

## Wirtschaftlichkeit von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie-Gebäudestandard

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München

Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm

Dipl.-Ing. Florian Kagerer, MSc

Dipl.-Ing. Christine Maderspacher

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard

Eine Studie in Kooperation mit der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes  
Bauen e.V. (ARGE//eV)

Dipl.-Ing. Dietmar Walberg

Dipl.-Ing. Timo Gniechwitz

**ARGE//eV**  
Arbeitsgemeinschaft  
für zeitgemäßes Bauen e.V.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Deutschen Gesellschaft für  
Mauerwerksbau (DGfM) gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.



# FIW München

Forschungsbericht FO-2015/08

ISBN 978-3-939268-41-3

FIW Bericht FO-2015/08

## Wirtschaftlichkeit von Einfamilienhäusern im Niedrigstenergie-Gebäudestandard

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München  
Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm  
Dipl.-Ing. Florian Kagerer, MSc  
Dipl.-Ing. Christine Maderspacher  
Dipl.-Ing. Christoph Sprengard

Eine Studie in Kooperation mit der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen  
e.V. (ARGE//eV)

Dipl.-Ing. Dietmar Walberg  
Dipl.-Ing. Timo Gniechwitz

**ARGE//eV**  
Arbeitsgemeinschaft  
für zeitgemäßes Bauen e.V.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerksbau (DGfM) gefördert.

Erschienen auch als: **Bauforschungsbericht Nr. 71** bei der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. - Walkerdamm 17 - 24103 Kiel

ISBN 978-3-939268-41-3

Der Bericht umfasst

85    Seiten  
27    Abbildungen  
34    Tabellen

Gräfelfing, den 11. Januar 2017

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

Prof. Dr.-Ing. Andreas H.  
Holm

Christoph Sprengard

Florian Kagerer

## Kurzfassung

Die klima- und energiepolitischen Zielsetzungen von Bundesregierung und EU sehen strengere Anforderungen an die künftigen energetischen Standards für Neubauten vor. Diese umfassen genaue Vorgaben an die Qualität der Gebäudehülle und an den Gesamtprimärenergiebedarf des Gebäudes bei Beibehaltung des Wirtschaftlichkeitsgebot („kostenoptimales Niveau“) vor.

Die Ergebnisse dieser Studie können wie folgt zusammengefasst werden.

1. Wird für Einfamilienhäuser nach zukünftigen EU-Niedrigstenergie-Standard ein Standard in Anlehnung an das heute bekannte KfW-Effizienzhaus 55 (EH 55) zu Grunde gelegt, ist es auch in Zukunft weiterhin möglich, mit allen vorhandenen Mauerwerkskonstruktionen die geplanten Anforderungen zu erfüllen, d.h. Mauerwerkskonstruktionen sind auch bei steigender Energieeffizienz zukunftsfähig.
2. Die energetischen Einsparungen durch die geplanten Standards reichen nicht aus, um die erforderlichen Mehrkosten für den Niedrigstenergie-Gebäudestandard (EH 55) zu kompensieren. Die Umsetzung ist damit für den Bauherrn ohne zusätzliche Förderung nicht wirtschaftlich. Eine kostenneutrale Umsetzung gegenüber den Anforderungen der EnEV 2016 wird für das berechnete Beispiel erst mit einer Förderung zwischen etwa 40 und 50 €/m<sup>2</sup> ( $A_N \approx 180\text{m}^2$ ) möglich.
3. Gebäude nach EU-Niedrigstenergie-Gebäudestandard werden im Vergleich zum gesetzlichen Standard nach EnEV 2016 teurer werden. Die geplanten Anforderungen an den Primärenergiekennwert erfordern einen weiter zunehmenden Anteil von erneuerbaren Energien bei der Versorgung von Gebäuden, was zu einer Veränderung der Anlagentechnik führt: Wärmepumpen, Solarthermie, Lüftungswärmerückgewinnung erhöhen die Effizienz, verteuern aber auch die Versorgungstechnik.
4. Die geplanten Anforderungen können von unterschiedlichen Kombinationen aus Effizienzmaßnahmen grundsätzlich technisch erfüllt werden. Dennoch ist die Technologieoffenheit nur noch eingeschränkt gegeben. Bewehrte Standardtechnologien (wie z.B. der Brennwertkessel) können ohne zusätzliche, aufwändige Maßnahmen (z.B. solare Heizungsunterstützung, Lüftungs-WRG, Biogas, bessere Gebäudehülle) künftige Grenzwerte nicht mehr erfüllen und führen damit zu relevanten Mehrkosten.
5. Aus den Untersuchungsergebnissen der Studie ergeben sich für mögliche weitere Anpassungen der Energieeinsparverordnung folgende drei Empfehlungen:
  - (1) Beibehaltung der bisherigen Bewertung- und Bilanzierungsgrößen
  - (2) Max. Verschärfung der bisherigen Anforderungen im Neubau um 10%
  - (3) Beibehaltung des KfW-Effizienzhaus 55 (EH 55) als Förderstandard zur Kompensation der Kostensteigerungen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Glossar</b>	<b>5</b>
<b>1 Einführung und Problemstellung</b>	<b>8</b>
<b>2 Aktuelle Entwicklung des energiesparenden Bauens</b>	<b>9</b>
2.1 Energieeinsparungsgesetz des Bundes (EnEG)	9
2.1.1 EU-Gebäuderichtlinie (EPBD)	12
2.1.2 Klimaschutzplan 2050	13
<b>3 Vorgabe eines ökonomischen Optimums</b>	<b>16</b>
<b>4 Untersuchungsansatz</b>	<b>20</b>
4.1 Energetische und ökologische Bewertung	21
4.1.1 Anforderungen der EnEV (2016 bzw. 2019/2021)	21
4.1.2 Ausführung des Referenzgebäudes	23
4.1.3 Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599	23
4.2 Ökonomische Bewertung	25
4.2.1 Kostenermittlung	25
4.2.2 Investitionskosten	27
4.2.3 Jahresgesamtkosten	28
4.3 Ökonomische Randbedingungen	31
4.4 Ökologische Randbedingungen	35
<b>5 Anwendungsbeispiel: Typengebäude Einfamilienhaus (EFH)</b>	<b>37</b>
5.1 Definition	37
5.1.1 Beispielhafte Darstellung	38
5.1.2 Gebäudehülle: Auswahl der Bauweisen und Konstruktionen	41
5.1.3 Anlagentechnik	43
5.2 Ergebnisse: Energiebedarf und CO <sub>2</sub> -Emissionen	45
5.2.1 Nutzenergiebedarf	45
5.2.2 Endenergiebedarf	46
5.2.3 Primärenergie	49
5.2.4 CO <sub>2</sub> -Emissionen	50
5.3 Ergebnisse: Ökonomie	51

