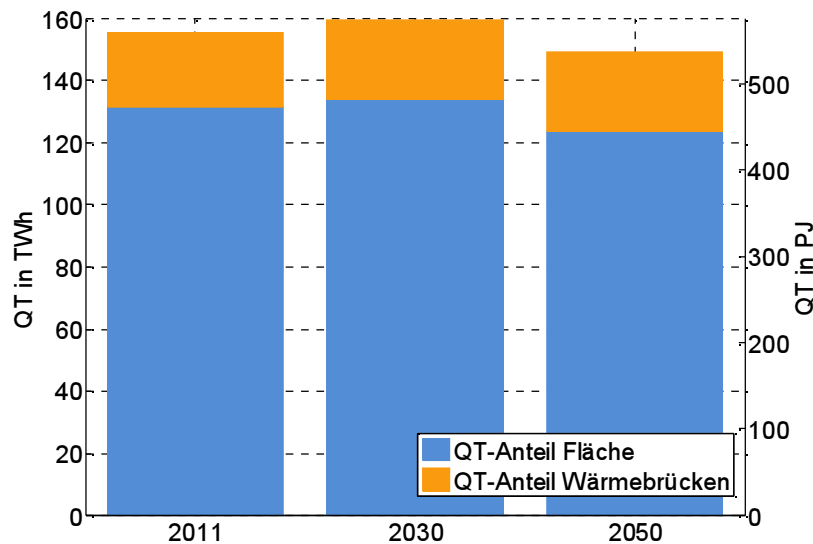


Abbildung 5.28: Sockelwert der Transmissionswärmeverluste an Bauteilflächen (blau) und Wärmebrücken (orange) für Wohngebäude ohne Berücksichtigung von Klimaerwärmung



**Abbildung 5.29: Sockelwert der Transmissionswärmeverluste an Bauteilflächen (blau) und Wärmebrücken (orange) für Wohngebäude mit Berücksichtigung einer Klimaerwärmung von 1 K bis 2050**

In Abbildung 5.30 sind die Transmissionswärmeverluste des Gesamtbestands – also Wohn- und Nichtwohngebäude - unter Berücksichtigung der Klimaerwärmung dargestellt, sie liegen bei ca. 226 TWh bei 1 K Klimaerwärmung bis 2050. Der Anteil der Verluste durch Wärmebrücken am gesamten Transmissionswärmeverlust beträgt knapp 16 %. Ohne Klimaerwärmung lägen die Transmissionsverluste bei 244 TWh.

Ohne Dämmrestriktionen (mit Klimaerwärmung) liegen die Transmissionswärmeverluste bei 178 TWh, davon entfallen 36 TWh auf die Wärmebrücken. Die Dämmrestriktionen verursachen also insgesamt einen Wärmeverlust in Höhe von 48 TWh.

In (Beuth Hochschule, IFEU, 2012) wurden zu den Auswirkungen von Dämmrestriktionen bereits intensive Studien durchgeführt. Je nach den zugrunde gelegten Randbedingungen zur Sanierungstätigkeit wurden dort ca. 80 bis 120 TWh aufgrund von nicht dämmbaren Restriktionen identifiziert. Grundsätzlich bestätigt das hier ermittelte Ergebnis mit 48 TWh für das ambitionierte Szenario die Größenordnung der Dämmrestriktionen, jedoch bedarf die Diskrepanz einer kurzen Erläuterung der hier im ursächlichen Zusammenhang stehenden Gründe:

- Die Sanierungsniveaus für 2050 der beiden Studien unterscheiden sich, so dass die Dämmrestriktionen unterschiedlich zur Wirkung kommen. So werden einerseits bei ambitionierten Maßnahmen höhere Investitionen für die Beseitigung von Dämmrestriktionen in Kauf genommen als bei konventionellen, andererseits wirken sich nicht zu beseitigende Restriktionen bei ambitionierten Maßnahmen stärker aus, da eine hochwertigere Dämmung verhindert wurde. Die Anteile von konventionellen und ambitionierten Maßnahmen beeinflussen also die Höhe der Dämmrestriktionen.

Die unterschiedlichen Endniveaus sind den unterschiedlichen Fragestellungen der beiden Studien geschuldet.

- Das ursprüngliche Modell (Dämmrestriktionen) analysierte sehr detailliert die Vielfalt der auftretenden Dämmrestriktionen und beinhaltet neun verschiedene Bauteilarten. Im erweiterten Modell (GEMOD) wurde eine Vielzahl von Modellergänzungen eingebaut, die die hier beschriebenen Analysen erst möglich machten. Aufgrund der neuen Ausrichtung und Fähigkeiten sind in GEMOD nur vier Bauteiltypen vorhanden, was das Gesamtergebnis beeinflussen kann.

- Das komplette Mengenmodell beginnend mit der Festlegung der Gebäudetypen, der Gebäudeanzahlen sowie der Bauteilflächen wurde überarbeitet. Dabei wurden aktuelle Ergebnisse des Zensus berücksichtigt ebenso wie Untersuchungen zum Nichtwohngebäudebestand.
- Im aktuellen GEMOD sind die Witterungsbedingungen aus DIN V 18599 unter Berücksichtigung einer Klimaerwärmung um 1 K zugrunde gelegt. Das alte Modell basierte auf DIN V 4108-6.
- Alle U-Werte wurden entsprechend der neuen Erkenntnisse, die zwischen den beiden Studien veröffentlicht wurden, plausibilisiert und in Teilen angepasst.
- Die neue Studie berücksichtigt die Entwicklung des Gebäudebestandes durch die Verknüpfung mit der prognostizierten Bevölkerungsentwicklung detaillierter als in der Dämmrestriktionsstudie.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass zwar die einzelnen Bauteile in der Dämmrestriktionsstudie genauer analysiert wurden, und man daher das dort erhaltene Ergebnis für richtiger halten könnte, aber gleichzeitig die den Rechnungen zu Grunde liegenden Massen, U-Werte und Szenarien in der aktuellen, weiterentwickelten Fassung des GEMOD-Modells weitaus genauer den tatsächlichen Bestand abbilden. Aufgrund der Vielzahl an verstellbaren Parametern ist tatsächlich der direkte Vergleich von Ergebnissen der beiden Studien kaum statthaft. Da die Höhe der wirksamen Restriktionen immer von den angenommenen Randbedingungen abhängt, ist es nicht möglich, einen fixen Betrag für die Dämmrestriktionen anzugeben. Je nach Ambitionsgrad der künftigen Bau- und Sanierungstätigkeit betragen die Verluste an Dämmrestriktionen rund 48 bis 120 TWh. In dieser Studie werden Dämmrestriktionen in den jeweiligen Szenarien individuell berechnet.

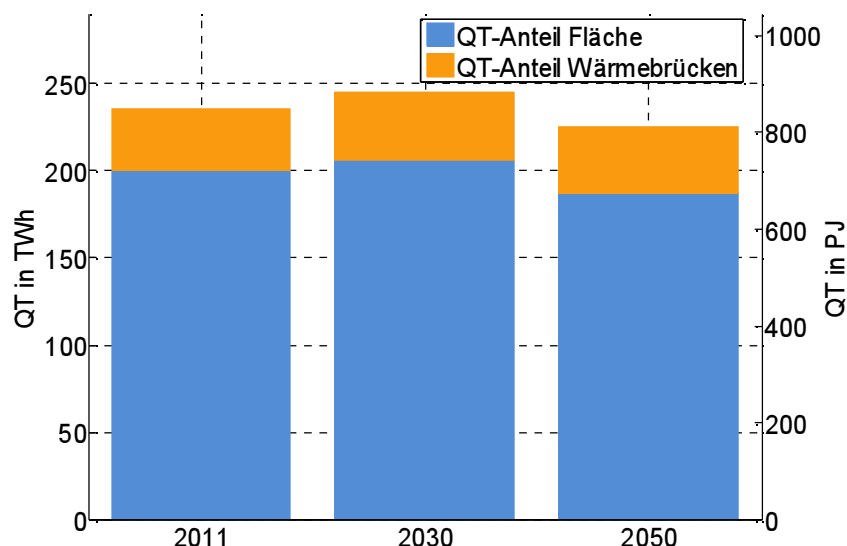


Abbildung 5.30: Sockel der Transmissionswärmeverluste des Gesamtgebäudebestands

### 5.3.4 Sockel Lüftungswärmeverluste

Die Durchdringung mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ist für die Sockelanalyse auf den als maximal möglich erachteten Wert je Gebäudetyp gesetzt. Dabei wird berücksichtigt, dass bei manchen Gebäuden Restriktionen für den Einbau von Lüftungsanlagen bestehen, so wurde die

maximale Durchdringungsrate mit Wärmerückgewinnungsanlagen in Gebäuden, die vor 1860 gebaut wurden, mit 89 % angenommen. Im Mittel über den Gebäudebestand liegt die Durchdringung mit Wärmerückgewinnungsanlagen bei 97 %. Der unterstellte Wärmerückgewinnungsgrad liegt bei 95 % für alle Gebäude. Diese, in einem sehr ambitionierten Bereich liegenden Werte wurden bewusst so hoch gewählt, um das theoretische Potenzial aus dem heutigem Horizont identifizieren zu können. Abbildung 5.31 zeigt die aus diesen Annahmen resultierende Entwicklung der Lüftungswärmeverluste im Gesamtbestand unter Berücksichtigung einer Klimaerwärmung um 1 K bis 2050. Da die Lüftungswärmeverluste bei Gebäuden mit Wärmerückgewinnungsanlage stark reduziert werden, fallen die rund 3 % der Gebäude ohne Wärmerückgewinnungsanlage bei den Verlusten sehr stark ins Gewicht. In den orangefarbenen Säulen sind zusätzlich die Infiltrationsverluste enthalten. Gut gedämmte Gebäude mit Wärmerückgewinnungsanlage werden als sehr dicht betrachtet. Die Infiltrationsverluste werden mit einem  $n_{50}$ -Wert von  $0,50 \text{ h}^{-1}$  berechnet. Andere Gebäude werden in Abhängigkeit von ihrem Wärmeschutz gemäß DIN 1946-6 als undichter betrachtet.

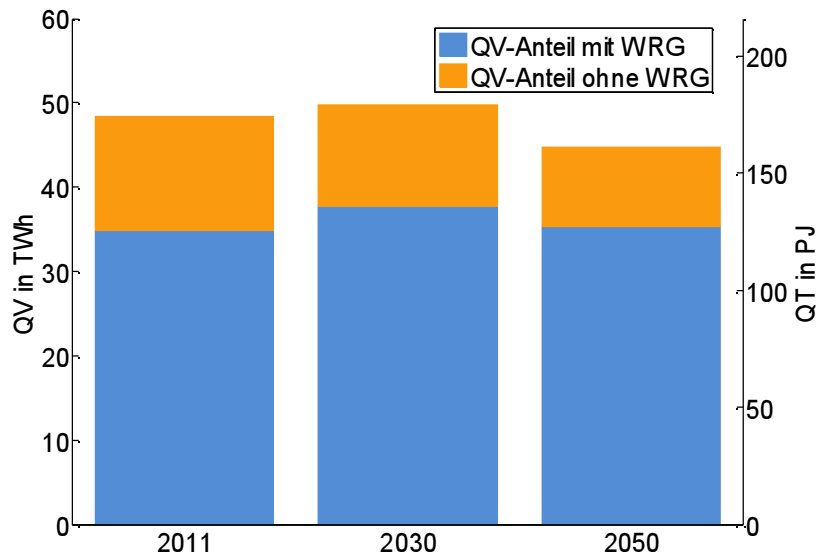


Abbildung 5.31: Entwicklung der Lüftungswärmeverluste im Bestand mit Berücksichtigung einer Klimaerwärmung um  $1^\circ\text{C}$

### 5.3.5 Entwicklung der solaren und inneren Gewinne

Transmissions- und Lüftungswärmeverluste werden durch innere und solare Gewinne zum Teil kompensiert. In Abbildung 5.32 sind die gesamten auftretenden solaren und inneren Gewinne in den Jahren 2011, 2030 und 2050 abgebildet.

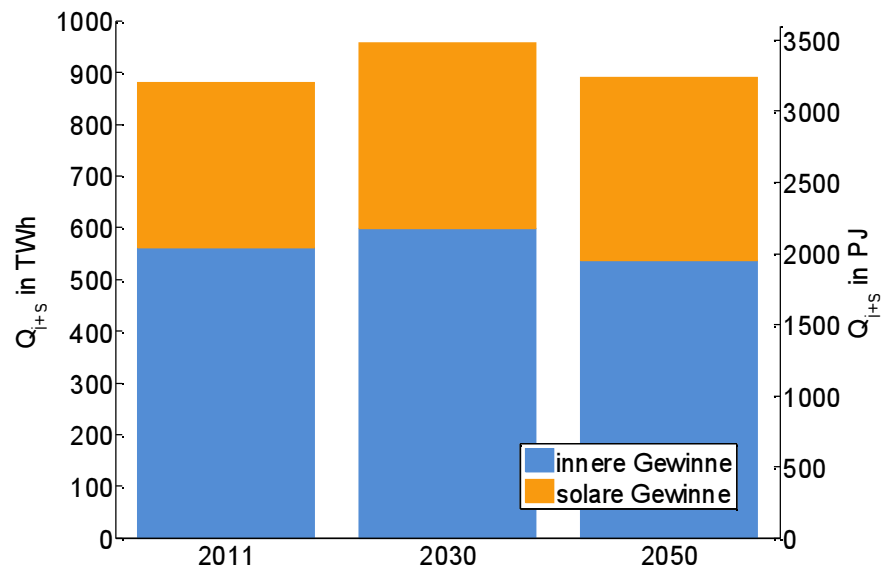


Abbildung 5.32: Summe der solaren und inneren Gewinne

Sie übersteigen die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste deutlich, allerdings fällt ein großer Anteil der Verluste in Zeiten von niedrigem oder keinen Heizwärmeverlusten an, so dass die Gewinne nicht genutzt werden können. Abbildung 5.33 zeigt dies am Beispiel eines Einfamilienhauses (EFH\_E). Dargestellt sind die monatlichen solaren und inneren Gewinne bezogen auf die Nutzfläche sowie die Verluste. Ein hoher Anteil der solaren Gewinne fällt in den Sommer, wo kein oder nur wenig Wärmeverluste auftreten (rote Linie).

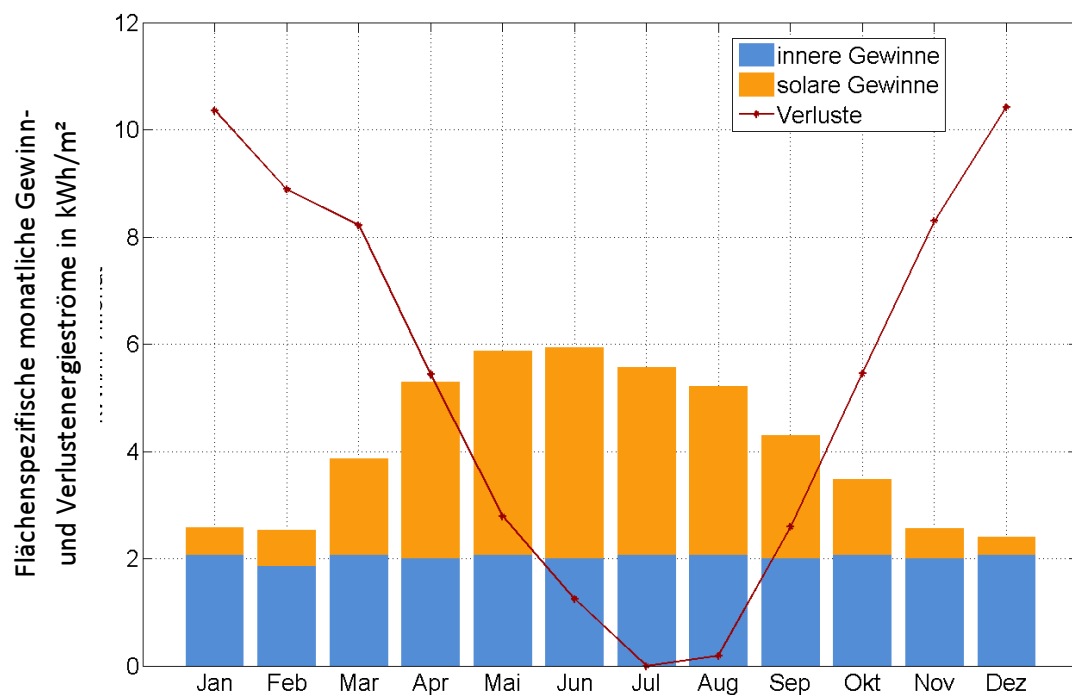


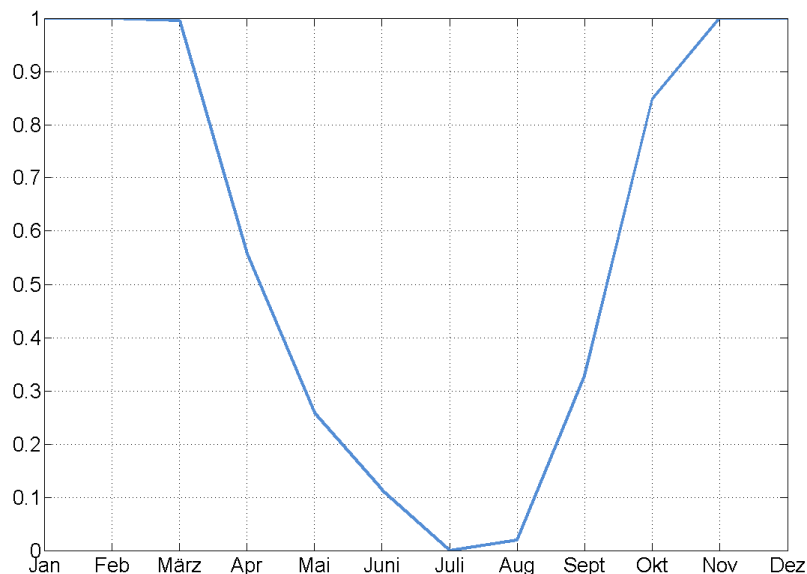
Abbildung 5.33: Flächenspezifische monatliche Gewinne und Verluste für das EFH\_B im Jahr 2050 des Sockelszenarios