5.3.1	Jahresgesamtkosten	52
5.3.2	Investitions- bzw. Kapitalkosten	52
5.3.3	Energiekosten	55
5.3.4	Betriebs- und Instandhaltungskosten	57
5.3.5	Laufende Kosten	57
5.3.6	Jahresgesamtkosten	59
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>63</b>
6.1	Energetische Bewertung	63
6.2	Ökonomische Bewertung	64
6.3	Weiterführende Fragestellungen und Forschungsbedarf	68
6.4	Empfehlungen	69
	<b>Anhang</b>	<b>73</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>75</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>79</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>82</b>

## Glossar

Anfangsinvestition	Die Anfangsinvestitionen bezeichnen alle Kosten, die für das betriebsfertige Gebäude notwendig sind, d.h. einschließlich der Kosten für Planung, Einkauf der Komponenten oder Maßnahmen, Einbau und Inbetriebnahme.
Annuität	Die Annuität beschreibt die Aufteilung der Kosten auf einer jährlichen Basis. Die kapitalgebundenen und laufenden Kosten werden entsprechend der Dauer des Betrachtungszeitraums aufgeteilt.
Annuitätenfaktor	Der Annuitätenfaktor bezeichnet den Faktor, mit dem Barwerte aller Kosten oder Einnahmen zu multiplizieren sind, um diese über den Betrachtungszeitraum gleichmäßig zu verteilen.
Bauwerkskostendifferenz	Die Bauwerkskostendifferenz beschreibt die Kosten für alle baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen (Kostengruppe 300 und 400 entsprechen DIN 276-1) am und im Gebäude, die vom energetischen Standard unabhängig und in allen Varianten gleich sind.
Barwert	Der Barwert bezeichnet den Wert der jeweiligen Kosten und Einnahmen, die im Betrachtungszeitraum anfallen und auf das Ausgangsjahr bezogen werden.
Barwertfaktor	Der Barwertfaktor bezeichnet den Faktor, mit dem die einzelnen künftig anfallenden Kosten oder Einnahmen zu multiplizieren sind, um diese für die Vergleichbarkeit auf das Ausgangsjahr zu beziehen.
Berechnungszeitraum / Betrachtungszeitraum	Der Berechnungszeitraum ist der in der Regel in Jahren ausgedrückte Zeitraum, der für die Berechnung berücksichtigt wird.
Betriebskosten	Die Betriebskosten beschreiben alle Kosten im Zusammenhang mit dem Betrieb des Gebäudes (d.h. z.B. Bedienen der Anlagentechnik) einschließlich der jährlichen Kosten für Versicherung, Gebühren der öffentlichen Versorgung sowie Abgaben und Steuern. Für die betrachteten Varianten des Typengebäudes werden die Betriebskosten als Bestandteil der Instandhaltungskosten berücksichtigt.
Effizienzhaus 55	Das Effizienzhaus 55 bezeichnet einen derzeit gültigen Förderstandard der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). Primärenergiebedarf bzw. Transmissionsverlust der Gebäudehülle dürfen maximal 55% bzw. 70% des Referenzgebäudes betragen.

Energiekosten	Die Energiekosten bezeichnen die jährlichen Kosten für Energie und Grundgebühren für Energie.
Ersatzinvestition / Wiederbeschaffungskosten	Die Ersatzinvestition bezeichnet die Kosten, die für die Wiederbeschaffung oder den Ersatz einer Komponente entsprechend der technischen Lebensdauer während der Betrachtungszeitraum notwendig ist.
Gebäudehülle (thermische~)	Die thermische Gebäudehülle bildet den Abschluss des Gebäudes zum Außenklima oder zu weiteren Bereichen, in denen andere thermischen Bedingungen vorliegen (z.B. unbeheizter Keller, Speicher, etc.).
Instandhaltungskosten	Die Instandhaltungskosten beschreiben die jährlichen Kosten für Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung der gewünschten Qualität des Gebäudes oder einer Gebäudekomponente. Dies beinhaltet die jährlichen Kosten für Inspektion, Reinigung, Anpassungen, Reparaturen sowie Verschleißteile. Diese werden als prozentualer Anteil der Investitionskosten berechnet.
Jahresgesamtkosten	Die Jahresgesamtkosten beschreiben die Summe aller jährlichen Kosten für Investition, Instandhaltung, Betrieb und Energie.
Kapitalgebundene Kosten	Die Kapitalkosten beschreiben die Summe aller Kosten für Komponenten oder Maßnahmen für die eine Investition getätigt werden muss. Dazu gehören die Kosten für die Gebäudehülle, Versorgungstechnik und alle weiteren baulichen Investitionen (Bauwerkskostendifferenz).
Laufende Kosten	Die laufenden Kosten bezeichnen die jährlichen Kosten für Instandhaltung, Betrieb und Energie.
Lebensdauer (technische ~)	Die Lebensdauer bezeichnet die erwartete Nutzungszeit der Komponenten oder Maßnahmen bis zum Ersatz oder zur grundlegenden Erneuerung.
Lebenszyklus	Der Lebenszyklus umfasst die Zeitspanne vom Beginn bis zum Ende der Existenz des betrachteten Objekts oder (Teil-)Systems.
Rechnerische Nutzungsdauer	Die rechnerische Nutzungsdauer legt den durchschnittlichen Zeitraum zur Nutzung einer Maßnahme oder Komponente fest, bis eine Ersatzinvestition oder eine grundlegende Sanierung (wirtschaftlich) notwendig ist. Die Nutzungsdauer kann von der Lebensdauer abweichen.
Referenzgebäude	Die Energieeinsparverordnung EnEV definiert als Vergleichsbasis die genaue bauliche und anlagentechnische Ausführung des zu untersuchenden Gebäudes anhand eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung. Dazu sind alle relevanten

Kennwerte für die Gebäudehülle (U-Wert, g-Wert, Wärmebrücken, etc.) und die Konfiguration der Anlagentechnik festgelegt.

Referenztechnologie	Die Referenztechnologie beschreibt ausschließlich die Konfiguration der Anlagentechnik (ohne Gebäudehülle) entsprechend den Vorgaben der Energieeinsparverordnung EnEV für das Referenzgebäude.
Restwert	Der Restwert beschreibt den Wert einer Komponente (z.B. Baukonstruktion, Anlagentechnik) zum Ende eines definierten Betrachtungszeitraums (bei linearer Abschreibung).
Versorgungstechnik	Die Versorgungstechnik umfasst alle gebäudetechnischen Maßnahmen, die zur Versorgung des Gebäudes mit Heizwärme, Warmwasser, Strom und Frischluft durch mechanische Lüftung beitragen.

# 1 Einführung und Problemstellung

Während sich mit verfügbarer Technik und konkreten Maßnahmen bereits deutliche Einsparpotenziale bei Neubauten oder bei entsprechend umfassend durchgeführten Sanierungen für die Reduktion von Treibhausgasemissionen von Gebäuden ergeben, taucht bei einer fortschreitenden Emissionsreduzierung gegen Null ein gewisses »Last-Mile-Problem« auf: Je mehr in der CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz eingespart werden soll, desto kostenintensiver und aufwändiger erweisen sich die einzuleitenden Maßnahmen.

Die nationale Umsetzung der Gebäudeenergieeffizienzrichtlinie der EU und damit verbunden die Weiterentwicklung und Zusammenführung des EnEG, der EnEV und des EEWärmeG werden die Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle und die Effizienz der Versorgungssysteme weiter erhöhen. Entsprechend den von der EU formulierten Zeitplänen ist demnächst die Definition der nationalen Standards für Niedrigstenergiegebäude vorzulegen [1], die dann ab 2019 für öffentliche und ab 2021 für alle anderen Gebäude verbindlich in den gesetzlichen Regelwerken eingeführt werden [2].

So gilt es durch die Industrie kosteneffiziente Maßnahmen und Systeme für diese absehbare Entwicklung anzubieten, wovon das Aufzeigen und Bewerten von Ansätzen hierfür, einen wesentlichen Inhalt der hier präsentierten Studie ausmacht. Anhand eines typisierten Einfamilienhauses werden in dieser Studie unterschiedliche Varianten für Gebäudehülle und Anlagentechnik energetisch und ökonomisch bewertet und mögliche Konsequenzen für zukünftige Anforderungen und die Gestaltung der Rahmenbedingungen abgeleitet. Im Fokus steht dabei die Analyse verschiedener Außenwandkonstruktionen unter Anwendung heute geltender und künftig zu erwartender Anforderungen (EnEV 2016 und EnEV 2021).

## 2 Aktuelle Entwicklung des energiesparenden Bauens

### 2.1 Energieeinsparungsgesetz des Bundes (EnEG)

Das Energieeinsparungsgesetz des Bundes (EnEG) in seiner ersten Fassung von 1976 war Grundlage der ersten Wärmeschutzverordnung von 1977. Das EnEG zielt bis heute darauf ab, in Gebäuden Energie zu sparen und nur so viel Energie zu verbrauchen, wie jeweils notwendig ist, um das Gebäude zweckdienlich zu nutzen. Es hatte schon in der ersten Fassung insbesondere den Wärmeschutz der Gebäudehülle sowie die effiziente Anlagentechnik und deren Betrieb im Visier.

Die Fortentwicklung der Energieeffizienz im Gebäudebereich hat dazu geführt, dass sich im Laufe der letzten 30 Jahre, wie aus Abbildung 1 hervorgeht, die Bilanzgrenzen ständig erweitert haben. Die Anforderungen an das energiesparende Bauen sind im Laufe der Jahre immer komplexer geworden. Während die erste Wärmeschutzverordnung 1977 noch mit einem Umfang von etwa 10 Seiten auskam, um die Anforderungen und Nachweismethode zu definieren, erweiterten sich im Laufe der mittlerweile sieben Novellierungen sowohl der Umfang der Anforderungen und des Nachweises als auch die Komplexität der Bewertungsmethode. Darüber hinaus wurde im Rahmen der Gesetzgebung zum Integrierten Energie- und Klimapaketes (IEKP) im Jahr 2007 ergänzende Anforderungen in einem Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz fixiert, die nur begrenzt auf die Anforderungen der Energieeinsparverordnung abgestimmt waren.

Parallel zu den Veränderungen in den Anforderungen haben die dazu notwendigen technologischen Entwicklungen auch unsere Gebäude in den letzten Jahrzehnten verändert. Mit den steigenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden sind in den letzten Jahrzehnten leistungsfähige Materialien für den Wärmeschutz entstanden, die Anwendungsbereiche ausgeweitet und neue Verarbeitungstechniken entwickelt worden. Die energetische Qualität der Gebäude ist seit der Wärmeschutzverordnung Ende der 1990er Jahre deutlich gestiegen und inzwischen um ein Vielfaches besser als die von Vor- und Nachkriegsaltbauten. Abbildung 2 zeigt, wie sich im Laufe der verschiedenen Novellierungen der WSchV bzw. EnEV die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz einzelner Bauteile geändert haben. In den letzten Jahren konnte sich die sogenannte Niedrigenergiebauweise als Mindeststandard bundesweit durchsetzen und bestimmt somit den Stand der Technik.