Wie stark die Gewinne ausgenutzt werden können, wird nach dem Monatsbilanzverfahren der DIN V 4108-6 über einen monatlichen Ausnutzungsgrad  $\eta$  berechnet. Dieser ergibt sich aus:

$$\eta_m = \frac{1 - \left( \frac{Q_{m,Gewinn}}{(Q_{T,m} + Q_{V,m})} \right)^a}{1 - \left( \frac{Q_{m,Gewinn}}{(Q_{T,m} + Q_{V,m})} \right)^{a+1}}$$

Sind die Gewinne sehr viel kleiner als die Verluste, so nähert sich der Ausnutzungsgrad 100 %, sind die Gewinne deutlich größer als die Verluste, so nähert sich der Ausnutzungsgrad dem Verhältnis  $(Q_{\text{Transmission}} + Q_{\text{Ventilation}}) / Q_{\text{Gewinn}}$  an, so dass die Gewinne die Verluste genau kompensieren. Dieser Effekt der Komplettkompensation tritt bei sehr gut wärmegeämmten Nichtwohngebäuden mit Wärmerückgewinnungsanlagen zum Teil über das ganze Jahr hinweg auf, so dass der verbleibende Heizwärmebedarf gegen Null geht. Der genutzte Parameter  $a$  wird gemäß DIN V 4108-6 bestimmt und hängt von der Bauartschwere und der Zeitkonstante des Gebäudes ab.

In Abbildung 5.34 ist der monatliche Ausnutzungsgrad beispielhaft für ein Einfamilienhaus (EFH\_B) bei Ausstattung mit Wärmerückgewinnungsanlage dargestellt. Ersichtlich wird hier, dass ab April die inneren und solaren Gewinne nicht mehr komplett genutzt werden und im Juli die Ausnutzung gegen Null geht. Erst im November und Dezember beträgt die Ausnutzung der Gewinne wieder 100 %.

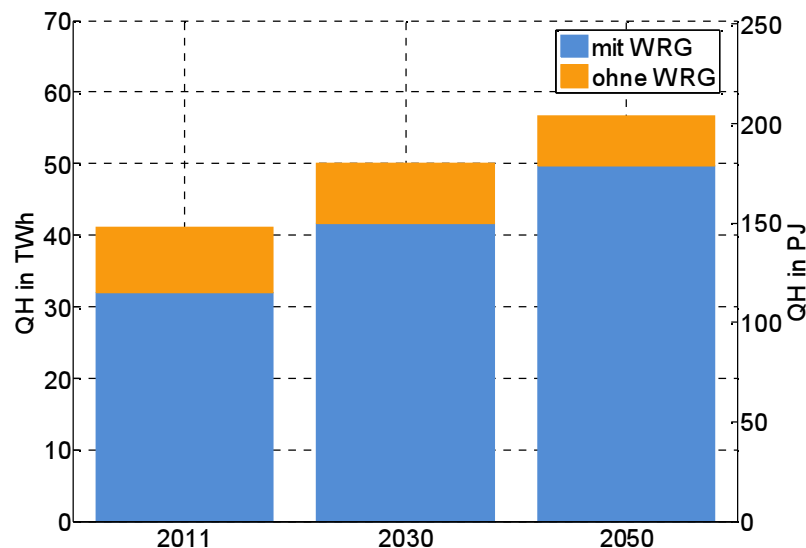


**Abbildung 5.34: Monatlicher Ausnutzungsgrad beispielhaft für den Gebäudetyp EFH\_B mit Wärmerückgewinnungsanlage für das Jahr 2050 im Sockelszenario**

### 5.3.6 Resultierende Entwicklung des Gesamtheizwärmebedarfs

Der Gesamtheizwärmebedarf resultiert aus der Summe der Verluste und Gewinne. Bedingt durch den hohen Dämmgrad im hier untersuchten Szenario wirken sich die inneren und solaren Gewinne in Relation zu den stark verminderten Verlusten prozentual besonders stark aus. Lagen die oben im Detail beschriebenen Transmissionswärmeverluste noch in der Größenordnung von 230 TWh, die

Lüftungsverluste in der Größenordnung von 45 TWh und der Warmwasserwärmebedarf bei rund 75 TWh, so werden diese nun unter Berücksichtigung der mit dem Ausnutzungsgrad modifizierten Gewinne wieder massiv reduziert.



**Abbildung 5.35: Entwicklung des Gesamtheizwärmebedarfssockels (nur Raumwärme) bei normgemäßer Anwendung des Ausnutzungsgrads der DIN V 4108-6**

Werden Transmissions- und Lüftungswärmeverluste gemäß dem Monatsbilanzverfahren der DIN V 4108-6 mit den solaren und inneren Wärmegewinnen verrechnet, so ergibt sich ein Heizwärmebedarfssockel von knapp 41 TWh, der durch den zunehmenden Gebäudebestand bis 2050 auf knapp 57 TWh anwächst. Dies entspricht einem durchschnittlichen spezifischen Heizwärmebedarf von 8 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Der Heizwärmebedarf fällt zum ganz überwiegenden Teil in Wohngebäuden an. Nichtwohngebäude weisen in 2050 im Sockel einen Heizwärmebedarf von lediglich 5,9 TWh auf.

Allerdings stößt die Berechnungsmethodik der Berechnungsnormen für sehr gut wärmegeämmte Gebäude hier an ihre Grenzen. Der Heizwärmebedarf wurde deshalb zusätzlich nach dem Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP) berechnet. Mit der Formel für den Ausnutzungsgrad des PHPP ergeben sich 51 TWh in 2011 und 63 TWh in 2050. Das ist eine Differenz von 6 TWh in 2050 zur Normberechnung.

Der Verbrauchsabgleich wurde in dieser Sockelanalyse nicht angewendet, da nur sehr geringe Datengrundlage für den Verbrauchsbedarfsabgleich bei diesen extrem gut wärmegeämmten Gebäuden existiert.

In der Summe mit dem Warmwasserverbrauch ergibt sich in 2050 ein Gesamtsockelwärmebedarf von 134 TWh. Der Anteil des Warmwasserwärmebedarfs am Gesamtwärmebedarf beträgt 57,5 % und sinkt bis 2050 wegen des leicht ansteigenden spezifischen Raumwärmebedarfs (aufgrund sinkender innerer Gewinne) leicht ab (auf 54 %).

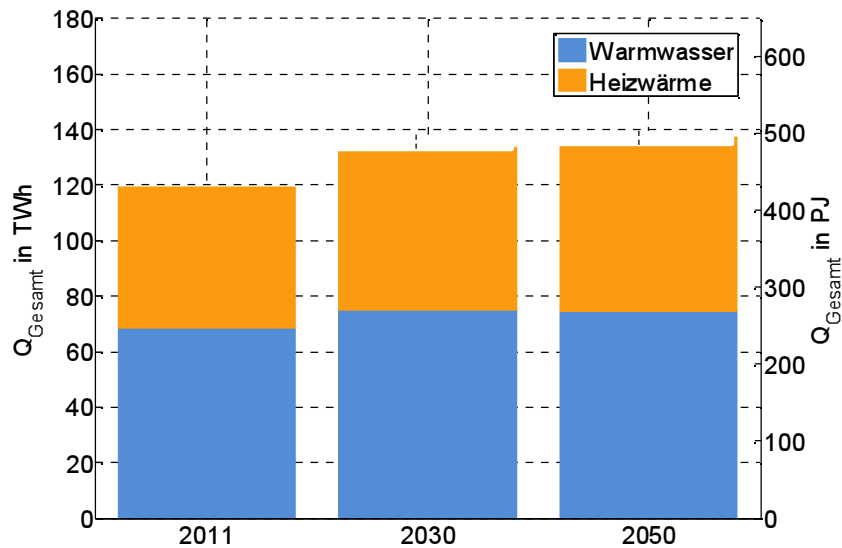


Abbildung 5.36: Entwicklung des gesamten Nutzwärmebedarfs in der Sockelanalyse

#### 5.4 Zusammenstellung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Trendszenarios, des Szenarios zum engagierten Klimaschutz und die Sockelanalyse miteinander verglichen. Auch wenn die die Ergebnisse der Sockelanalyse in erster Linie der Identifikation der „Sockelbeiträge“ der beiden eigentlichen Szenarien Trend und engagierter Klimaschutz dienen, werden in folgender Grafik die drei Ergebnisverläufe gezeigt. Zumindest der Endwert der Sockelanalyse entspricht dabei dem Ergebniswert eines „Sockelszenarios“.

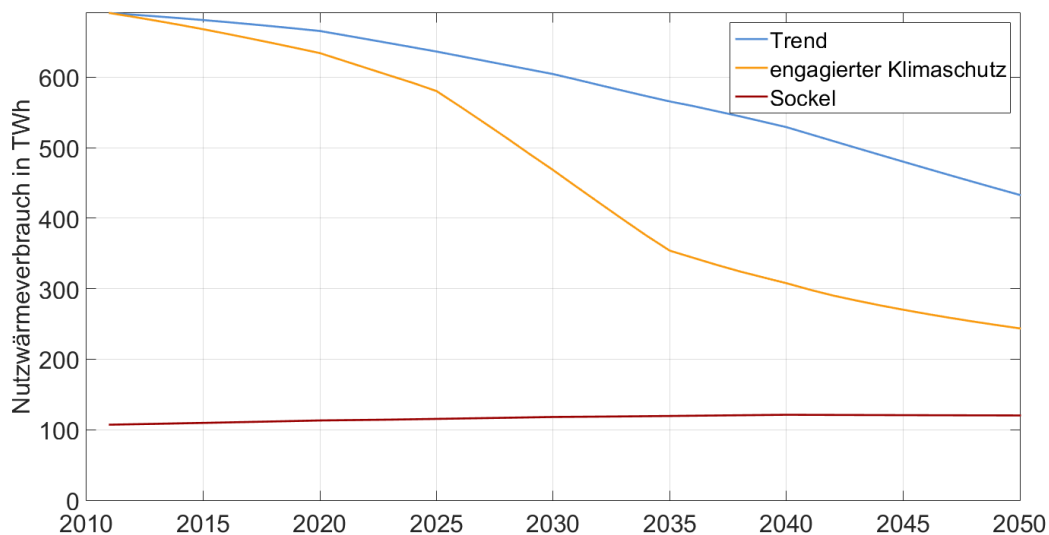


Abbildung 5.37: Vergleich der Szenarien „Trend“, „engagierter Klimaschutz“ und „Sockelanalyse“

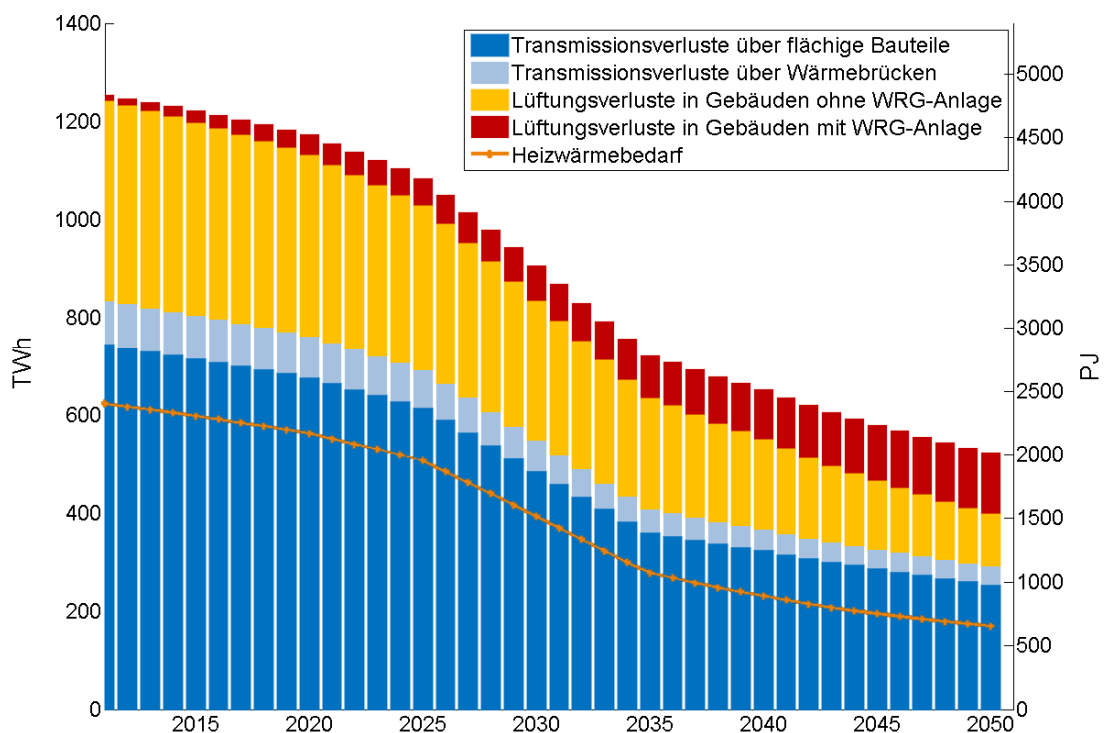
Ausgehend von einem Nutzwärmebedarf in 2011 von 693 TWh wird dieser im Trendszenario auf 433 TWh (entspricht einer Reduktion um 35 %), im Szenario engagierter Klimaschutz auf 244 TWh

(entspricht einer Reduktion um 65 %) und in der Sockelanalyse auf 134 TWh (entspricht einer Reduktion von 81 %) gesenkt. Der gezeigte Sockelwertverlauf berücksichtigt die Beiträge

- der verbleibenden Transmissionswärmeverluste in der Fläche,
- der Wärmebrücken,
- der Dämmrestriktionen
- der Lüftungswärmeverluste sowie
- der Warmwasserbereitung.

Diese Werte variieren in Abhängigkeit der Entwicklung des Gebäudebestandes im Bereich von 105 bis 134 TWh.

Zum besseren Verständnis von Abbildung 5.39 soll vorab das Ergebnis des Szenarios „engagierter Klimaschutz“ diskutiert werden. Es ist in Abbildung 5.38 zu sehen. Deutlich wird die schon mehrfach diskutierte Reduktion des Heizwärmebedarfs. Zusätzlich werden hier aber die einzelnen Beiträge für Transmission und Lüftung sowie die sich überlagernden Gewinne deutlich. Der Heizwärmebedarf ergibt sich dann aus der Summe der Verluste und Gewinne. Bei genauerer Betrachtung wird sichtbar, dass die Gewinne anteilig etwas bedeutsamer werden. Haben sie im Jahr 2011 einen Anteil von ca. 51 % an den Verlusten (der Heizwärmebedarf beträgt 625 TWh, die gesamten Verluste belaufen sich auf 1.270 TWh, so dass die Gewinne bei 645 TWh liegen), so steigt dieser bis 2050 auf 60 % (der Heizwärmebedarf beträgt dann 244 TWh, die gesamten Verluste belaufen sich auf 556 TWh, so dass die Gewinne bei 332 TWh liegen). Bemerkenswert sind die geringen Verluste an Wärmebrücken, deren Anteil mit zunehmender Modernisierung des Bestandes leicht sinkt. Ferner werden die Lüftungswärmeverluste im Detail sichtbar. Die Verluste in Gebäuden mit Wärmerückgewinnungsanlagen steigen, da sich deren Anzahl über die Jahre stetig erhöht. Im Gegenzug sinken die Lüftungswärmeverluste in Gebäuden ohne Wärmerückgewinnung stark ab.



**Abbildung 5.38: Zusammensetzung des Heizwärmebedarfs (inkl. Warmwasser) der einzelnen positiv und negativ anzusetzenden Energiemengen**

Betrachtet man nun nicht mehr den oben diskutierten zeitlichen Verlauf, sondern vielmehr den Endzustand in 2050, so ergibt sich Abbildung 5.39. Hier werden für das Szenario „engagierter Klimaschutz“ und die Sockelanalyse die Endwerte der Verluste, der Gewinne und der resultierenden Nutzwärmeverbräuche vergleichend dargestellt.

Das Szenario „engagierter Klimaschutz“ ist bereits als äußerst ambitioniert einzustufen und eine weitere Intensivierung der Bemühungen zur Steigerung der Energieeffizienz erscheint bis 2050 keineswegs realistisch. Der Wärmeverbrauch für Warmwasser, Wärmebrücken und Dämmrestriktionen ist im Szenario „engagierter Klimaschutz“ bereits bis zu den Sockelwerten abgesenkt. Die verbleibenden Einsparpotenziale bestehen in den Transmissionswärmeverlusten der Bauteilflächen (112 TWh) und in den Lüftungswärmeverlusten (190 TWh). Dabei können die Infiltrationsverluste durch Abdichtungsmaßnahmen und den Einbau von Wärmerückgewinnungsanlagen – trotz des hohen angenommenen Standards - noch um 102 TWh gesenkt werden. Die Wärmeverluste, die in Wärmerückgewinnungsanlagen anfallen, können durch Effizienzsteigerungen der Wärmetauscher noch um 88 TWh gesenkt werden. Die genaue Höhe dieser Einsparpotenziale bis zum theoretischen Sockel hängt natürlich von den Annahmen im Szenario „engagierter Klimaschutz“ ab. Dennoch ist die Höhe der verbleibenden Potenziale bei den Lüftungswärmeverlusten im Vergleich zu denen bei der Transmission bemerkenswert.

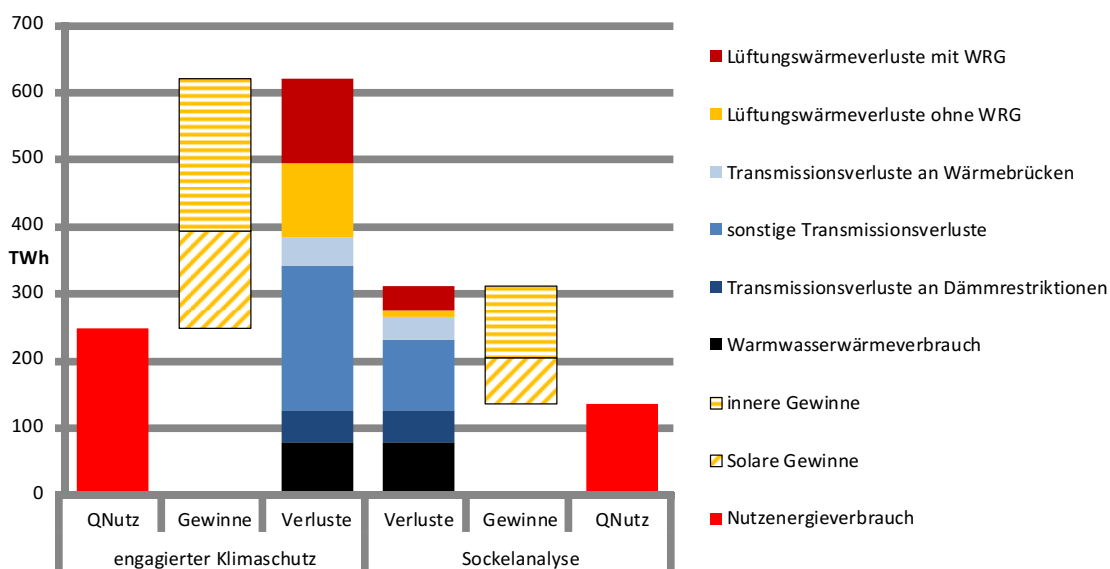
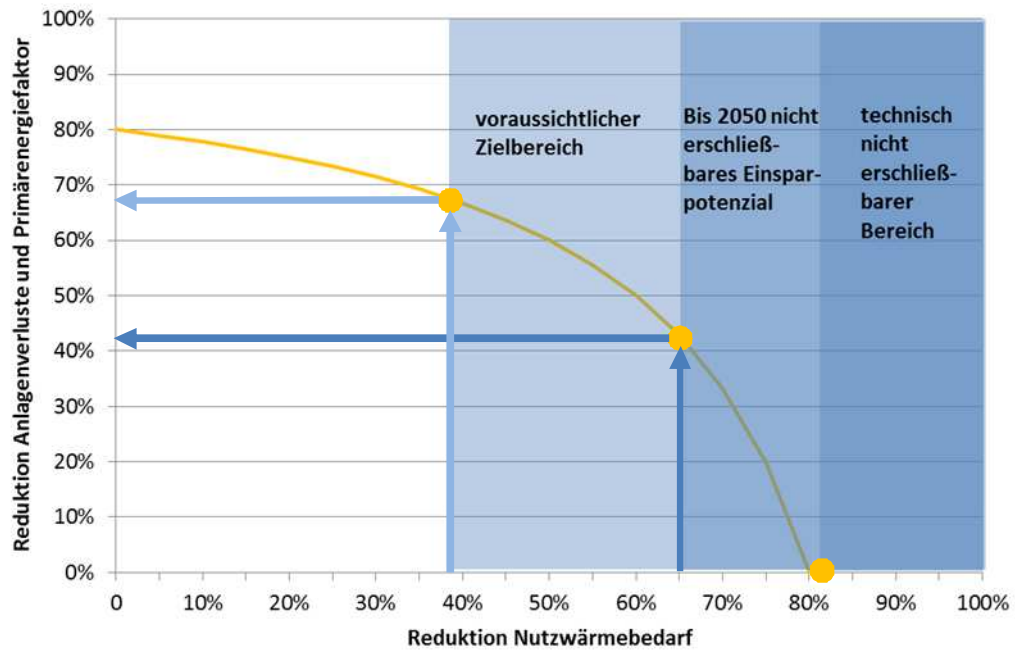


Abbildung 5.39: Endwerte des Szenarios „engagierter Klimaschutz“ und der „Sockelanalyse“ für das Jahr 2050

Die abschließende Abbildung 5.40 nimmt obige Ergebnisse zum verbleibenden Nutzwärmeverbrauch auf (rote Säulen in Abbildung 5.39) und ergänzt sie analog um die Ergebnisse des Trendszenarios. Die Analysen zeigen für die Sockelanalyse eine (nicht bis 2050 erreichbare) Reduktion des Nutzwärmebedarfs von 81 %, für das Szenario „engagierter Klimaschutz“, auf 65 % und für das Trendszenario auf 37 %. Diese Reduktionspotenziale zeigt die Abbildung durch die blauen Bereiche. Der „voraussichtliche Zielbereich“ markiert dabei den realistischen Verlauf, der durch die Fortführung heutiger Trends auf der linken Seite und die durch den „engagierten Klimaschutz“ auf der rechten Seite begrenzt wird.



**Abbildung 5.40: Vergleich der Szenarien „Trend“, „engagierter Klimaschutz“ und „Sockelanalyse“ im Hinblick auf das Klimaschutzziel der Primärenergieeinsparung um 80 %**

Entsprechend können aus der Grafik auch die bis 2050 erforderlichen Anstrengungen beim Umbau der Wärmeversorgung abgelesen werden, die zur Erreichung des -80 %-Ziels benötigt werden. Die Anlagenaufwandszahlen müssen demnach um 43 bis 68 % gesenkt werden.

## Literaturverzeichnis

- 3-Plan Haustechnik AG. (2010). Wie sinnvoll ist die Superdämmung? *Service-Mailing 2/2010*.
- AGEB. (2013). *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2010 und 2011*.
- AGEB. (2015). *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2014*. Berlin: <http://www.ag-energiebilanzen.de/>.
- ARGE-SH. (2011). *Wohnungsbau in Deutschland - Modernisierung oder Bestandsersatz*. Kiel: Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.
- Aspen Aerogels, Inc. (kein Datum). Abgerufen am April 2014 von [http://www.aerogel.com/products/pdf/Spaceloft\\_DS\\_GERMAN.pdf](http://www.aerogel.com/products/pdf/Spaceloft_DS_GERMAN.pdf)
- Bau- und Umweltchemie AG. (2013). Ökobilanz von Aerogel-Dämmputz. *raumlufthygiene-info 1 / 2013*.
- BEI. (2005). *Innovative Dämmstoffe im Bauwesen, Forschungsstand und Marktübersicht*. Bremen.
- Beuth Hochschule, IFEU. (2012). *Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden*. Berlin.
- Bitbau Dörr GmbH. (kein Datum). Abgerufen am April 2014 von [http://www.bitbau.at/Preislisten/pdf/pr\\_bitbau\\_daemm\\_03.pdf](http://www.bitbau.at/Preislisten/pdf/pr_bitbau_daemm_03.pdf)
- BMUB. (kein Datum). *WECOBIS - Ökologisches Baustoffinformationssystem*. Abgerufen am April 2014 von <http://www.wecobis.de/>
- BMVBS. (2010). *Vereinfachung zur geometrischen und technischen Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand*.
- BMWi. (2010). *Energiedaten*. Berlin.
- BMWi. (2013). *Entwicklung von monatlichen Energiepreisen*. Berlin.
- BMWi. (2014). *Sanierungsbedarf im Gebäudebestand*.
- dena. (2012). *Gebäudereport 2012, Statistiken und Analysen zu Energieeffizienz*. Berlin.
- dena. (2013). *Eigentümerstruktur des Immobilienbestandes von Nichtwohngebäuden*. Berlin.
- destatis. (2009). *Bevölkerung Deutschlands bis 2060*. Wiesbaden.
- Destatis. (2012). *Bauen und Wohnen: Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- destatis. (2013). *Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969 - 2013*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

destatis. *Eckdaten der Krankenhäuser*. 2013.

Deutsche Bundesregierung. (2010). *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*.

Deutsches Institut für Normung. (2003). *DIN 4701-10:2003-08 Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung*. Beuth Verlag GmbH.

Deutsches Institut für Normung. (2011). *DIN V 18599-10:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Beuth Verlag GmbH.

DLR, Fraunhofer IWES, IfnE, Nitsch. (2011). *"Leitstudie 2011" Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*. Stuttgart, Kassel, Teltow.

Ecofys. (2012). *Entwicklung eines Referenzszenarios im Gebäudebereich für das Gesamtziel „40% CO2-Einsparung bis 2020“*, Nr. 26/2012. Berlin.

EDF et al. (2013). *Back to Reality: How domestic Energy Efficiency Policies in four European Countries can be improved by using empirical Data instead of normative Calculation*. Stockholm.

EDF et al. (2013). *How domestic energy efficiency policies in four European countries can be improved by using empirical data instead of normative calculation*. Moret-sur-Loing.

EDF et al. (2013). *The Influence of the (P)Rebound Effect, the Energy Efficiency Gap and Refurbishment Market Heterogeneity on Energy Demand Dynamics*. Moret-sur-Loing.

EnBausa. (kein Datum). *EnBausa*. Abgerufen am 29. April 2014 von <http://www.enbausa.de/daemmung-fassade/daemmung/waende/vakuumdaemmung.html>

EnEV. (2014). *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung)*.

EULEB. (2007). *EUROPEAN HIGH QUALITY LOW ENERGY BUILDINGS*. [www.EULEB.info](http://www.EULEB.info): Project-No.: EIE-2003-172 EULEB.

FFE. (2013). *Auf die Definition kommt es an - Bewertung und Vergleich flächenspezifischer Größen*. Abgerufen am 20. 9 2014 von [https://www.ffe.de/download/article/465/FfE-Artikel\\_BWK\\_05-2013.pdf](https://www.ffe.de/download/article/465/FfE-Artikel_BWK_05-2013.pdf)

FIW. (2013). *Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe; Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen*. Gräfelfing.

- Fixit AG. (kein Datum). Abgerufen am April 2014 von [http://www.fixit.ch/aerogel/pdf/TM\\_222\\_technisches\\_merkblatt.pdf](http://www.fixit.ch/aerogel/pdf/TM_222_technisches_merkblatt.pdf)
- Fraunhofer ISE et al. (2012). *Erarbeitung einer integrierten Wärme- und Kältestrategie (Phase 2) - Zielsysteme für den Gebäudebereich im Jahr 2050*. Freiburg.
- Fraunhofer ISI et al. (2005). *Energiepass für Gebäude: Evaluation des Feldversuchs; Zusammenfassung der Ergebnisse für die deutsche Energie-Agentur*. Karlsruhe.
- Fraunhofer ISI et al. (2013). *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010*. Karlsruhe.
- GreenSpec. (kein Datum). Abgerufen am April 2014 von <http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-mineral/#aerogel>
- HAGA AG Naturbaustoffe. (kein Datum). Abgerufen am April 2014 von [http://www.haganatur.ch/wp-content/uploads/2011/09/HAGA\\_Aerogel\\_Spaceloft\\_Roll\\_u\\_Duro.pdf](http://www.haganatur.ch/wp-content/uploads/2011/09/HAGA_Aerogel_Spaceloft_Roll_u_Duro.pdf)
- IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie. (kein Datum). Abgerufen am April 2014 von <http://www.ibo.at/documents/Dammstoffe2013.pdf>
- IFEU. (2005). *Verbrauchs- oder Bedarfspass? Anforderungen an den Energiepass für Wohngebäude aus Sicht privater Käufer und Mieter*. Heidelberg.
- IFEU et al. (2014). *100 % Wärme aus erneuerbaren Energien?* Heidelberg.
- IGHT. (2014). *Schwächen und Energiesparpotenziale von Trinkwarmwasseranlagen: Erfahrungen aus dem Projekt ALFA® – Allianz für Anlageneffizienz*. Ingenieurbüro IGH. Berlin: Berliner Energietage.
- InnoDämm – Vertriebsgesellschaft für innovative Dämmstoffe mbH. (kein Datum). Abgerufen am April 2014 von [http://www.innodaemm.de/files/aerogel\\_v1.pdf](http://www.innodaemm.de/files/aerogel_v1.pdf)
- Institut für Bauforschung e.V. (1983). *K-Werte alter Bauteile - Arbeitsunterlagen zur Rationalisierung waermeschutztechnischer Berechnungen bei der Modernisierung*. Eschborn.
- Institut für Energie, FHBB, Muttentz; ESU-services, Uster. (2013). *Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Paneels (VIP)*. Muttentz.
- IpeG-Institut. (kein Datum). *Überblick Plattendämmstoffe*.
- IWU. (2007). *Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU*. Darmstadt.
- IWU. (2010). *Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*. Darmstadt.

- IWU. (2011). *Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU*. Darmstadt.
- IWU. (2011). Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. In T. Loga, N. Diefenbach, & R. Born, *Deutsche Gebäudetypologie* (S. 47 ff.). Darmstadt.
- IWU. (2011). *Deutsche Gebäudetypologie*. Darmstadt.
- IWU. (2011). *Evaluierung und Fortentwicklung der EnEV 2009: Untersuchung zu ökonomischen Rahmenbedingungen im Wohnungsbau*. Darmstadt: Zukunft Bau (BMVBS).
- IWU. (2012). *Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der Modernisierung von Wohngebäuden*. Darmstadt.
- IWU. (03. 10 2013). *Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU*. Abgerufen am 12. 12 2014 von [http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/klima\\_altbau/Flächen\\_Gebäudetypologie\\_Okt\\_2013.pdf](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Flächen_Gebäudetypologie_Okt_2013.pdf)
- IWU. (2013). *Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich*. Darmstadt.
- Leibnitz-Institut. (2011). *Typologie beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland*. Berlin.
- Leibnitz-Institut. (2013). *Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude - Erfassung und Quantifizierung von Energiespar- und CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzialen*. Berlin.
- Mikrozensus. (2010). Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Wiesbaden.
- Neufert, E. (2005). *Bauentwurfslehre*. Wiesbaden: Vieweg.
- Pansolar, Studienzentrum Pinkafeld. (2008). *Graue Energie - ein wesentlicher Faktor zur Energieoptimierung von Gebäuden*. Pinkafeld.
- Pilz, A. (9 2012). Innovativ dämmen mit Aerogel. *Applica*.
- Prognos et al. (2014). *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*. Basel et al.
- ROCKWOOL Handelsgesellschaft m.b.H. (kein Datum). Abgerufen am April 2014 von [http://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/50126\\_Rockwool\\_2013.pdf](http://www.bdb.at/Download/preisliste/pdf/50126_Rockwool_2013.pdf)
- Sinus Sociovision, Ecolog. (2008). *Umweltbewusstsein und Umweltverhalten der sozialen Milieus in Deutschland*. Heidelberg.
- statista. (2014). Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland in den Jahren 1975 bis 2002. Statistisches Bundesamt Deutschland.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2014). *Bevölkerungsvorausberechnung*.