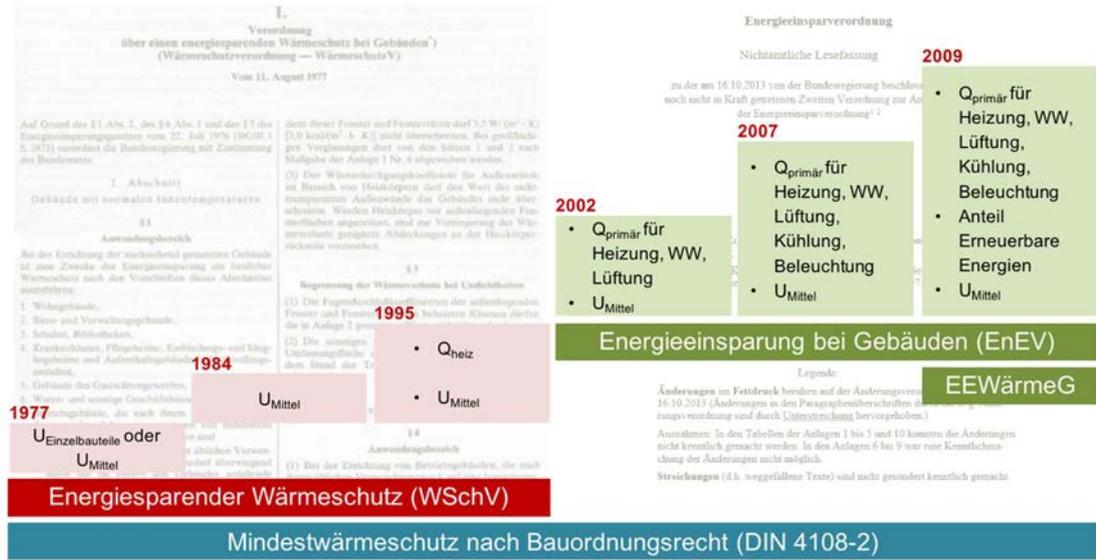
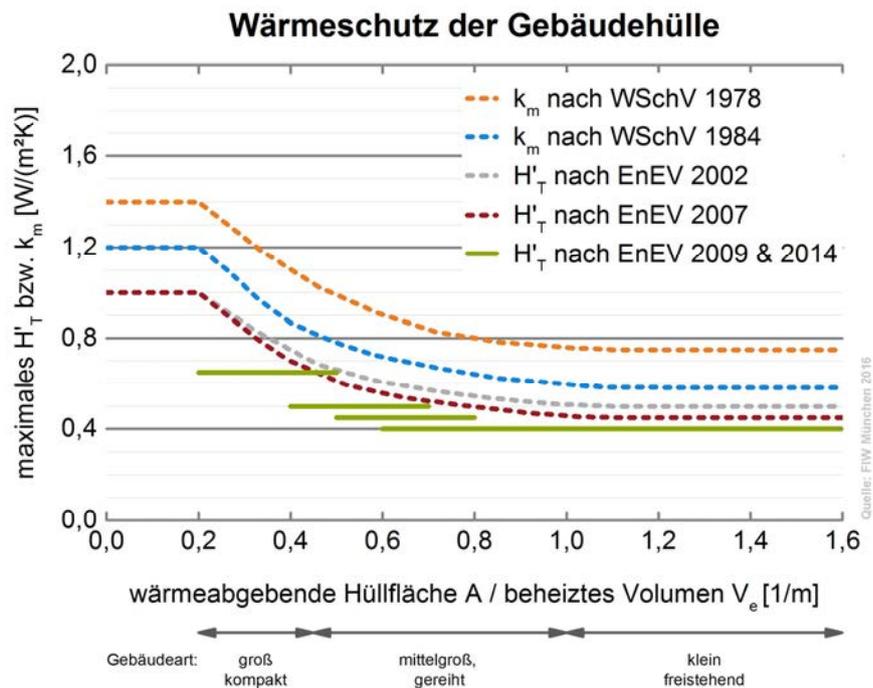


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung der Anforderungen und des Bewertungsumfangs an das energiesparende Bauen in Deutschland seit 1977 durch Einführung des Energieeinspargesetzes im Jahr 1976. Im Laufe der verschiedenen Anpassungen der WSchV bzw. EnEV wurde das System immer komplexer.

The table above (Abbildung 2) provides the specific data for the thermal conductivity coefficients ( $k_{max}$  and  $U_{max}$ ) for various building components across different regulatory periods.

Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten für die Bauteile der Gebäudehülle in Abhängigkeit der verschiedenen Wärmeschutz- und Energieeinspar-Verordnungen.



**Abbildung 3:** Zeitliche Entwicklung der Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz der Gebäudehülle. Bis zur Einführung der EnEV 2002 musste der Wärmeschutz in Form eines mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten  $k_m$  nachgewiesen werden. Die Einführung der EnEV im Jahr 2002 führte zu einer Umstellung auf die vergleichbare Größe spezifischer Transmissionswärmeverlust  $H'_T$ . Bis zum Jahr 2009 wurde der benötigte Wärmeschutz der Gebäudehülle in Abhängigkeit des  $A/V_e$  Verhältnisses begrenzt. Seit 2009 gelten die Anforderungen an  $H'_T$  entsprechend den Tabellenwerten der EnEV (Anlage 1, Tabelle 2). Hier wird nur zwischen Gebäudetypen unterschieden. Diese sind im Diagramm für die typischen Bereiche von  $A/V_e$  eingezeichnet. Mit Einführung der EnEV 2016 gilt zusätzlich die Anforderung  $H'_T \leq H'_{T,Ref}$  hinzu.

In der derzeit gültigen EnEV müssen neu zu errichtende Gebäude neben der Primärenergieanforderung auch gewisse Vorgaben an den baulichen Wärmeschutz erfüllen [3]. Dies wird durch den auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlust  $H'_T$  beschrieben. In Abbildung 3 ist die zeitliche Entwicklung der Nebenanforderung  $H'_T$  als Funktion des sogenannten  $A/V_e$ -Verhältnis (Hüllfläche / beheiztes Volumen) für die verschiedenen WSchV- bzw. EnEV-Ausgaben graphisch gegenübergestellt. Seit 2009 gelten die nachfolgenden Tabellenwerte (Tabelle 1) aus der EnEV-Anlage 1. Seit der Version 2016 kam zusätzlich die Anforderung  $H'_T \leq H'_{T,Ref}$  hinzu.

**Tabelle 1: Höchstwerte des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlusts nach EnEV 2016 (Anlage 1, Tabelle 2).**

Zeile	Gebäudetyp		Höchstwert des spezifischen Transmissionswärmeverlusts
1	Freistehendes Wohngebäude	mit $A_n \leq 350 \text{ m}^2$	$H'_{\tau} = 0,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
		mit $A_n > 350 \text{ m}^2$	$H'_{\tau} = 0,50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
2	Einseitig angebautes Wohngebäude		$H'_{\tau} = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
3	Alle anderen Wohngebäude		$H'_{\tau} = 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
4	Erweiterung und Ausbauten von Wohngebäuden		$H'_{\tau} = 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

### 2.1.1 EU-Gebäuderichtlinie (EPBD)

Die europäische Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (2002/91/EG) ist das Hauptinstrument der EU zur Verbesserung der Energieeffizienz im Gebäudebestand. In Vorbereitung der Kopenhagener Klimaschutzkonferenz (COP 15) vereinbarten die EU Mitgliedsstaaten verbindlich, die EU-Richtlinie zur Energieeffizienz von Gebäuden in Europa zu verschärfen. Die europäische Gebäuderichtlinie (2010/31/EU) trat 2010 in Kraft. Artikel 9 der Neuauflage der EU-Gebäuderichtlinie fordert, dass „die Mitgliedsstaaten gewährleisten, dass bis 31. Dezember 2020 alle neuen Gebäude Niedrigstenergiegebäude, sog. Fast-Null-Energie-Gebäude (Nearly Zero Energy Buildings - NZEB), sind [2]. Für neue Gebäude, die von Behörden als Eigentümer genutzt werden muss dieses schon nach dem 31. Dezember 2018 gelten. Ein Niedrigstenergiegebäude ist laut Artikel 2 der Neuauflage der EU-Gebäuderichtlinie definiert als „ein Gebäude, das eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei Null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen - einschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird - gedeckt werden“.

Wie viel Energie so ein Gebäude verbrauchen kann, welche erneuerbaren Energiequellen erlaubt sind und in welcher Nähe zum Gebäude die Energie erzeugt werden muss, muss noch in den Mitgliedsstaaten und in den EU-Institutionen diskutiert werden. **Es wird nationale Definitionen von Niedrigstenergiegebäuden in jedem Land geben.**

In Deutschland wird die EU-Gebäuderichtlinie in Form des Energieeinsparungsgesetzes (EnEG), welches die gesetzliche Grundlage schafft, und der Energieeinsparverordnung (EnEV) umgesetzt.

Seit dem 13. Juli 2013 ist die geänderte Version des Energieeinsparungsgesetzes EnEG 2013 in Kraft. Wichtigste Änderungen sind entsprechend der Novelle der EU-Gebäuderichtlinie der gesetzlich vorgeschriebene Niedrigstenergie-Gebäudestandard für öffentliche Gebäude ab 2019 und alle weiteren Neubauten ab 2021 (§ 2a), die Kontrolle von Energieausweisen und Inspektionsberichten (§ 7b) und die Änderung der Energieeinsparverordnung.



**Abbildung 4: Zusammenhang zwischen dem zukünftigen Energiesparrecht für Gebäude und EU Richtlinie 2010/31/EU**

Nun steht die nächste Stufe der nationalen Umsetzung der europäischen Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) an (Abbildung 4). Dazu sollen Energieeinsparungsgesetz (EnEG), Energieeinsparverordnung (EnEV) und Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) strukturell neu konzipiert und in einem Regelwerk zusammengeführt werden. Ziel ist ein aufeinander abgestimmtes Regelungssystem für die energetischen Anforderungen an Neubauten, an Bestandsgebäude und an den Einsatz erneuerbarer Energien zur Wärmeversorgung. Das künftige „Energieeinspargesetz Gebäude“ setzt die neu gefasste EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden um. Unklar ist derzeit noch, wie die nationale Definition des Niedrigstenergiegebäude aussehen wird. Angedacht ist, dass zukünftige Gebäude um 45% effizienter sind als Gebäude die bis Ende 2015 errichtet wurden. Das würde dem heutigen KfW-Effizienzhaus 55-Standard entsprechen [4].

### 2.1.2 Klimaschutzplan 2050

Im Klimaschutzplan 2050 (KSP) der deutschen Bundesregierung werden die geplanten nationalen Klimaschutz-Maßnahmen zur Umsetzung des Übereinkommens von Paris 2015 beschrieben. Er soll für den Prozess zum Erreichen der nationalen Klimaschutzziele im Einklang mit dem Paris-Abkommen inhaltliche Orientierung geben: in der Energieversorgung, im Verkehrs- und Gebäudebereich, in der Landwirtschaft, in der Abfallwirtschaft, in der Industrie sowie bei Gewerbe, Handel und

Dienstleistungen. Die Klimaschutzpolitik der Bundesregierung muss dabei auch soziale und wirtschaftliche Anforderungen – wie sie beispielsweise im „Bündnis für bezahlbares Wohnen und Bauen“ im Vordergrund stehen – berücksichtigen.

Der Beitrag des Gebäudebereichs auf dem Weg zu einer klimaneutralen Gesellschaft in der Mitte des 21. Jahrhunderts basiert auf der Strategie „klimafreundliches Bauen und Wohnen“ der Bundesregierung (Klima-Aktionsprogramm 2020). Diese hat zum Ziel, nahezu klimaneutrale Städte und Gemeinden bis zum Jahr 2050 zu realisieren – und dabei die Lebensqualität weiter zu verbessern. Hierfür greift die Strategie „klimafreundliches Bauen und Wohnen“ auch die Ergebnisse der „Energieeffizienz-Strategie Gebäude“ (ESG) und des „Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen“ auf.

Im Klimaschutzplan 2050 ist vorgesehen, dass die Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich bis 2030 auf 70 bis 72 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent gemindert werden. In Tabelle 2 sind die Ziele des KSP 2050 für den Gebäudebereich zusammengefasst.