- Sto SE & Co. KGaA. (kein Datum). Abgerufen am April 2014 von <http://www.sto-aevero.de/stotherm-in-aevero.html>
- Tabula. (11. 02 2012). *DE Germany - Country Page*. Abgerufen am 17. 08 2014 von <http://www.episcope.eu/building-typology/country/de/>
- Tabula. (11. 02 2012). *Further Development of the German Residential Building Typology*. IWU, Darmstadt.
- Techem GmbH. (2010). *Hilfen für den Wohnungswirt*.
- Universität Kassel et al. (2014). Tagungsband EnOB, Energieinnovation in Neubau und Sanierung. Essen.
- WEKA MEDIA GmbH & Co. KG. (kein Datum). *baupreise.de*. Abgerufen am April 2014 von <https://baupreise.de>
- Wuppertal Institut. (2012). *Der Rebound-Effekt*. Wuppertal.
- www.episcope.eu. (kein Datum). <http://www.episcope.eu/building-typology/country/de/>.  
Abgerufen am 05. 05 2015 von <http://www.episcope.eu/building-typology/country/de/>
- Zensus. (2011). *Statistische Ämter des Bundes und der Länder*. Wiesbaden.
- Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (2009). *Katalog regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten*. Kassel.

## Abbildungsverzeichnis

|                 |                                                                                                                                                                                                                  |    |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 0.1:  | Zielkurve für eine Primärenergieeinsparung von 80 % und bis 2050 realisierbares Einsparpotenzial des Nutzwärmeverbrauchs .....                                                                                   | 5  |
| Abbildung 0.2:  | Vier Analysepfade zur Bestimmung der minimal erreichbaren U-Werte .....                                                                                                                                          | 6  |
| Abbildung 0.3:  | Vergleich der Szenarien „Trend“ und „engagierter Klimaschutz“ sowie der „Sockelanalyse“ .....                                                                                                                    | 7  |
| Abbildung 0.4:  | Vergleich der Szenarien „Trend“ und „engagierter Klimaschutz“ sowie der „Sockelanalyse“ und jeweiligen Auswirkungen auf die erforderliche Reduktion der Anlagenverluste und Primärenergiefaktoren .....          | 8  |
| Abbildung 1.1:  | Endenergieverbrauch in Haushalten (BMW, 2010).....                                                                                                                                                               | 13 |
| Abbildung 1.2:  | Zielkurve für eine Primärenergieeinsparung von 80 % und Einsparpotenzial des Nutzwärmeverbrauchs .....                                                                                                           | 14 |
| Abbildung 1.3:  | Zielkurve für eine Primärenergieeinsparung von 80 % und Einsparpotenzial des Nutzwärmeverbrauchs .....                                                                                                           | 15 |
| Abbildung 2.1:  | Energieflüsse im Gebäude in Anlehnung an DIN V 4701-10.....                                                                                                                                                      | 16 |
| Abbildung 2.2:  | Schematische Darstellung des Gebäudemodells GEMOD .....                                                                                                                                                          | 18 |
| Abbildung 2.3:  | Sanierungszyklen für Dächer im Gebäudetyp EFH_C nach Art der Sanierung.....                                                                                                                                      | 21 |
| Abbildung 2.4:  | Entwicklung des Bestands der Dächer im EFH_C nach Art der Sanierung.....                                                                                                                                         | 21 |
| Abbildung 3.1:  | Detaillierungsgrad des Bottom-Up-Modells GEMOD .....                                                                                                                                                             | 23 |
| Abbildung 3.2:  | Verteilung der Baualtersklassen des Wohngebäudebestandes im Jahr 2011 .....                                                                                                                                      | 27 |
| Abbildung 3.3:  | Prozentuale Darstellung der kumulierten Baualtersklassenvertreter (im Jahr 2011): 93 % aller Wohngebäude in 2011 wurden vor 2001 errichtet. ....                                                                 | 27 |
| Abbildung 3.4:  | Verteilung der Wohngebäude (IWU) auf die verschiedenen Gebäudetypen im Jahr 2011 .....                                                                                                                           | 28 |
| Abbildung 3.5:  | Verteilung der Wohnflächen auf die verschiedenen Gebäudetypen im Jahr 2011 .....                                                                                                                                 | 28 |
| Abbildung 3.6:  | Summe der Flächen der thermischen Hüllen der jeweiligen Gebäudetypen im Jahr 2011 .....                                                                                                                          | 29 |
| Abbildung 3.7:  | Prozentuale Verteilung der gesamten thermischen Hüllfläche auf die Bauteile Dach, Außenwand, erdreichberührte Bauteile und Fenster im Jahr 2011, zusätzlich Differenzierung zwischen den Gebäudetypen.....       | 29 |
| Abbildung 3.8:  | Qualitative Darstellung der Sanierungszustände der Bauteile sortiert nach Gebäudetypen für das Jahr 2011; Zahlenwerte auf Basis eigener Analysen und (IWU/BEI, 2010) .....                                       | 30 |
| Abbildung 3.9:  | Qualitative Darstellung der Sanierungszustände der Bauteile sortiert nach Baualtersklassen (von A: vor 1918 bis J: bis 2011) für das Jahr 2011; Zahlenwerte auf Basis eigener Analysen und (IWU/BEI, 2010) ..... | 31 |
| Abbildung 3.10: | Bevölkerungsprognose des Statistischen Bundesamtes (destatis, 2009) .....                                                                                                                                        | 32 |
| Abbildung 3.11: | Prognose der bewohnten Gesamtwohnfläche in Wohn- und Nichtwohngebäuden durch Zusammenführung der Erkenntnisse aus (Prognos et al., 2014) und (Zensus, 2011).....                                                 | 33 |
| Abbildung 3.12: | Entwicklung der Pro-Kopf-Wohnfläche für die kommenden Dekaden nach (Prognos et al., 2014) und (Zensus, 2011).....                                                                                                | 33 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 3.13: Entwicklung der jährlichen Gesamtwohnfläche als Resultat von Neubau- und Abrissaktivitäten .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 34 |
| Abbildung 3.14: Variierende Abgangsraten bei vorgegebener Neubaurate. Die Abgangsrate ergibt sich aus dem jeweiligen Gesamtflächenbedarf der Bevölkerung. Im Resultat finden sich bei hoher Neubaurate in 2050 mehr energieeffiziente, neue Gebäude und weniger alte, oftmals ungedämmte Gebäude im Bestand. Bei den im Bestand verbleibenden Altbauten wird gleichzeitig von einer zunehmenden „Durchsanierung“ ausgegangen. .... | 36 |
| Abbildung 3.15: Beispielhafte Darstellung der EFH-Entwicklung bei einem ausschließlichen Abriss von der Baualtersklassen C, D und E. Deutlich sichtbar wird der geringe Einfluss der Neubautätigkeit in den Baualtersklassen nach 2012.....                                                                                                                                                                                        | 37 |
| Abbildung 3.16: Aspekte von Nichtwohngebäuden in den verschiedenen Studien .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 40 |
| Abbildung 3.17: Verteilungsmuster der Nichtwohngebäude .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 44 |
| Abbildung 3.18: Vergleich von Anzahl und Nettogrundfläche der Nichtwohngebäude in verschiedenen Studien .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 45 |
| Abbildung 3.19: Darstellung Nutzwärmebedarf nach DIN 2067 Blatt 12 Tabelle 2 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 49 |
| Abbildung 3.20: Darstellung Nutzwärmebedarf nach verschiedenen Regelwerken .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 50 |
| Abbildung 3.21: Rebound- und Prebound-Effekt.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 56 |
| Abbildung 3.22: Verbrauchsfaktor für die untersuchten 49 Gebäude und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (ARGE-SH, 2011), eigene Darstellung) .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 58 |
| Abbildung 3.23: Verbrauchsfaktor für die untersuchten 99 Gebäude und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (IFEU, 2005), eigene Darstellung) .....                                                                                                                                                                                                                                                         | 58 |
| Abbildung 3.24: Verbrauchsfaktor für die untersuchten 356 Ein- und Zweifamilienhäuser und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (Fraunhofer ISI et al., 2005), eigene Darstellung) .....                                                                                                                                                                                                                   | 59 |
| Abbildung 3.25: Verbrauchsfaktor für die untersuchten 225 Gebäude mit 3-6 Wohneinheiten und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (Fraunhofer ISI et al., 2005), eigene Darstellung) .....                                                                                                                                                                                                                 | 59 |
| Abbildung 3.26: Verbrauchsfaktor für die untersuchten 180 Gebäude mit 7-12 Wohneinheiten und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV (Daten aus (Fraunhofer ISI et al., 2005), eigene Darstellung) .....                                                                                                                                                                                                                | 60 |
| Abbildung 3.27: Verbrauchsfaktor für die untersuchten Gebäude und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV; Quelle: (dena, 2012), eigene Darstellung.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 60 |
| Abbildung 3.28: Ergebnis der Untersuchungen zum Pre- und Reboundeffekt an 4.700 Haushalten in den Niederlanden (EDF et al., 2013) und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV .....                                                                                                                                                                                                                                     | 61 |
| Abbildung 3.29: Ergebnis der Untersuchungen zum Pre- und Reboundeffekt an 900 Gebäuden in Frankreich (EDF et al., 2013) und deren Verteilung auf die Effizienzklassen der EnEV .....                                                                                                                                                                                                                                               | 61 |
| Abbildung 3.30: Mittlerer Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Energiebedarf (Quelle: eigene Darstellung basierend auf IWU 2011) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 62 |
| Abbildung 3.31: Definition der Milieus nach Grundorientierung und sozialer Lage (Sinus Sociovision GmbH, 2009).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 63 |
| Abbildung 3.32: Milieuspezifischer Nutzwärmeverbrauch im Jahr 2011 nach Gebäudetypen .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 67 |

|                 |                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 3.33: | Milieuspezifischer Nutzwärmeverbrauch und Bevölkerungsanteil im Jahr 2011 nach Milieus.....                                                                                                                                                | 67 |
| Abbildung 4.1:  | Vier Analysepfade zur Bestimmung der minimal erreichbaren U-Werte .....                                                                                                                                                                    | 68 |
| Abbildung 4.2:  | Entwicklung der Wärmeleitfähigkeiten von Mineralwolle und expandiertem Polystyrol in den vergangenen Dekaden (FIW, 2013).....                                                                                                              | 71 |
| Abbildung 4.3:  | Extrapolation bisheriger U-Werte für die Bauteile Dach (2050: $U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und oberste Geschosdecke (2050: $U = 0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) .....                                                                  | 73 |
| Abbildung 4.4:  | Extrapolation bisheriger U-Werte für die das Bauteil Wand gegen außen und für das Bauteil Wand gegen Erdreich .....                                                                                                                        | 73 |
| Abbildung 4.5:  | Extrapolation bisheriger U-Werte für das Bauteil Innenwand gegen unbeheizten Keller (2050: $U = 0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und für das Bauteil Fußboden gegen unbeheizten Keller (2050: $U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) .....        | 73 |
| Abbildung 4.6:  | Extrapolation bisheriger U-Werte für das Bauteil Fußboden gegen Erdreich (2050: $U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und für das Bauteil Fenster (2050: $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) .....                                              | 74 |
| Abbildung 4.7:  | Maximale Energieeinsparung durch Dämmung unter Berücksichtigung des Aufwands für die Herstellung (Mineralfaser mit $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ , Zeitraum 30 a) optimale Dämmstärke 33 cm, $U = 0,092 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....      | 75 |
| Abbildung 4.8:  | Maximale Energieeinsparung durch Dämmung unter Berücksichtigung des Aufwands für die Herstellung (Aerogel-Dämmfilz mit $\lambda = 0,0136 \text{ W/mK}$ , Zeitraum 30 a) optimale Dämmstärke 10 cm, $U = 0,129 \text{ W/m}^2\text{K}$ ..... | 76 |
| Abbildung 4.9:  | Spezifischer Energieaufwand verschiedener Dämmstoffe .....                                                                                                                                                                                 | 77 |
| Abbildung 4.10: | Ermittlung der gesamtenergetisch minimalen Wärmedurchgangskoeffizienten für verschiedene Dämmstoffe .....                                                                                                                                  | 78 |
| Abbildung 4.11: | Materialkostenanstieg bei zunehmender Dämmstoffdicke .....                                                                                                                                                                                 | 79 |
| Abbildung 4.12: | Wärmedurchgangskoeffizient über Dämmstärke, Effekt des 2. und 29. Zentimeters (vorhandene Konstruktion $U = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $\lambda = 0,035 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).....                                                    | 79 |
| Abbildung 4.13: | Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten .....                                                                                                                              | 80 |
| Abbildung 4.14: | Kostenminimum für Mineralfaserdämmung mit $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ , 78 € Fixkosten und 2 €/cm variablen Kosten, resultierender U-Wert = $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....                                                          | 80 |
| Abbildung 4.15: | Kostenminimum für Aerogel-Dämmfilz mit $\lambda = 0,0136 \text{ W/mK}$ , 78 € Fixkosten und 62 €/cm variablen Kosten, resultierender U-Wert = $0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....                                                           | 81 |
| Abbildung 4.16: | Spezifische Kosten verschiedener Dämmstoffe im Vergleich .....                                                                                                                                                                             | 82 |
| Abbildung 4.17: | Ableitung der kostenoptimalen U-Werte aus den spezifischen Kosten .....                                                                                                                                                                    | 83 |
| Abbildung 4.18: | Kapitalwert von Dämmmaßnahmen in Abhängigkeit von Zeitpunkt der Maßnahme und Baualter des Gebäudes .....                                                                                                                                   | 84 |
| Abbildung 4.19: | Trend des Kapitalwerts von Dämmmaßnahmen in Abhängigkeit von Zeitpunkt der Maßnahme und Baualter der Gebäude .....                                                                                                                         | 85 |
| Abbildung 4.20: | Lage des Kapitalwerts bei der Berechnung mit Vollkosten oder energiebedingten Mehrkosten nach 30 Jahren (Beispiel für ein WDVS aus Mineralfaser oder EPS jeweils unter Randbedingungen, die eine hohe Dämmstärke begünstigen) .....        | 86 |
| Abbildung 4.21: | Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Außenwänden, die vor 2002 errichtet wurden, mit WDVS aus Mineralfaser oder Polystyrol .....                                                                            | 88 |

|                 |                                                                                                                                                                                                                    |     |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 4.22: | Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Außenwänden, die nach EnEV 2002 errichtet wurden, mit WDVS aus Mineralfaser oder Polystyrol (links) oder mit Vakuumisulationspaneelen .....    | 89  |
| Abbildung 4.23: | Kapitalwert als Funktion der Dämmstärke bei der Dämmung von Außenwänden mit Vakuumisulationspaneelen unter für Dämmmaßnahmen günstigen Randbedingungen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkostensteigerung) .....    | 89  |
| Abbildung 4.24: | Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Steildächern mit Mineralwolle (links) und mit Polyurethan (rechts).....                                                                        | 91  |
| Abbildung 4.25: | Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Flachdächern mit Mineralwolle und mit Polyurethan mit Aerogelstruktur .....                                                                    | 92  |
| Abbildung 4.26: | Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von begehbaren obersten Geschossdecken mit Mineralfaser- oder Polystyrol-Dämmstoffen (links) und mit Polyurethan mit Aerogelstruktur (rechts)..... | 93  |
| Abbildung 4.27: | Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von nicht begehbaren obersten Geschossdecken mit Mineralfaser- oder Polystyrol-Dämmstoffen .....                                                   | 94  |
| Abbildung 4.28: | Bandbreite der wirtschaftlich optimalen U-Werte bei der Dämmung von Kellerdecken mit Mineralfaser- oder Polystyrol-Dämmstoffen (links) und mit Polyurethan mit Aerogelstruktur (rechts) .....                      | 95  |
| Abbildung 4.29: | Sensitivität einer prozentualen Änderung der Berechnungsparameter auf die Änderung des kostenoptimalen U-Werts.....                                                                                                | 96  |
| Abbildung 4.30: | Kapitalwert der Gesamtkosten in Tausend Euro über 30 Jahre in Abhängigkeit von den U-Werten von Außenwand und Dach (kalk. Zins 0 %, Brennstoffkostenanstieg 3 % p.a.) .....                                        | 98  |
| Abbildung 4.31: | Kapitalwert der Gesamtkosten in Tausend Euro über 30 Jahre in Abhängigkeit von den U-Werten von Außenwand und Dach (kalk. Zins 2 %, Brennstoffkostenanstieg 0 % p.a.) .....                                        | 98  |
| Abbildung 5.1:  | Prozentuale Verteilung der Sanierungsarten Pinsel, konventionell und ambitioniert (entsprechend Sanierungstiefen) bei Ablauf der Nutzungsdauer eines Bauteils .....                                                | 101 |
| Abbildung 5.2:  | Anzahl der Wärmerückgewinnungsanlagen in Wohngebäuden .....                                                                                                                                                        | 102 |
| Abbildung 5.3:  | Entwicklung von Neubau- und Abrissrate für Wohngebäude im Trendszenario                                                                                                                                            | 103 |
| Abbildung 5.4:  | Entwicklung von Neubau- und Abrissrate für Nichtwohngebäude im Trendszenario .....                                                                                                                                 | 103 |
| Abbildung 5.5:  | Nutzwärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser im Trendszenario für Wohn- und Nichtwohngebäude .....                                                                                                                | 105 |
| Abbildung 5.6:  | Die Nutzwärmereduktion um 37 % führt zu einer erforderlichen Reduktion der Anlagenverluste und des Primärenergiefaktors um 68 %.....                                                                               | 105 |
| Abbildung 5.7:  | Heizwärmeverbrauch im Trendszenario nach Wohn-/Nichtwohngebäuden .....                                                                                                                                             | 106 |
| Abbildung 5.8:  | Vergleich mit den Trendergebnissen anderer Studien .....                                                                                                                                                           | 107 |
| Abbildung 5.9:  | Anteile der Sanierungskategorien im Szenario „engagierter Klimaschutz“ für die Bauteile Dach, Außenwand und Keller (Startjahr: 2011, 1. Stützjahr: 2020, 2. Stützjahr: 2030, 3. Stützjahr: 2050) .....             | 108 |
| Abbildung 5.10: | Anzahl der Wärmerückgewinnungsanlagen in Wohngebäuden .....                                                                                                                                                        | 109 |

|                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 5.11: Entwicklung von Neubau- und Abrissrate für Wohngebäude im Szenario „engagierter Klimaschutz“ .....                                                                           | 110 |
| Abbildung 5.12: Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Szenario „engagierter Klimaschutz“ für Wohn- und Nichtwohngebäude.....                                                    | 110 |
| Abbildung 5.13: Nutzwärmereduktion im Szenario „engagierter Klimaschutz“ .....                                                                                                               | 111 |
| Abbildung 5.14: Raumwärmeverbrauch im Szenario „engagierter Klimaschutz“ nach Wohn- und Nichtwohngebäuden .....                                                                              | 112 |
| Abbildung 5.15: Vergleich des Wärmeverbrauchs im Jahr 2050 mit Hocheffizienzszenarien anderer Studien .....                                                                                  | 113 |
| Abbildung 5.16: Variation der minimal erreichbaren U-Werte in der Sanierung und Rückwirkung auf den Verlauf der U-Werte (Beispiel: EFH_K, ambitionierte Sanierung der Kellerdecke) .....     | 114 |
| Abbildung 5.17: Sensitivität des minimal erreichbaren Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_{min}$ ) ..                                                                                          | 114 |
| Abbildung 5.18: Referenz-Sanierungstiefen im Szenario „engagierter Klimaschutz“ .....                                                                                                        | 115 |
| Abbildung 5.19: Sanierungstiefen im Szenario „engagierter Klimaschutz“ bei um 10 % erhöhter Sanierungstiefe“ .....                                                                           | 116 |
| Abbildung 5.20: Sanierungstiefen im Szenario „engagierter Klimaschutz“ bei um 10 % verminderter Sanierungstiefe.....                                                                         | 116 |
| Abbildung 5.21: Sensitivität der Sanierungstiefe .....                                                                                                                                       | 117 |
| Abbildung 5.22: Sensitivität der Sanierungstiefe und resultierende erforderliche Reduktion der Anlagenverluste .....                                                                         | 117 |
| Abbildung 5.23: Variation des Verbrauchsfaktors in Abhängigkeit des Raumwärmebedarfs .....                                                                                                   | 118 |
| Abbildung 5.24: Sensitivität des Rebound-Effekts .....                                                                                                                                       | 119 |
| Abbildung 5.25: Sensitivität des Rebound-Effekts und Auswirkungen auf die erforderlichen anlagenseitigen Einsparungen .....                                                                  | 120 |
| Abbildung 5.26: Entwicklung von Wohnflächen der Wohngebäude und Nutzflächen der Nichtwohngebäude .....                                                                                       | 122 |
| Abbildung 5.27: Nutzwärmebedarf für Warmwasser in Wohn- und Nichtwohngebäuden .....                                                                                                          | 122 |
| Abbildung 5.28: Sockelwert der Transmissionswärmeverluste an Bauteilflächen (blau) und Wärmebrücken (orange) für Wohngebäude ohne Berücksichtigung von Klimaerwärmung.....                   | 123 |
| Abbildung 5.29: Sockelwert der Transmissionswärmeverluste an Bauteilflächen (blau) und Wärmebrücken (orange) für Wohngebäude mit Berücksichtigung einer Klimaerwärmung von 1 K bis 2050..... | 124 |
| Abbildung 5.30: Sockel der Transmissionswärmeverluste des Gesamtgebäudebestands .....                                                                                                        | 125 |
| Abbildung 5.31: Entwicklung der Lüftungswärmeverluste im Bestand mit Berücksichtigung einer Klimaerwärmung um 1°C.....                                                                       | 126 |
| Abbildung 5.32: Summe der solaren und inneren Gewinne .....                                                                                                                                  | 127 |
| Abbildung 5.33: Flächenspezifische monatliche Gewinne und Verluste für das EFH_B im Jahr 2050 des Sockelszenarios.....                                                                       | 127 |
| Abbildung 5.34: Monatlicher Ausnutzungsgrad beispielhaft für den Gebäudetyp EFH_B mit Wärmerückgewinnungsanlage für das Jahr 2050 im Sockelszenario .....                                    | 128 |
| Abbildung 5.35: Entwicklung des Gesamtheizwärmebedarfssockels (nur Raumwärme) bei normgemäßer Anwendung des Ausnutzungsgrads der DIN V 4108-6.....                                           | 129 |
| Abbildung 5.36: Entwicklung des gesamten Nutzwärmebedarfs in der Sockelanalyse .....                                                                                                         | 130 |

|                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 5.37: Vergleich der Szenarien „Trend“, „engagierter Klimaschutz“ und „Sockelanalyse“                                                                              | 130 |
| Abbildung 5.38: Zusammensetzung des Heizwärmebedarfs (inkl. Warmwasser) der einzelnen positiv und negativ anzusetzenden Energiemengen .....                                 | 131 |
| Abbildung 5.39: Endwerte des Szenarios „engagierter Klimaschutz“ und der „Sockelanalyse“ für das Jahr 2050 .....                                                            | 132 |
| Abbildung 5.40: Vergleich der Szenarien „Trend“, „engagierter Klimaschutz“ und „Sockelanalyse“ im Hinblick auf das Klimaschutzziel der Primärenergieeinsparung um 80 %..... | 133 |

## Tabellenverzeichnis

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 3.1:  | Vergleich der Anzahl der Wohneinheiten nach Baualtersklasse .....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 25 |
| Tabelle 3.2:  | Vergleich der Berechnungsmethoden und deren Einfluss auf den spezifischen<br>Raumwärmebedarf (FFE, 2013) .....                                                                                                                                                                                                                                               | 26 |
| Tabelle 3.3:  | Bevölkerungsprognose des Statistischen Bundesamtes (destatis, 2009) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 32 |
| Tabelle 3.4:  | Entwicklung der Gesamtwohnfläche sowie der Pro-Kopf-Wohnfläche für die<br>kommenden Dekaden nach (Prognos et al., 2014) und (Zensus, 2011) .....                                                                                                                                                                                                             | 34 |
| Tabelle 3.5:  | Entwicklung der Gesamtfläche der thermischen Hülle aller Gebäude (WG und NWG)<br>unter den variierenden Randbedingungen Neubautätigkeit, Verteilung des Neubaus<br>auf Gebäudetypen und Verteilung des Abrisses auf Gebäudealter. Die gesamte<br>Wohn- bzw. Nutzfläche bleibt dabei für 2050 konstant und entspricht dem zuvor in<br>hergeleiteten Wert..... | 37 |
| Tabelle 3.6:  | Typologie der Nichtwohngebäude in GEMOD.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 44 |
| Tabelle 3.7:  | Verteilung der Gebäude auf die Baualtersklassen (BAK) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 46 |
| Tabelle 3.8:  | Aufteilung der Nichtwohngebäude auf die Baualtersklassen .....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 46 |
| Tabelle 3.9:  | U-Werte von Nichtwohngebäuden in Abhängigkeit der Baualtersklasse in GEMOD .....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 47 |
| Tabelle 3.10: | Herleitung der durchschnittlichen Personenanzahl und durchschnittlichen<br>Wohnfläche .....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 48 |
| Tabelle 3.11: | Warmwasserverbrauch in Nichtwohngebäuden .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 51 |
| Tabelle 3.12: | Flächenspezifischer Warmwasserverbrauch .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 51 |
| Tabelle 3.13: | Mindestluftwechselraten gemäß DIN EN 12831 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 52 |
| Tabelle 3.14: | Mittlere tägliche Luftwechselraten in Nichtwohngebäuden gem. DIN V 18599-10..                                                                                                                                                                                                                                                                                | 53 |
| Tabelle 3.15: | Auflistung aller betrachteten Studien zum Thema Verbrauchs-Bedarfsabgleich.....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 57 |
| Tabelle 3.16: | Vergleich der Verbrauchsfaktoren der verschiedenen Quellen .....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 62 |
| Tabelle 3.17: | Bevölkerungsanteil und Beschreibung der Milieus (Sinus Sociovision GmbH, 2009)                                                                                                                                                                                                                                                                               | 64 |
| Tabelle 3.18: | Milieuspezifisches Umweltverhalten, eigene Berechnung auf Basis (Sinus<br>Sociovision GmbH, 2009).....                                                                                                                                                                                                                                                       | 66 |
| Tabelle 4.1:  | Dämmstoffübersicht marktüblicher Dämmstoffe .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 69 |
| Tabelle 4.2:  | Dämmstoffübersicht marktüblicher Dämmstoffe .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 70 |
| Tabelle 4.3:  | Übersicht aller durch Extrapolation bisheriger gesetzlicher Vorgaben ermittelten<br>U-Werte im Jahr 2050 am Gebäudetyp Einfamilienhaus für die verschiedenen<br>Bauteile .....                                                                                                                                                                               | 74 |
| Tabelle 4.4:  | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen<br>günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen<br>Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von<br>zuvor ungedämmten Außenwänden mit konventionellen Dämmstoffen .....                                                         | 87 |
| Tabelle 4.5:  | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen<br>günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen<br>Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von<br>Außenwänden gemäß EnEV 2002 mit konventionellen Dämmstoffen .....                                                           | 88 |
| Tabelle 4.6:  | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen<br>günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen<br>Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von<br>Außenwänden mit Vakuumisolierpanelen (VIP) .....                                                                            | 89 |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 4.7:  | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Außenwänden mit Aerogel-Dämmplatten .....                                | 90  |
| Tabelle 4.8:  | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Steildächern mit Mineralwolle .....                                      | 90  |
| Tabelle 4.9:  | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Steildächern mit PU .....                                                | 91  |
| Tabelle 4.10: | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Flachdächern mit Mineralwolle .....                                      | 91  |
| Tabelle 4.11: | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von Flachdächern mit Aerogel-PU .....                                        | 92  |
| Tabelle 4.12: | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von begehbaren obersten Geschossdecken mit Mineralfaser oder EPS .....       | 92  |
| Tabelle 4.13: | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von begehbaren obersten Geschossdecken mit Aerogel-PU .....                  | 93  |
| Tabelle 4.14: | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung von nicht begehbaren obersten Geschossdecken mit Mineralfaser oder EPS ..... | 93  |
| Tabelle 4.15: | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung der Kellerdecke mit Mineralfaser oder EPS .....                              | 94  |
| Tabelle 4.16: | Aus ökonomischer Sicht minimaler U-Wert in 2050 unter für Dämmmaßnahmen günstigen (niedrige Zinsen, hohe Brennstoffkosten) und ungünstigen Randbedingungen (hohe Zinsen, niedrige Brennstoffkosten) für die Dämmung der Kellerdecke mit Aerogel-PU .....                                         | 94  |
| Tabelle 4.17: | Ausgangsparameter der Sensitivitätsanalyse .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 95  |
| Tabelle 4.18: | Kostenoptimale U-Werte ganzer Gebäude auf Basis des Heizwärmeverbrauchs .....                                                                                                                                                                                                                    | 97  |
| Tabelle 4.19: | Vergleich der ermittelten minimalen U-Werte in W/m <sup>2</sup> K und Festlegung der Werte für die Modellrechnung .....                                                                                                                                                                          | 99  |
| Tabelle 5.1:  | Sanierungsraten im Trendszenario .....                                                                                                                                                                                                                                                           | 101 |

|                                                                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 5.2: Prozentuale Verteilung der Gesamtneubaurate auf die Gebäudegrößen .....                                                                                                                                       | 103 |
| Tabelle 5.3: Prozentuale Verteilung der Gesamtabrissrate auf die Baualtersklassen im<br>Trendszenario .....                                                                                                                | 104 |
| Tabelle 5.4: Sanierungsraten im Szenario „engagierter Klimaschutz“ .....                                                                                                                                                   | 109 |
| Tabelle 0.1: Deutsche Wohngebäudetypologie (IWU, 2013) .....                                                                                                                                                               | 148 |
| Tabelle 0.2: Gruppierungsansätze des Nichtwohngebäude-Gesamtbestandes innerhalb der<br>einzelnen Studien .....                                                                                                             | 149 |
| Tabelle 0.3: Vergleich der Studien .....                                                                                                                                                                                   | 150 |
| Tabelle 0.4: Vergleich der Studien mit einer Ampelbewertung .....                                                                                                                                                          | 151 |
| Tabelle 0.5: Abzug des Wohngebäudeanteils .....                                                                                                                                                                            | 152 |
| Tabelle 0.6: Übersicht über die Zusammenführung der Eigenschaften .....                                                                                                                                                    | 153 |
| Tabelle 0.7: Prozentuale Verteilung der Nichtwohngebäude-Typen auf die Baualtersklassen A- .                                                                                                                               | 154 |
| Tabelle 0.8: Absolute Verteilung der Nichtwohngebäude-Typen auf die Baualtersklassen A-J<br>(Rechenbeispiel: $3,7 = 32,4 \times 2,92(2,92 + 10,57 + 12,26)$ , Zahlenwerte aus<br>den beiden obenstehenden Tabellen.) ..... | 155 |
| Tabelle 0.9: Gemittelte Höhen der Gebäudetypen mit zugehöriger Geschossigkeit .....                                                                                                                                        | 156 |
| Tabelle 0.10: Umrechnung der Nettogrundfläche in Bruttogrundfläche mit Hilfe eines<br>Korrekturfaktors .....                                                                                                               | 157 |
| Tabelle 0.11: Brutto-/Netto-Volumen und -Flächen der Nichtwohngebäude pro Gebäude oder<br>Geschoss .....                                                                                                                   | 158 |
| Tabelle 0.12: Flächenermittlung für Nichtwohngebäude .....                                                                                                                                                                 | 159 |
| Tabelle 0.13: Baukonstruktiv bedingte Altersklassen (Leibnitz-Institut, 2011) .....                                                                                                                                        | 160 |
| Tabelle 0.14: U-Werte von Nichtwohngebäuden in Abhängigkeit von der Baualtersklasse (Leibnitz-<br>Institut, 2011) .....                                                                                                    | 160 |