Der Klimaschutzplan 2050 fordert, um langfristig einen klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen, für die bis 2030 zu errichtenden Neubauten das energetische Anforderungsniveau bezogen auf den Endenergiebedarf für Wohngebäude auf einen Wert deutlich unterhalb des heute geförderten Effizienzhaus 55-Standards (EH 55) weiterzuentwickeln. Für den (Wohn-) Gebäudebestand besteht das Ziel, den Primärenergiebedarf bis 2050 auf knapp 40 kWh/(m<sup>2</sup>a) zu reduzieren, für Nichtwohngebäude auf einen mittleren Wert von 52 kWh/(m<sup>2</sup>a). Dieser soll überwiegend aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Das geltende Wirtschaftlichkeitsgebot wird dabei nicht infrage gestellt. Soweit ein solches Anforderungsniveau nicht wirtschaftlich darstellbar ist, müsste ein entsprechender Deckungsfehlbetrag durch Förderung ausgeglichen werden. Als weitere Anforderung kommt hinzu, dass der Energieaufwand für die Herstellung und beim Recycling von Bauwerken bis 2030 bestmöglich minimiert wird. Dabei sind Auswirkungen auf Ökologie, Ökonomie und Gesundheit ebenfalls zu berücksichtigen [5].

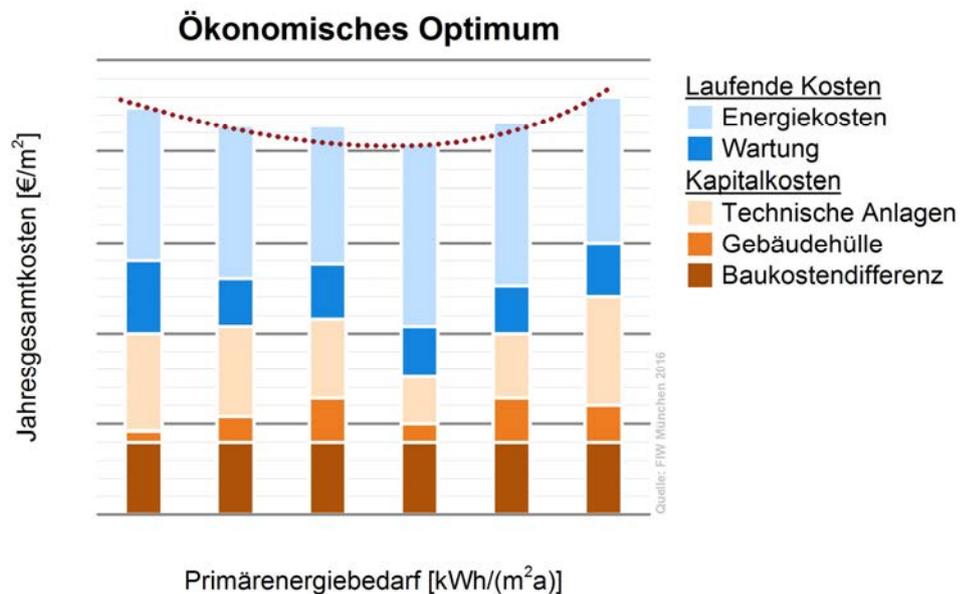
Diese ambitionierten Ziele bieten der Industrie im Bereich des baulichen Wärmeschutzes die Chance, mit ihren innovativen Produkten und Lösungen den Energieverbrauch weiter zu senken.

**Tabelle 2: Klimaschutzplan der Bundesregierung vom 14.11.2016. Formulierten Zielsetzungen für den Gebäudebereich bis 2050 [5].**

Ziel bis	2021	2030	2050
Gebäudestandard / Primärenergie-Bedarf	Niedrigstenergie-Gebäudestandard (EU)	<< EFH 55 ( $Q_P/Q_{P,REF}=0,55$ $H'_T/H'_{T,REF}=0,70$ )	40 kWh/(m <sup>2</sup> a) (Wohn-) Gebäudebestand  52 kWh/(m <sup>2</sup> a) Nicht-wohngebäude
Primärenergie			- 80% (gegenüber 2008)
CO <sub>2</sub> -Emission		70-72 Mio t CO <sub>2</sub> -Äquivalente	nahezu klimaneutral

### 3 Vorgabe eines ökonomischen Optimums

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen gilt es, sowohl die zu erwartenden Investitionen als jährliche Kapitalkosten als auch die laufenden Kosten für Energie zu betrachten. Für Gebäude mit sehr geringem Energiebedarf steigen die Investitionskosten stark an. Auf der anderen Seite machen die laufenden Energiekosten, abhängig von der zukünftigen Energiepreisentwicklung, einen Großteil der Kosten aus. Ein Kostenminimum, welches den anzustrebenden Gebäudestandard markiert, lässt sich wie in Abbildung 5 beispielhaft dargestellt für jeden Fall ermitteln.



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Jahresgesamtkosten eines Gebäudes in unterschiedlichen Ausführungen in Abhängigkeit vom Primärenergiebedarf mit dem Ziel der Bestimmung des ökonomischen Optimums im Sinn der EU-Richtlinie 2010/31/EU.

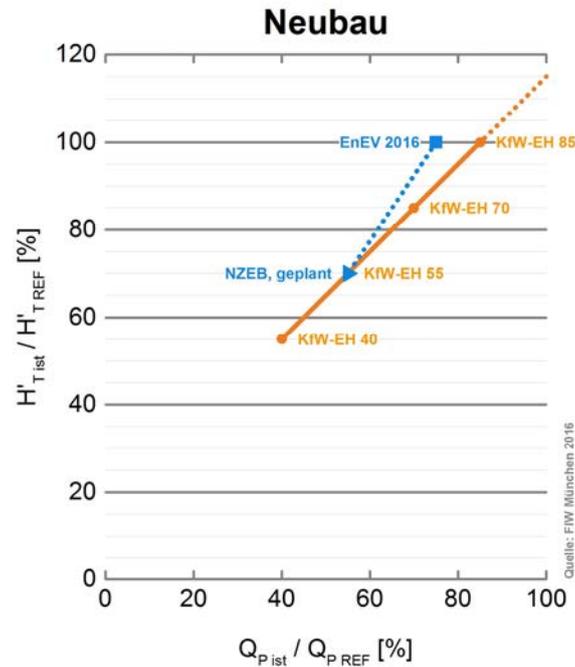
Energetische Standards, die über das gesetzlich geforderte Maß hinausgehen, werden gegenwärtig von der Bundesregierung über die KfW-Förderbank durch vergünstigte Darlehen und Tilgungszuschüsse gefördert. Die Höhe der Förderung orientiert sich an dem zu realisierenden energetischen Standard, d.h. mit höheren Standards steigt auch die Förderung. Die aktuellen Förderstufen für Neubau und Sanierung mit den Anforderungen an die Gebäudehülle und den Primärenergiebedarf sind in Tabelle 3 dargestellt.