| Auswertung der Gebäude- und Wohnungszählung 2011                                                                                                                                                                                               |  | Baualtersklassen |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               | Summe | Anteil |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------|--------|
| Stichtag: 9.5.2011                                                                                                                                                                                                                             |  | bis 1860         | 1861 - 1918  | 1919 - 1948  | 1949 - 1957  | 1958 - 1968  | 1969 - 1978  | 1979 - 1983  | 1984 - 1994  | 1995 - 2001  | 2002 - 2009  |               |       |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                |  | A                | B            | C            | D            | E            | F            | G            | H            | I            | J            |               |       |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                |  | EFH A            | EFH B        | EFH C        | EFH D        | EFH E        | EFH F        | EFH G        | EFH H        | EFH I        | EFH J        |               |       |        |
| <b>EFH</b>                                                                                                                                                                                                                                     |  |                  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |       |        |
| Anzahl Wohngebäude in Tsd.                                                                                                                                                                                                                     |  | 330              | 966          | 1.131        | 859          | 1.509        | 1.507        | 704          | 1.160        | 1.035        | 775          | 9.976         | 55%   |        |
| Anzahl Wohnungen in Tsd.                                                                                                                                                                                                                       |  | 399              | 1.213        | 1.389        | 1.060        | 1.948        | 1.915        | 881          | 1.397        | 1.204        | 858          | 12.263        | 31%   |        |
| Wohnfläche in Mio. m²                                                                                                                                                                                                                          |  | 46               | 135          | 150          | 116          | 218          | 233          | 110          | 178          | 158          | 119          | 1.463         | 41%   |        |
| <b>RH</b>                                                                                                                                                                                                                                      |  |                  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |       |        |
| Anzahl Wohngebäude in Tsd.                                                                                                                                                                                                                     |  | 148              | 492          | 710          | 447          | 633          | 611          | 335          | 652          | 619          | 384          | 5.030         | 28%   |        |
| Anzahl Wohnungen in Tsd.                                                                                                                                                                                                                       |  | 181              | 617          | 840          | 546          | 749          | 685          | 374          | 722          | 674          | 409          | 5.796         | 15%   |        |
| Wohnfläche in Mio. m²                                                                                                                                                                                                                          |  | 19               | 62           | 82           | 52           | 76           | 79           | 45           | 85           | 80           | 52           | 633           | 18%   |        |
| <b>MFH</b>                                                                                                                                                                                                                                     |  |                  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |       |        |
| Anzahl Wohngebäude in Tsd.                                                                                                                                                                                                                     |  | 54               | 442          | 388          | 356          | 586          | 412          | 146          | 309          | 244          | 85           | 3.023         | 17%   |        |
| Anzahl Wohnungen in Tsd.                                                                                                                                                                                                                       |  | 214              | 2.177        | 1.911        | 2.003        | 3.348        | 2.313        | 852          | 1.826        | 1.390        | 461          | 16.495        | 42%   |        |
| Wohnfläche in Mio. m²                                                                                                                                                                                                                          |  | 16               | 163          | 129          | 125          | 225          | 169          | 64           | 133          | 104          | 39           | 1.168         | 33%   |        |
| <b>GMH</b>                                                                                                                                                                                                                                     |  |                  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |       |        |
| Anzahl Wohngebäude in Tsd.                                                                                                                                                                                                                     |  | 0,6              | 28,7         | 7,4          | 17,3         | 34,0         | 50,1         | 15,0         | 28,7         | 20,9         | 7,6          | 210           | 1%    |        |
| Anzahl Wohnungen in Tsd.                                                                                                                                                                                                                       |  | 11               | 526          | 126          | 308          | 818          | 1.366        | 356          | 605          | 408          | 151          | 4.674         | 12%   |        |
| Wohnfläche in Mio. m²                                                                                                                                                                                                                          |  | 0,7              | 35,8         | 7,9          | 17,0         | 47,1         | 86,7         | 21,9         | 34,8         | 25,5         | 10,4         | 288           | 8%    |        |
| <b>Anzahl Wohngebäude in Tsd.</b>                                                                                                                                                                                                              |  | <b>533</b>       | <b>1.929</b> | <b>2.236</b> | <b>1.679</b> | <b>2.762</b> | <b>2.580</b> | <b>1.200</b> | <b>2.150</b> | <b>1.919</b> | <b>1.251</b> | <b>18.239</b> |       |        |
| <b>Anteil</b>                                                                                                                                                                                                                                  |  | <b>3%</b>        | <b>11%</b>   | <b>12%</b>   | <b>9%</b>    | <b>15%</b>   | <b>14%</b>   | <b>7%</b>    | <b>12%</b>   | <b>11%</b>   | <b>7%</b>    |               |       |        |
| <b>Anzahl Wohnungen in Tsd.</b>                                                                                                                                                                                                                |  | <b>806</b>       | <b>4.533</b> | <b>4.265</b> | <b>3.915</b> | <b>6.863</b> | <b>6.279</b> | <b>2.463</b> | <b>4.550</b> | <b>3.675</b> | <b>1.880</b> | <b>39.228</b> |       |        |
| <b>Anteil</b>                                                                                                                                                                                                                                  |  | <b>2%</b>        | <b>12%</b>   | <b>11%</b>   | <b>10%</b>   | <b>17%</b>   | <b>16%</b>   | <b>6%</b>    | <b>12%</b>   | <b>9%</b>    | <b>5%</b>    |               |       |        |
| <b>Wohnfläche in Mio. m²</b>                                                                                                                                                                                                                   |  | <b>82</b>        | <b>396</b>   | <b>370</b>   | <b>309</b>   | <b>567</b>   | <b>569</b>   | <b>240</b>   | <b>431</b>   | <b>368</b>   | <b>220</b>   | <b>3.552</b>  |       |        |
| <b>Anteil</b>                                                                                                                                                                                                                                  |  | <b>2%</b>        | <b>11%</b>   | <b>10%</b>   | <b>9%</b>    | <b>16%</b>   | <b>16%</b>   | <b>7%</b>    | <b>12%</b>   | <b>10%</b>   | <b>6%</b>    |               |       |        |
| Gewählte Zuordnung: EFH: freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser; RH: Ein-/Zweifamilienhäuser als Doppelhaushälfte, Reihenhauser oder sonstiger Gebäudetyp<br>MFH: Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen, GMH: Mehrfamilienhäuser ab 13 Wohnungen |  |                  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |       |        |
| Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf Wohngebäude (ohne Wohnheime, ohne "sonstige Gebäude mit Wohnraum", ohne "bewohnte Unterkünfte")                                                                                                   |  |                  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |       |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                |  |                  |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |       |        |

Tabelle 0.1: Deutsche Wohngebäudetypologie (IWU, 2013)

| Nr. | Fraunhofer ISI et al., 2013      | Nr.  | Leibnitz-Institut, 2011 16/2011 | Nr. | Leibnitz-Institut, 2013                      | Nr. | Deutsches Institut für Normung, 2011                  |
|-----|----------------------------------|------|---------------------------------|-----|----------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------|
| 1   | Baugewerbe                       | 1    | Bildungsgebäude                 | 1   | Bildung                                      | 1   | Bürogebäude                                           |
| 2   | Büroähnliche Betriebe            | 1.1  | Schulen                         | 1.1 | Allgemeinbildende Schulen                    | 2   | Bettzimmer/Krankenhaus                                |
| 3   | Herstellungsbetriebe             | 1.2  | Kindertagesstätte               | 1.2 | Hochschulen und Forschung                    | 3   | Schule ohne Duschen                                   |
| 4   | Handel                           | 1.3  | Weiterbildungsstätten           | 1.3 | Kindertagesstätten                           | 4   | Schule mit Duschen                                    |
| 5   | Krankenhäuser, Schulen, Bäder    | 1.4  | Berufsschulen                   | 2   | Büro und Verwaltung                          | 5   | Einzelhandel/ Kaufhaus                                |
| 5.1 | Krankenhäuser                    | 1.5  | Hochschulen                     | 2.1 | Regierungs- und Gerichtsgebäude              | 6   | Werkstatt, Industriebetrieb (für Waschen und Duschen) |
| 5.2 | Schulen                          | 2    | Büro-/Verwaltungsgebäude        | 2.2 | Verwaltungs-, Polizei- und Feuerwehrgebäude  | 7   | Hotel einfach                                         |
| 5.3 | Bäder                            | 2.1  | Banken                          | 2.3 | Allgemeine Bürogebäude                       | 8   | Hotel mittel                                          |
| 6   | Beherbergung, Gaststätten, Heime | 2.2  | Versicherungen                  | 3   | Gewerbe und Industrie                        | 9   | Hotel Luxus                                           |
| 7   | Nahrungsmittelgewerbe            | 2.3  | Regierungs- und Gerichtsgebäude | 3.1 | Fabrikgebäude                                | 10  | Restaurant, Gaststätte                                |
| 7.1 | Backgewerbe                      | 2.4  | Ämter                           | 3.2 | Lagergebäude                                 | 11  | Heim                                                  |
| 7.2 | Fleischereien                    | 3    | Fabrikgebäude                   | 3.3 | Werkstattgebäude                             | 12  | Sportanlagen mit Dusche                               |
| 7.3 | Rest. Nahrungsmittelgewerbe      | 3.1  | Großunternehmen                 | 3.4 | Allgemeine Industrie- und Gewerbegebäude     | 13  | Gewerbeküchen, Kantine                                |
| 8   | Wäschereien                      | 3.2  | Fabrikationshallen              | 4   | Heilbehandlung                               | 14  | Bäckerei                                              |
| 9   | Landwirtschaft                   | 4    | Werkstätten                     | 4.1 | Krankenhäuser, Kliniken                      | 15  | Friseure                                              |
| 10  | Gartenbau                        | 4.1  | Handwerk                        | 4.2 | Praxisgebäude und Gesundheitseinrichtungen   | 16  | Fleischerei mit Produktion                            |
| 11  | Flughäfen                        | 4.2  | Gewerbe                         | 5   | Handel und Dienstleistung                    | 17  | Wäscherei                                             |
| 12  | Textil, Bekleidung, Spedition    | 5    | Heilbehandlungsgebäude          | 5.1 | Kaufhäuser                                   | 18  | Brauerei                                              |
|     |                                  | 5.1  | Krankenhäuser                   | 5.2 | Einkaufszentren                              | 19  | Molkerei                                              |
|     |                                  | 5.2  | Polikliniken                    | 5.3 | Allgemeine Verkaufsgebäude                   | 20  | Saunabereich                                          |
|     |                                  | 6    | Handelsgebäude                  | 6   | Sport                                        | 21  | Labor                                                 |
|     |                                  | 6.1  | Shoppingcenter                  | 6.1 | Sporthallen                                  | 22  | Fitnessraum                                           |
|     |                                  | 6.2  | Lebensmittel                    | 6.2 | Schwimmbädern                                |     |                                                       |
|     |                                  | 6.3  | Non-Food                        | 6.3 | Allgemeine Sportbauten                       |     |                                                       |
|     |                                  | 7    | Lagerhallen                     | 7   | Kultur                                       |     |                                                       |
|     |                                  | 7.1  | Zentrallager                    | 7.1 | Museen, Bibliotheken und Ausstellungsgebäude |     |                                                       |
|     |                                  | 7.2  | Versandlager                    | 7.2 | Oper, Theater und Veranstaltungshallen       |     |                                                       |
|     |                                  | 8    | Sporthallen                     | 7.3 | Gebäude für kulturelle Zwecke                |     |                                                       |
|     |                                  | 9    | Schwimmbädern                   | 8   | Beherbergung und Gastronomie                 |     |                                                       |
|     |                                  | 10   | Kulturgebäude                   | 8.1 | Hotels und Pensionen                         |     |                                                       |
|     |                                  | 10.1 | Oper/Theater/Konzerte           | 8.2 | Gaststätten und Restaurants                  |     |                                                       |
|     |                                  | 10.2 | Kinos                           |     |                                              |     |                                                       |
|     |                                  | 10.3 | Ausstellungsgebäude             |     |                                              |     |                                                       |
|     |                                  | 11   | Beherbergungsgebäude            |     |                                              |     |                                                       |
|     |                                  |      | Hotels                          |     |                                              |     |                                                       |
|     |                                  |      | Gaststätten freistehend         |     |                                              |     |                                                       |

Tabelle 0.2: Gruppierungsansätze des Nichtwohngebäude-Gesamtbestandes innerhalb der einzelnen Studien

| Gebäudenutzungstyp für NWG       | Gebäudeanzahl (Mio. Geb.)   | Nutzfläche (Mio. m <sup>2</sup> ) | BAK                         | Nutzfläche (Mio. m <sup>2</sup> ) nach BAK | Endenergiebedarf (kWh/m <sup>2</sup> ) | Bauteilflächen (m <sup>2</sup> ) | U-Wert (W/m <sup>2</sup> K) | Geschossigkeit |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------|
| Baugewerbe                       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Baugewerbe                       |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Bilder                           | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Sport                            | Leibniz-Institut, 2013      | Leibniz-Institut, 2014            |                             |                                            |                                        |                                  |                             |                |
| Beherbergung und Gastronomie     | Leibniz-Institut, 2013      | Leibniz-Institut, 2013            |                             |                                            |                                        |                                  |                             |                |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Bildung                          | Leibniz-Institut, 2013      | Leibniz-Institut, 2013            |                             |                                            |                                        |                                  |                             |                |
| Schulen                          | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2014 | Fraunhofer ISI et al., 2015                | Fraunhofer ISI et al., 2016            |                                  |                             |                |
| Büro und Verwaltung              | Leibniz-Institut, 2013      | Leibniz-Institut, 2013            |                             |                                            |                                        |                                  |                             |                |
| Büroähnliche Betriebe            | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Büroähnliche Betriebe            |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Einzelhandel                     |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Großhandel                       |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Handel                           | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Handel Sonstige                  |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Handel und Dienstleistung        | Leibniz-Institut, 2013      | Leibniz-Institut, 2013            |                             |                                            | Leibniz-Institut, 2013                 |                                  |                             |                |
| Flughäfen                        |                             |                                   |                             |                                            |                                        |                                  |                             |                |
| Gartenbau                        |                             |                                   |                             |                                            |                                        |                                  |                             |                |
| Gartenbau                        |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Gewerbe und Industrie            | Leibniz-Institut, 2013      | Leibniz-Institut, 2013            |                             |                                            | Leibniz-Institut, 2013                 |                                  |                             |                |
| Herstellungsbetriebe             | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Herstellungsbetriebe             |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Krankenhäuser                    | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Heilbehandlung                   | Leibniz-Institut, 2013      | Leibniz-Institut, 2013            |                             |                                            |                                        |                                  |                             |                |
| Krankenhäuser, Schulen, Bäder    | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Kultur                           | Leibniz-Institut, 2013      | Leibniz-Institut, 2013            |                             |                                            |                                        |                                  |                             |                |
| Landwirtschaft                   |                             |                                   |                             |                                            |                                        |                                  |                             |                |
| Landwirtschaft                   |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Nahrungsmittelgewerbe            | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Nahrungsmittelgewerbe            |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Rest. Nahrungsmittelgewerbe      | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Spezial, Lagererei               |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Textil, Bekleidung, Leder        |                             | dena, 2013                        |                             |                                            | dena, 2013                             |                                  |                             |                |
| Textil, Bekleidung, Spedition    | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |
| Wäschereien                      | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013       | Fraunhofer ISI et al., 2013 | Fraunhofer ISI et al., 2013                | Fraunhofer ISI et al., 2013            |                                  |                             |                |

Tabelle 0.3: Vergleich der Studien

| Gebäudenutzungstyp für NWG       | Fraunhofer ISI et al., 2013 |                |                            |  | Leibnitz-Institut, 2013 |                |                |  | dena, 2013 |                |                            | Zusammenfassung |                                             |                  |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------------------|--|-------------------------|----------------|----------------|--|------------|----------------|----------------------------|-----------------|---------------------------------------------|------------------|
|                                  | Anzahl                      | NGF in Mio. m2 | Endenergieverbrauch in TWh |  | Anzahl                  | NGF in Mio. m2 | Geschossigkeit |  | Anzahl     | NGF in Mio. m2 | Endenergieverbrauch in TWh | Anzahl          | NGF                                         | Endenergiebedarf |
| Baugewerbe                       | 656.000                     | 131            | 16,6                       |  |                         |                |                |  |            | 101            | 13                         |                 | dena und Fraunhofer NWG mitt                |                  |
| Baugewerbe                       |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Bäder                            | 5.000                       | 36             | 6,6                        |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Leibnitz-Institut übernehmen                |                  |
| Sport                            |                             |                |                            |  | 113.825                 | 55             | 1,0            |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Beherbergung und Gastronomie     |                             |                |                            |  | 147.766                 | 83             | 2,5            |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime | 868.000                     | 321            | 66,4                       |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Fraunhofer und Leibnitz-Institut mitteln    |                  |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            | 168            | 44                         |                 |                                             |                  |
| Bildung                          |                             |                |                            |  | 140.663                 | 218            | 2,3            |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Schulen                          | 81.000                      | 81             | 24,4                       |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Fraunhofer und Leibnitz-Institut mitteln    |                  |
| Büro und Verwaltung              |                             |                |                            |  | 294.557                 | 266            | 3,0            |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Büroähnliche Betriebe            | 3.336.000                   | 545            | 94                         |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Fraunhofer und Leibnitz-Institut mitteln    |                  |
| Büroähnliche Betriebe            |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            | 407            | 76                         |                 |                                             |                  |
| Einzelhandel                     |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            | 186            | 37                         |                 |                                             |                  |
| Großhandel                       |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            | 158            | 13                         |                 |                                             |                  |
| Handel                           | 1.441.000                   | 454            | 65,0                       |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Handel Sonstige                  |                             |                |                            |  | 304.126                 | 173            | 2,0            |  |            | 10             | 3                          |                 | Fraunhofer und Leibnitz-Institut mitteln    |                  |
| Handel und Dienstleistung        |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            | 354            |                            |                 | Allerdings Summe von dena mit Fraunhofer äh |                  |
| Flughäfen                        |                             |                | 3,9                        |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Fraunhofer !                                |                  |
| Gartenbau                        |                             |                | 5,2                        |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Gartenbau                        |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            | 28             | 1                          |                 |                                             |                  |
| Gewerbe und Industrie            |                             |                |                            |  | 1.779.707               | 577            | 1,0            |  |            |                |                            |                 | Ergbnis minus mit Gewerbe-Typologien        |                  |
| Herstellungsbetriebe             | 266.000                     | 93             | 12,1                       |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Fraunhofer                                  |                  |
| Herstellungsbetriebe             |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            | 85             | 8                          |                 |                                             |                  |
| Krankenhäuser                    | 17.000                      | 17             | 17,8                       |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Heilbehandlung                   |                             |                |                            |  | 122.418                 | 82             | 3,0            |  |            |                |                            |                 | Fraunhofer                                  |                  |
| Krankenhäuser, Schulen, Bäder    | 102.000                     | 287            | 16,3                       |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Kultur                           |                             |                |                            |  | 83.176                  | 70             | 2,3            |  |            |                |                            |                 | Leibnitz-Institut                           |                  |
| Landwirtschaft                   |                             |                | 47                         |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | dena und statistika daten                   |                  |
| Landwirtschaft                   |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            | 254            | 20                         |                 |                                             |                  |
| Nahrungsmittelgewerbe            | 33.000                      | 11             | 0,9                        |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | 0,9 oder 1                                  |                  |
| Nahrungsmittelgewerbe            |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 |                                             |                  |
| Rest. Nahrungsmittelgewerbe      | 4.000                       | 5,0            | 0,4                        |  |                         |                |                |  |            | 8,5            | 1,0                        |                 | Fraunhofer                                  |                  |
| Fleischerei                      | 14.000                      | 3,0            | 0,9                        |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | sonst nichts vergleichbar                   |                  |
| Spedition, Lagerel               |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | dena?                                       |                  |
| Textil, Bekleidung, Leder        |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            | 78             | 3,0                        |                 |                                             |                  |
| Textil, Bekleidung, Spedition    | 213.000                     | 94             | 4,3                        |  |                         |                |                |  |            | 2,1            | 0,5                        |                 | Fraunhofer                                  |                  |
| Wäschereien                      | 15.000                      | 2,0            | 1,0                        |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Fraunhofer                                  |                  |
|                                  |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Fraunhofer                                  |                  |
|                                  |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Zahlen eindeutig vorhanden                  |                  |
|                                  |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Zahlen nicht eindeutig                      |                  |
|                                  |                             |                |                            |  |                         |                |                |  |            |                |                            |                 | Zahlen nicht vorhanden                      |                  |