Jede nächsthöhere Förderstufe bedeutet jeweils eine Reduktion des Transmissionswärmeverlusts  $H'_T$  und des Primärenergiebedarfs  $Q_p$  um 15%. Damit ergibt sich in Abbildung 17 ein linearer Verlauf der KfW-Effizienzhausstandards in Abhängigkeit von  $H'_T$  und  $Q_p$ . Die aktuellen Planungen für den künftigen Niedrigenergie-Gebäudestandard sehen das Effizienzhaus 55 (EH 55) als gesetzlichen Standard vor. Dies entspricht einer Reduktion von  $Q_p$  um 20% und von  $H'_T$  um 30% gegenüber der

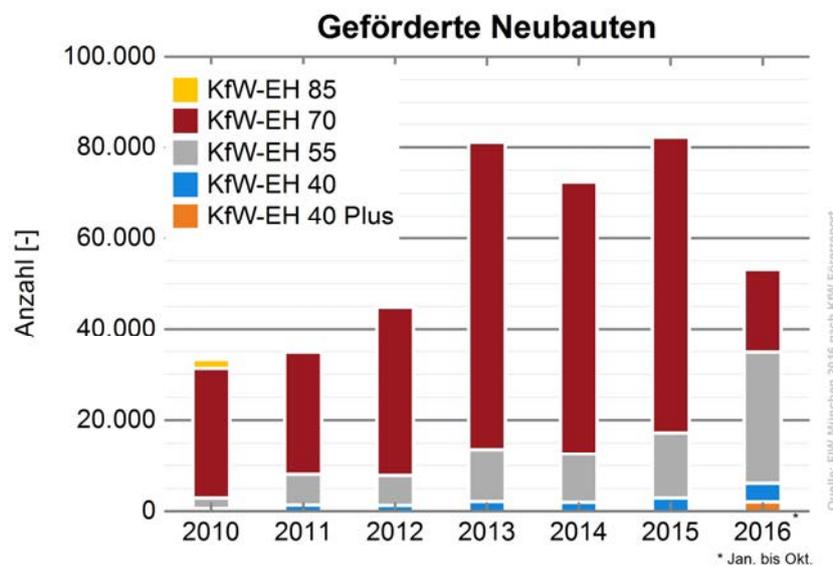
EnEV 2016. Der Anstieg der Anforderungen liegt damit deutlich höher als zwischen den einzelnen Förderstufen bei gleichzeitigem Entfall der Förderungsmöglichkeit (gesetzlicher Standard). Diese Entwicklung lässt sich jedoch für das realisierbare Kosten-Nutzen-Verhältnis bei hohen energetischen Niveaus des Gebäudestandards nicht in gleicher Größenordnung abbilden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bzw. Kostenoptimalität neuer energetischer Standards ist dies für die weitere Definition eines künftigen Gebäudestandards zur berücksichtigen.

**Tabelle 3: Die KfW hat in ihren Programmen „energieeffizientes Bauen“ bisher folgende Effizienzhausklassen definiert. Seit 1.4.2016 sind nur noch die KfW-EH 55, KfW-EH 40 und KfW-EH 40 Plus Standards förderfähig.**

KfW-EH Standard	Jährlicher Primärenergiebedarf $Q_p$	Spezifischer Transmissionswärmeverlust $H'_T$
	(in % des Referenzgebäudes nach EnEV)	
EH 85	85	100
EH 70	70	85
EH 55	55	70
EH 40	40	55
EH 40 Plus	40 (+Pluspaket)	55



**Abbildung 6:** Förderstandards der KfW-Bank in Abhängigkeit der Hauptanforderungen  $H_T$  und  $Q_p$  sowie aktueller und geplanter gesetzlicher Standard nach EnEV. Jede Förderstufe bedeutet eine Reduktion des Transmissionswärmeverlust  $H_T$  und der Primärenergiebedarfs  $Q_p$  jeweils um 15%. Der geplante Standard (EH 55) sieht demgegenüber eine Verschärfung um 20% für  $Q_p$  und 30% für  $H_T$  vor.



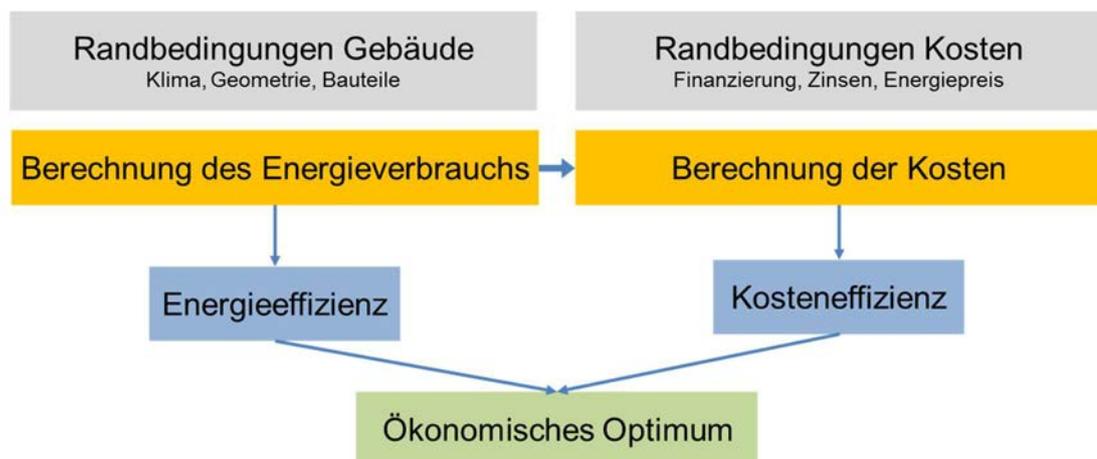
**Abbildung 7:** Anzahl der geförderten Neubauten nach Förderstandards der KfW seit 2010. Für das Jahr 2016 sind bisher nur die Werte für das 1. bis 3. Quartal veröffentlicht. Ab April 2016 wurde der KfW-EH 70 Förderstandard für Neubauten gestrichen. Seither gilt nur noch KfW-EH 55, KfW-EH 40 und KfW-EH 40 Plus.