Tabelle 0.4: Vergleich der Studien mit einer Ampelbewertung

| Gebäudenutzungstyp für NWG       | Fraunhofer ISI et al., 2013 |                |                  |                |                       |                               |              | Leibnitz-Institut, 2013    |           |                |              |                | dena, 2013 |                |                            |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------|-----------|----------------|--------------|----------------|------------|----------------|----------------------------|
|                                  | Anzahl                      | Anzahl Wohnung | Anzahl - Wohnung | NGF in Mio. m2 | NGF(Wohnb) in Mio. m2 | NGF - NGF (Wohnb.) in Mio. m2 | NGF / Anzahl | Endenergieverbrauch in TWh | Anzahl    | NGF in Mio. m2 | NGF / Anzahl | Geschossigkeit | Anzahl     | NGF in Mio. m2 | Endenergieverbrauch in TWh |
| Baugewerbe                       | 656.000                     | 254.000        | 402.000          | 131            | 39                    | 92                            | 229          | 17                         |           |                |              |                |            |                |                            |
| Baugewerbe                       |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 101            | 13                         |
| Bäder                            | 5.000                       | 0              | 5.000            | 36             |                       | 36                            | 7.200        | 7                          |           |                |              |                |            |                |                            |
| Sport                            |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            |                |                            |
| Beherbergung und Gastronomie     |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            |                |                            |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime | 868.000                     | 445.000        | 423.000          | 321            | 84                    | 237                           | 560          | 66                         |           |                |              |                |            |                |                            |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 168            | 44                         |
| Bildung                          |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            |                |                            |
| Schulen                          | 81.000                      | 0              | 81.000           | 198            |                       | 198                           | 2.444        | 24                         |           | 218            | 1.550        | 2              |            |                |                            |
| Büro und Verwaltung              |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            |                |                            |
| Büroähnliche Betriebe            | 1.336.000                   | 2.256.000      | 1.080.000        | 545            | 179                   | 366                           | 339          | 94                         |           | 266            | 903          | 3              |            |                |                            |
| Büroähnliche Betriebe            |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 407            | 76                         |
| Einzelhandel                     |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 186            | 37                         |
| Großhandel                       |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 158            | 13                         |
| Handel                           | 1.441.000                   | 772.000        | 669.000          | 454            | 140                   | 314                           | 469          | 65                         |           |                |              |                |            | 10             | 3                          |
| Handel Sonstige                  |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 354            | 53                         |
| Handel und Dienstleistung        |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            |                |                            |
| Flughäfen                        |                             |                |                  |                |                       |                               |              | 4                          |           |                |              |                |            |                |                            |
| Gartenbau                        |                             | 0              |                  |                |                       |                               |              | 5                          |           |                |              |                |            |                |                            |
| Gartenbau                        |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 28             | 1                          |
| Gewerbe und Industrie            |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            |                |                            |
| Herstellungsbetriebe             | 296.000                     | 66.000         | 200.000          | 93             | 7                     | 86                            | 430          | 12                         |           | 577            | 324          | 1              |            |                |                            |
| Herstellungsbetriebe             |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 85             | 8                          |
| Krankenhäuser                    | 17.000                      | 0              | 17.000           | 59             |                       | 53                            | 3.118        | 18                         |           |                |              |                |            |                |                            |
| Heilbehandlung                   |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           | 82             | 670          | 3              |            |                |                            |
| Krankenhäuser, Schulen, Bäder    | 102.000                     | 0              | 102.000          | 287            | 1                     | 286                           | 2.804        | 16                         |           |                |              |                |            |                |                            |
| Kultur                           |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           | 70             | 842          | 2              |            |                |                            |
| Landwirtschaft                   |                             |                |                  |                |                       |                               |              | 47                         |           |                |              |                |            | 848            |                            |
| Landwirtschaft                   |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                | 299.000    | 254            | 20                         |
| Nahrungsmittelgewerbe            | 335.000                     | 19.000         | 14.000           | 11             | 4                     | 7                             | 500          | 1                          |           |                |              |                |            | 9              | 1                          |
| Nahrungsmittelgewerbe            |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            |                |                            |
| Rest. Nahrungsmittelgewerbe      | 4.000                       | 1.000          | 3.000            | 5              | 1                     | 4                             | 1.333        | 0                          |           |                |              |                |            |                |                            |
| Fleischerei                      | 14.000                      | 7.000          | 7.000            | 3              | 2                     | 1                             | 143          | 1                          |           |                |              |                |            |                |                            |
| Spezial, Lagerlei                |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 78             | 3                          |
| Textil, Bekleidung, Leder        |                             |                |                  |                |                       |                               |              |                            |           |                |              |                |            | 2              | 1                          |
| Textil, Bekleidung, Spedition    | 213.000                     | 25.000         | 188.000          | 94             | 20                    | 74                            | 394          | 4                          |           |                |              |                |            |                |                            |
| Wäschereien                      | 15.000                      | 9.000          | 6.000            | 2              | 1                     | 1                             | 167          | 1                          |           |                |              |                |            |                |                            |
| Summe (als Vergleichswert)       | 7.051.000                   |                | 3.197.000        | 2.233          |                       | 1.755                         |              |                            | 2.986.238 | 1.524          |              |                |            | 2.688          |                            |

Tabelle 0.5: Abzug des Wohngebäudeanteils

| Gebäudenutzungstyp für NWG                   | Zusammenstellung der Daten |                           |                                     |                          |                  | Fraunhofer ISI et al., 2013 |                  |                   |                          |                          | Leibniz-Institut, 2011 |        |                   |                |                     | dens, 2013 |                                        |
|----------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------|-------------------|----------------|---------------------|------------|----------------------------------------|
|                                              | Anzahl der NWG             | NGF der NWG<br>in Mio. m² | Endenergie-<br>verbrauch NWG<br>TWh | Wohng.<br>zu NWG<br>in % | Anzahl<br>Wohng. | Anzahl<br>Wohng.            | Anzahl<br>Wohng. | NGF<br>in Mio. m² | NGF-Wohnf.<br>in Mio. m² | NGF-Wohnf.<br>in Mio. m² | NGF<br>in Mio. m²      | Anzahl | NGF<br>in Mio. m² | NGF/<br>Anzahl | Geschossig-<br>keit | Anzahl     | Endenergie-<br>verbrauch<br>in Mio. m² |
| Baugewerbe                                   | 402.000                    | 97                        | 12                                  | 61                       | 656.000          | 254.000                     | 402.000          | 331               | 39                       | 92                       | 229                    | 17     |                   |                |                     |            |                                        |
| Bäder                                        |                            |                           |                                     |                          | 5.000            | 0                           | 5.000            | 36                |                          | 36                       | 7200                   |        |                   |                |                     |            | 101                                    |
| Sport                                        | 113.825                    | 55                        | 0                                   |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 13                                     |
| Beherbergung und Gastronomie                 |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            |                                        |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime             | 423.000                    | 237                       | 32                                  | 49                       | 868.000          | 245.000                     | 423.000          | 321               | 84                       | 237                      | 560                    | 66     |                   |                | 3                   |            |                                        |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime             |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        | 113.825           | 55             | 483                 | 1,0        |                                        |
| Bildung                                      | 110.832                    | 156                       | 33                                  |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        | 147.766           | 83             | 562                 |            |                                        |
| Schulen                                      |                            |                           |                                     | 0                        | 84.000           | 0                           | 81.000           | 306               |                          | 198                      | 2444                   | 24,4   | 140.663           | 218            | 1550                | 2,3        | 168                                    |
| Büro und Verwaltung                          |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            |                                        |
| Büroähnliche Betriebe                        | 687.279                    | 316                       | 19                                  | 30                       | 3.336.000        | 2.256.000                   | 1.080.000        | 645               | 179                      | 366                      | 339                    | 94     | 294.557           | 266            | 903                 | 3          |                                        |
| Büroähnliche Betriebe                        |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 407                                    |
| Einzelhandel                                 |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 186                                    |
| Großhandel                                   |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 37                                     |
| Handel                                       | 486.563                    | 244                       | 22                                  | 46                       | 1.441.000        | 772.000                     | 669.000          | 484               | 140                      | 314                      | 469                    | 65     |                   |                |                     |            | 158                                    |
| Handel Sonstige                              |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 13                                     |
| Handel und Dienstleistung                    |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 10                                     |
| Flughäfen                                    |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        | 304.126           | 173            | 569                 | 2,0        | 354                                    |
| Gartenbau                                    |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 53                                     |
| Gartenbau                                    |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            |                                        |
| Gewerbe und Industrie                        | siehe unten                |                           |                                     | 75                       | 266.000          | 66.000                      | 200.000          | 83                | 7                        | 86                       | 430                    | 12,1   | 1.779.707         | 577            | 324                 | 1          | 28                                     |
| Herstellungsbetriebe                         | 200.000                    | 86                        | 9                                   |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 85                                     |
| Herstellungsbetriebe                         |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 8                                      |
| Krankenhäuser                                | 17.000                     | 53                        | 18                                  |                          | 17.000           | 0                           | 17.000           | 53                |                          | 53                       | 3118                   | 18     |                   |                |                     |            |                                        |
| Heilberufung                                 |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        | 122.418           | 82             | 670                 | 3          |                                        |
| Krankenhäuser, Schulen, Bäder                |                            |                           |                                     |                          | 302.000          | 0                           | 102.000          | 297               | 1                        | 286                      | 2904                   | 16     |                   |                |                     |            |                                        |
| Kultur                                       | 83.176                     | 70                        |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        | 83.176            | 70             | 842                 | 2,3        |                                        |
| Landwirtschaft                               |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            |                                        |
| Landwirtschaft                               | 299.000                    | 254                       | 20                                  |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 848                                    |
| Nahrungsmittelgewerbe                        | 14.000                     | 7                         | 0                                   | 42                       | 33.000           | 19.000                      | 14.000           | 13                | 4                        | 7                        | 500                    | 0,9    |                   |                |                     | 290.000    | 254                                    |
| Nahrungsmittelgewerbe                        |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            |                                        |
| Rest. Nahrungsmittelgewerbe                  |                            |                           |                                     |                          | 4.000            | 1.000                       | 3.000            | 5                 | 1                        | 4                        | 1333                   | 0,4    |                   |                |                     | 9          | 1                                      |
| Fleischerei                                  |                            |                           |                                     |                          | 14.000           | 7.000                       | 7.000            | 3                 | 2                        | 1                        | 143                    | 0,9    |                   |                |                     |            |                                        |
| Spezialität, Lager                           |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            |                                        |
| Textil, Bekleidung, Leder                    |                            |                           |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            | 78                                     |
| Textil, Bekleidung, Speziation               | 188.000                    | 74                        | 4                                   | 88                       | 213.000          | 29.000                      | 188.000          | 94                | 20                       | 74                       | 394                    | 4      |                   |                |                     | 2          | 1                                      |
| Wäschereien                                  | 6.000                      | 1                         | 0                                   | 40                       | 15.000           | 9.000                       | 6.000            | 2                 | 1                        | 1                        | 167                    | 1      |                   |                |                     |            |                                        |
| Summe (ohne Typologie Gewerbe und Industrie) | 3.030.674                  | 1.649                     |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            |                                        |
| Summe Gewerbe Gebäude                        | 1.290.563                  | 507                       |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            |                                        |
| Berechnung Typologie Industrie               | 489.144                    | 698                       |                                     |                          |                  |                             |                  |                   |                          |                          |                        |        |                   |                |                     |            |                                        |
| SUMME GESAMT                                 | 3.519.818                  | 2.346                     |                                     |                          |                  |                             | 3.197.000        |                   |                          | 1.755                    |                        |        | 2.986.238         | 1.524          |                     |            | 2.688                                  |

Tabelle 0.6: Übersicht über die Zusammenführung der Eigenschaften

| BAK   | Baujahre      | Bau-<br>gewerbe | Sport | Beher-<br>bergung,<br>Gast-<br>stätten,<br>Heime | Bildung | Büro-<br>ähnliche<br>Betriebe | Handel | Industrie | Herstell-<br>ungs-<br>betriebe | Kranken-<br>häuser | Kultur | Landwirt-<br>schaft | Nah-<br>rungsmittel-<br>gewerbe | Textil,<br>Bekleid-<br>ung, Spe-<br>dition | Wäscher-<br>eien |
|-------|---------------|-----------------|-------|--------------------------------------------------|---------|-------------------------------|--------|-----------|--------------------------------|--------------------|--------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|------------------|
| A     | bis 1859      | 3,7             | 3,7   | 4,4                                              | 3,7     | 3,7                           | 3,5    | 3,5       | 3,5                            | 4,6                | 3,7    | 3,5                 | 3,5                             | 3,5                                        | 3,5              |
| B     | 1860 bis 1918 | 13,3            | 13,3  | 15,8                                             | 13,3    | 13,3                          | 12,5   | 12,5      | 12,5                           | 16,6               | 13,3   | 12,5                | 12,5                            | 12,5                                       | 12,5             |
| C     | 1919 bis 1948 | 15,4            | 15,4  | 18,4                                             | 15,4    | 15,4                          | 14,5   | 14,5      | 14,5                           | 19,2               | 15,4   | 14,5                | 14,5                            | 14,5                                       | 14,5             |
| D     | 1949 bis 1957 | 5,5             | 5,5   | 6,9                                              | 5,5     | 5,5                           | 5,3    | 5,3       | 5,3                            | 6,1                | 5,5    | 5,3                 | 5,3                             | 5,3                                        | 5,3              |
| E     | 1958 bis 1968 | 9,0             | 9,0   | 11,4                                             | 9,0     | 9,0                           | 8,7    | 8,7       | 8,7                            | 9,9                | 9,0    | 8,7                 | 8,7                             | 8,7                                        | 8,7              |
| F     | 1969 bis 1978 | 8,4             | 8,4   | 10,7                                             | 8,4     | 8,4                           | 8,2    | 8,2       | 8,2                            | 9,3                | 8,4    | 8,2                 | 8,2                             | 8,2                                        | 8,2              |
| G     | 1979 bis 1983 | 12,7            | 12,7  | 10,7                                             | 12,7    | 12,7                          | 10,6   | 10,6      | 10,6                           | 9,0                | 12,7   | 10,6                | 10,6                            | 10,6                                       | 10,6             |
| H     | 1984 bis 1994 | 22,7            | 22,7  | 19,2                                             | 22,7    | 22,7                          | 19,0   | 19,0      | 19,0                           | 16,2               | 22,7   | 19,0                | 19,0                            | 19,0                                       | 19,0             |
| I     | 1995 bis 2001 | 5,6             | 5,6   | 1,5                                              | 5,6     | 5,6                           | 10,7   | 10,7      | 10,7                           | 5,5                | 5,6    | 10,7                | 10,7                            | 10,7                                       | 10,7             |
| J     | 2002 bis 2009 | 3,7             | 3,7   | 1,0                                              | 3,7     | 3,7                           | 7,0    | 7,0       | 7,0                            | 3,6                | 3,7    | 7,0                 | 7,0                             | 7,0                                        | 7,0              |
| Summe |               | 100             | 100   | 100                                              | 100     | 100                           | 100    | 100       | 100                            | 100                | 100    | 100                 | 100                             | 100                                        | 100              |

Tabelle 0.7: Prozentuale Verteilung der Nichtwohngebäude-Typen auf die Baualterklassen A-

| BAK   | Baujahre      | Bau-<br>gewerbe | Sport   | Beher-<br>bergung,<br>Gast-<br>stätten,<br>Heime | Bildung | Büro-<br>ähnliche<br>Betriebe | Handel  | Industrie | Herstell-<br>ungs-<br>betriebe | Kranken-<br>häuser | Kultur | Landwirt-<br>schaft | Nah-<br>rungsmittel-<br>gewerbe | Textil,<br>Bekleid-<br>ung, Spe-<br>dition | Wäsche-<br>reien |
|-------|---------------|-----------------|---------|--------------------------------------------------|---------|-------------------------------|---------|-----------|--------------------------------|--------------------|--------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|------------------|
| A     | bis 1859      | 14.770          | 4.182   | 18.515                                           | 4.072   | 25.251                        | 16.828  | 16.918    | 6.917                          | 779                | 3.056  | 10.341              | 484                             | 6.502                                      | 208              |
| B     | 1860 bis 1918 | 53.465          | 15.138  | 67.023                                           | 14.740  | 91.406                        | 60.917  | 61.240    | 25.040                         | 2.819              | 11.062 | 37.434              | 1.753                           | 23.537                                     | 751              |
| C     | 1919 bis 1948 | 62.013          | 17.559  | 77.739                                           | 17.097  | 106.021                       | 70.657  | 71.031    | 29.043                         | 3.270              | 12.831 | 43.419              | 2.033                           | 27.301                                     | 871              |
| D     | 1949 bis 1957 | 22.022          | 6.236   | 29.345                                           | 6.072   | 37.650                        | 25.840  | 25.977    | 10.621                         | 1.029              | 4.557  | 15.879              | 743                             | 9.984                                      | 319              |
| E     | 1958 bis 1968 | 36.202          | 10.250  | 48.240                                           | 9.981   | 61.892                        | 42.477  | 42.703    | 17.460                         | 1.691              | 7.490  | 26.103              | 1.222                           | 16.413                                     | 524              |
| F     | 1969 bis 1978 | 33.834          | 9.580   | 45.085                                           | 9.328   | 57.845                        | 39.700  | 39.910    | 16.318                         | 1.581              | 7.001  | 24.396              | 1.142                           | 15.339                                     | 490              |
| G     | 1979 bis 1983 | 50.974          | 14.433  | 45.303                                           | 14.053  | 87.147                        | 51.588  | 51.862    | 21.205                         | 1.534              | 10.547 | 31.701              | 1.484                           | 19.933                                     | 636              |
| H     | 1984 bis 1994 | 91.334          | 25.861  | 81.174                                           | 25.181  | 156.150                       | 92.435  | 92.925    | 37.995                         | 2.750              | 18.898 | 56.803              | 2.660                           | 35.715                                     | 1.140            |
| I     | 1995 bis 2001 | 22.630          | 6.407   | 6.401                                            | 6.239   | 38.688                        | 52.129  | 52.405    | 21.427                         | 936                | 4.682  | 32.034              | 1.500                           | 20.142                                     | 643              |
| J     | 2002 bis 2009 | 14.756          | 4.178   | 4.174                                            | 4.068   | 25.228                        | 33.993  | 34.173    | 13.973                         | 611                | 3.053  | 20.889              | 978                             | 13.134                                     | 419              |
| Summe |               | 402.000         | 113.825 | 423.000                                          | 110.832 | 687.279                       | 486.563 | 489.144   | 200.000                        | 17.000             | 83.176 | 299.000             | 14.000                          | 188.000                                    | 6.000            |

**Tabelle 0.8: Absolute Verteilung der Nichtwohngebäude-Typen auf die Baualtersklassen A-J (Rechenbeispiel:**  
 $3,7 = 32,4 \times \frac{2,92}{(2,92+10,57+12,26)}$ , Zahlenwerte aus den beiden obenstehenden Tabellen.)

| Gebäudenutzungstyp               | Anzahl    | NGF<br>in Mio. m <sup>2</sup> | Höhe<br>(Thüringen)<br>in m | Höhe<br>(Sachsenanhalt)<br>in m | gemittelt<br>in m | Geschossigkeit |
|----------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------|
| Baugewerbe                       | 402.000   | 97                            |                             |                                 | 8,6               | 2,3            |
| Sport                            | 113.825   | 55                            | 5,8                         | 7,1                             | 6,5               | 1,0            |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime | 423.000   | 237                           | 7,1                         | 9,0                             | 8,1               | 2,5            |
| Bildung                          | 110.832   | 156                           | 7,8                         | 9,5                             | 8,6               | 2,3            |
| Büroähnliche Betriebe            | 687.279   | 316                           | 8,2                         | 11,9                            | 10,1              | 3,0            |
| Handel                           | 486.563   | 244                           | 6,6                         | 8,1                             | 7,3               | 2,0            |
| Industrie                        | 489.144   | 698                           | 5,8                         | 7,3                             | 6,3               | 1,0            |
| Herstellungsbetriebe             | 200.000   | 86                            |                             |                                 | 6,3               | 1,0            |
| Krankenhäuser                    | 17.000    | 53                            | 8,9                         | 9,9                             | 9,4               | 3,0            |
| Kultur                           | 83.176    | 70                            | 8,5                         | 11,9                            | 10,2              | 2,3            |
| Landwirtschaft                   | 299.000   | 254                           |                             |                                 | 7,0               | 1,5            |
| Nahrungsmittelgewerbe            | 14.000    | 7                             |                             |                                 | 5,0               | 1,0            |
| Textil, Bekleidung, Spedition    | 188.000   | 74                            |                             |                                 | 9,0               | 2,0            |
| Wäschereien                      | 6.000     | 1                             |                             |                                 | 5,0               | 1,0            |
| Summe                            | 3.519.818 | 2.346                         |                             |                                 |                   |                |

**Tabelle 0.9:**      **Gemittelte Höhen der Gebäudetypen mit zugehöriger Geschossigkeit**

|                                  | Umrechnung<br>von NGF zu<br>BGF | Bruttogrund-<br>fläche<br>in Mio. m <sup>2</sup> | Fläche pro<br>Geschoss<br>in Mio. m <sup>2</sup> | Bruttoraum-<br>inhalt<br>in Mio. m <sup>3</sup> | Nettogrund-<br>fläche<br>in Mio. m <sup>2</sup> | Fläche pro<br>Geschoss<br>in Mio. m <sup>2</sup> | Netto-<br>rauminhalt<br>in Mio. m <sup>3</sup> |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Baugewerbe                       | 0,88                            | 110,3                                            | 47,3                                             | 949,3                                           | 96,7                                            | 41,5                                             | 833,0                                          |
| Sport                            | 0,91                            | 60,4                                             | 60,4                                             | 389,9                                           | 55,0                                            | 55,0                                             | 354,8                                          |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime | 0,85                            | 278,8                                            | 111,5                                            | 2.247,3                                         | 237,0                                           | 94,8                                             | 1.910,2                                        |
| Bildung                          | 0,88                            | 177,3                                            | 76,0                                             | 1.526,3                                         | 156,0                                           | 66,9                                             | 1.343,2                                        |
| Büroähnliche Betriebe            | 0,85                            | 371,8                                            | 123,9                                            | 3.746,8                                         | 316,0                                           | 105,3                                            | 3.184,8                                        |
| Handel                           | 0,88                            | 276,7                                            | 138,4                                            | 2.030,6                                         | 243,5                                           | 121,8                                            | 1.786,9                                        |
| Industrie                        | 0,90                            | 775,0                                            | 775,0                                            | 4.887,9                                         | 697,5                                           | 697,5                                            | 4.399,1                                        |
| Herstellungsbetriebe             | 0,88                            | 98,0                                             | 98,0                                             | 618,1                                           | 86,0                                            | 86,0                                             | 542,4                                          |
| Krankenhäuser                    | 0,86                            | 61,6                                             | 20,5                                             | 578,8                                           | 53,0                                            | 17,7                                             | 497,8                                          |
| Kultur                           | 0,89                            | 78,7                                             | 33,7                                             | 800,3                                           | 70,0                                            | 30,0                                             | 712,3                                          |
| Landwirtschaft                   | 0,88                            | 288,9                                            | 192,6                                            | 2.022,5                                         | 253,5                                           | 169,0                                            | 1.774,7                                        |
| Nahrungsmittelgewerbe            | 0,88                            | 8,0                                              | 8,0                                              | 39,9                                            | 7,0                                             | 7,0                                              | 35,0                                           |
| Textil, Bekleidung, Spedition    | 0,88                            | 84,3                                             | 42,2                                             | 759,0                                           | 74,0                                            | 37,0                                             | 666,0                                          |
| Wäschereien                      | 0,88                            | 1,1                                              | 1,1                                              | 5,7                                             | 1,0                                             | 1,0                                              | 5,0                                            |
| Summe                            |                                 | 2.671,0                                          | 123,5                                            | 20.602,4                                        | 2.346,3                                         | 109,3                                            | 18.045,2                                       |
| Mittelwert                       |                                 |                                                  |                                                  |                                                 |                                                 |                                                  |                                                |

Werte beziehen sich auf den Gesamtbestand

|                                  | Brutto             |                                 |                   | Netto              |                                 |                        |
|----------------------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------|
|                                  | Fläche pro Gebäude | Fläche pro Gebäude pro Geschoss | BRI pro Gebäude   | Fläche pro Gebäude | Fläche pro Gebäude pro Geschoss | Rauminhalt pro Gebäude |
|                                  | in m <sup>2</sup>  | in m <sup>2</sup>               | in m <sup>3</sup> | in m <sup>2</sup>  | in m <sup>2</sup>               | in m <sup>3</sup>      |
| Baugewerbe                       | 274,3              | 117,5                           | 2.361,4           | 240,7              | 103,1                           | 2.072,1                |
| Sport                            | 531,0              | 531,0                           | 3.425,7           | 483,2              | 483,2                           | 3.117,4                |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime | 659,2              | 263,7                           | 5.312,8           | 560,3              | 224,1                           | 4.515,9                |
| Bildung                          | 1.599,5            | 685,5                           | 13.771,5          | 1.407,5            | 603,2                           | 12.118,9               |
| Büroähnliche Betriebe            | 540,9              | 180,3                           | 5.451,6           | 459,8              | 153,3                           | 4.633,9                |
| Handel                           | 568,7              | 284,3                           | 4.173,3           | 500,4              | 250,2                           | 3.672,5                |
| Industrie                        | 1.584,5            | 1.584,5                         | 9.992,8           | 1.426,0            | 1.426,0                         | 8.993,5                |
| Herstellungsbetriebe             | 490,0              | 490,0                           | 3.090,4           | 430,0              | 430,0                           | 2.711,9                |
| Krankenhäuser                    | 3.625,2            | 1.208,4                         | 34.049,4          | 3.117,6            | 1.039,2                         | 29.282,5               |
| Kultur                           | 945,6              | 405,3                           | 9.621,5           | 841,6              | 360,7                           | 8.563,2                |
| Landwirtschaft                   | 966,3              | 644,2                           | 6.764,2           | 847,9              | 565,3                           | 5.935,6                |
| Nahrungsmittelgewerbe            | 569,8              | 569,8                           | 2.849,0           | 500,0              | 500,0                           | 2.500,0                |
| Textil, Bekleidung, Spedition    | 448,6              | 224,3                           | 4.037,1           | 393,6              | 196,8                           | 3.542,6                |
| Wäschereien                      | 189,9              | 189,9                           | 949,7             | 166,7              | 166,7                           | 833,3                  |
| Mittelwert                       | 928,1              | 527,1                           | 7.560,8           | 812,5              | 464,4                           | 6.606,7                |

Werte gelten jeweils für ein mittleres Gebäude des entsprechenden Typs

Tabelle 0.11: Brutto-/Netto-Volumen und -Flächen der Nichtwohngebäude pro Gebäude oder Geschoss

|                                  | BGF               | NGF               | Seiten-<br>länge<br>a in m | Seiten-<br>länge<br>b in m | Höhe | Ge-<br>schossig-<br>keit | Fläche            |         |         |      |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|------|--------------------------|-------------------|---------|---------|------|
|                                  |                   |                   |                            |                            |      |                          | Boden/<br>Dach    | Fassade | Fenster | Tür  |
|                                  | in m <sup>2</sup> | in m <sup>2</sup> | in m                       | in m                       | in m |                          | in m <sup>2</sup> | 0,72    | 0,23    | 0,05 |
| Baugewerbe                       | 117,5             | 240,7             | 15,0                       | 7,8                        | 8,6  | 2,3                      | 117,5             | 318,2   | 55,4    | 19,7 |
| Sport                            | 531,0             | 483,2             | 15,0                       | 35,4                       | 6,5  | 1,0                      | 531,0             | 506,7   | 111,1   | 32,5 |
| Beherbergung, Gaststätten, Heime | 263,7             | 560,3             | 15,0                       | 17,6                       | 8,1  | 2,5                      | 263,7             | 370,0   | 128,9   | 26,3 |
| Bildung                          | 685,5             | 1.407,5           | 15,0                       | 45,7                       | 8,6  | 2,3                      | 685,5             | 669,2   | 323,7   | 52,3 |
| Büroähnliche Betriebe            | 180,3             | 459,8             | 15,0                       | 12,0                       | 10,1 | 3,0                      | 180,3             | 411,7   | 105,8   | 27,2 |
| Handel                           | 284,3             | 500,4             | 15,0                       | 19,0                       | 7,3  | 2,0                      | 284,3             | 358,3   | 115,1   | 24,9 |
| Industrie                        | 1.584,5           | 1.426,0           | 15,0                       | 105,6                      | 6,3  | 1,0                      | 1.584,5           | 1.117,5 | 328,0   | 76,1 |
| Herstellungsbetriebe             | 490,0             | 430,0             | 15,0                       | 32,7                       | 6,3  | 1,0                      | 490,0             | 472,3   | 98,9    | 30,1 |
| Krankenhäuser                    | 1.208,4           | 3.117,6           | 20,0                       | 60,4                       | 9,4  | 3,0                      | 1.208,4           | 718,1   | 717,1   | 75,5 |
| Kultur                           | 405,3             | 841,6             | 15,0                       | 27,0                       | 10,2 | 2,3                      | 405,3             | 618,7   | 193,6   | 42,8 |
| Landwirtschaft                   | 644,2             | 847,9             | 30,0                       | 21,5                       | 7,0  | 1,5                      | 644,2             | 489,6   | 195,0   | 36,0 |
| Nahrungsmittelgewerbe            | 569,8             | 500,0             | 20,0                       | 28,5                       | 5,0  | 1,0                      | 569,8             | 345,7   | 115,0   | 24,2 |
| Textil, Bekleidung, Spedition    | 224,3             | 393,6             | 15,0                       | 15,0                       | 9,0  | 2,0                      | 224,3             | 421,7   | 90,5    | 27,0 |
| Wäschereien                      | 189,9             | 166,7             | 15,0                       | 12,7                       | 5,0  | 1,0                      | 189,9             | 224,5   | 38,3    | 13,8 |

Tabelle 0.12: Flächenermittlung für Nichtwohngebäude

| Außenwände |                       |                          |                              |
|------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|
| BAK        | Baukonstruktionsalter |                          | U-Wert in W/m <sup>2</sup> K |
| A/B        | 1                     | Konstruktionen bis 1918  | 2                            |
| C-F        | 2                     | Konstruktionen 1919-1976 | 1,5                          |
| G          | 3                     | Konstruktionen 1977-1983 | 1,2                          |
| H          | 4                     | Konstruktionen 1984-1994 | 0,85                         |
| I          | 5                     | Konstruktionen ab 1995   | 0,35                         |

**Tabelle 0.13: Baukonstruktiv bedingte Altersklassen (Leibnitz-Institut, 2011)**

|     |                       |                          | U-Werte in W/m <sup>2</sup> K |                  |                   |
|-----|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|
| BAK | Baukonstruktionsalter |                          | Fenster                       | oberer Abschluss | unterer Abschluss |
| A-F | 1                     | Konstruktionen bis 1976  | 2,9                           | 1                | 1,2               |
| G   | 2                     | Konstruktionen 1977-1983 | 2,9                           | 0,45             | 0,85              |
| H   | 3                     | Konstruktionen 1984-1994 | 1,9                           | 0,3              | 0,4               |
| I   | 4                     | Konstruktionen ab 1995   | 1,9                           | 0,3              | 0,4               |

**Tabelle 0.14: U-Werte von Nichtwohngebäuden in Abhängigkeit von der Baualtersklasse (Leibnitz-Institut, 2011)**