Die Förderzahlen der KfW zeigen, dass das Programm stark nachgefragt wird und als Steuerungsinstrument zur Realisierung hoher energetischer Standards erfolgreich ist. In Abbildung 7 ist die Anzahl der geförderten Neubauten dargestellt, aufgeteilt nach den unterschiedlichen Förderstandards der KfW seit 2010. Das Effizienzhaus 70 (EH 70) entwickelte sich dabei in den Jahren 2013-2015 als der am häufigsten geförderte energetische Gebäudestandard. Mit der Verschärfung der EnEV zu Beginn 2016 entspricht der neue gesetzliche Standard nahezu dem EH 70, womit dieses nicht weiter gefördert wird. Die bisherigen Zahlen von 2016 (01/16 bis 09/16) lassen einen leichten Rückgang der Gesamt-Förderzahlen erwarten, wogegen sich die Förderungen für den KfW-EH 55-Standard bereits jetzt mehr als verdoppelt haben [6].

## 4 Untersuchungsansatz

Die energetische Qualität eines Gebäudes wird überwiegend von den thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle (Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils bzw. des Gesamtgebäudes: U-Wert bzw.  $H'_T$ ) und der Effizienz des Versorgungssystems bestimmt. Mit steigenden Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) erhöhen sich die baulichen Investitionskosten, während der Energiebedarf und damit die Energiekosten sinken. Eine Wirtschaftlichkeit der Investitionen kann nur dann gegeben sein, wenn die Energieeinsparungen über einen bestimmten Zeitraum höher ausfallen als die Investitions- und Folgekosten.

Sowohl für die Gebäudehülle als auch für die Haustechnik sind eine Vielzahl an Konstruktionen bzw. Versorgungssysteme gegeben, um unterschiedlichste energetische Standards umzusetzen. Dieser Untersuchung liegt dazu eine Auswahl an marktüblichen Systemen und Eigenschaften für Bauteile und Wärmeerzeuger zugrunde, auf deren Basis Kosten und Energiebedarfe unter definierten Randbedingungen berechnet und eine Bewertung der Energie- und Kosteneffizienz ermöglicht werden.



**Abbildung 8: Methodik zur Ermittlung des ökonomischen Optimums.**

Ausgangspunkt bildet eine Parameterstudie zur Gebäudehülle, in der die energiebedingten Mehrkosten ermittelt werden. Dazu werden alle möglichen Kombinationen der energetisch relevanten Bauteile (Außenwand, Dach, Kellerdecke, Fenster, Außentür und Wärmebrücken) gebildet (Abbildung 9), die sich in ihrer thermischen Qualität (U-Wert) und in ihren Investitionskosten unterscheiden. Die Ergebnisse werden entsprechend des Transmissionswärmeverlusts der Gebäudehülle  $H'_T$  sortiert. Damit können diese den Anforderungen der EnEV bzw. dem Energiestandard einfach zugeordnet und die Lösungsvarianten und deren Investitions- (inkl. Median und Quartilen) bzw. Differenzkosten identifiziert werden.

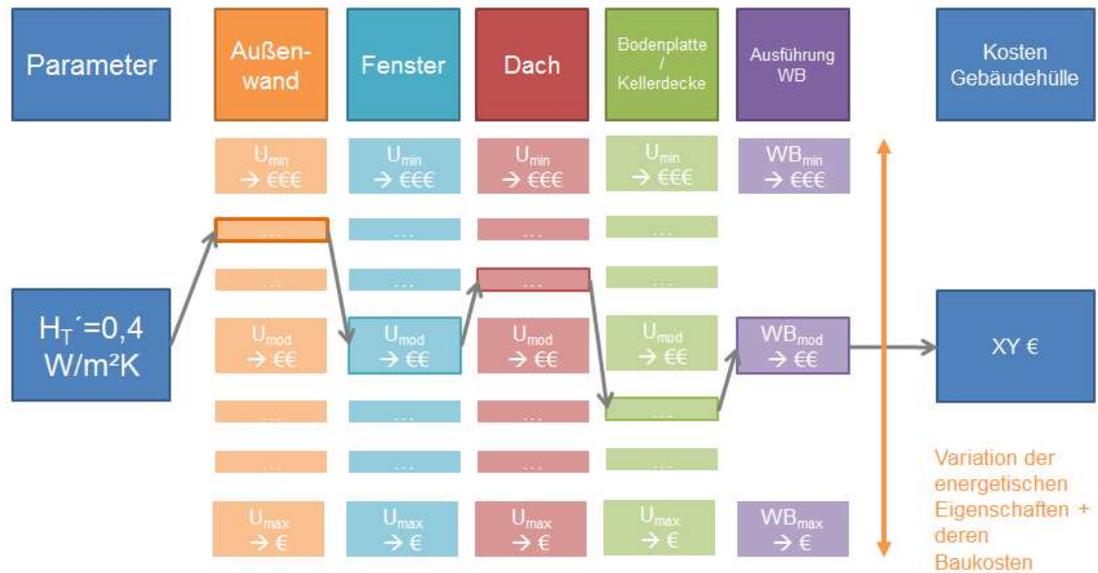


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Parameterstudie Gebäudehülle

Zur monetären Abbildung der Energieeinsparungen müssen im nächsten Schritt die Kosten der Energieversorgung berechnet werden. In Abhängigkeit des energetischen Standards werden die Wärmegestehungskosten der unterschiedlichen Versorgungssysteme, die sich in der Art der Wärmeerzeugung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Wärmeübergabe unterscheiden, ermittelt und mit den Lösungsvarianten der Gebäudehülle kombiniert. Unter Berücksichtigung von ökonomischen Randbedingungen (Energiepreissteigerung, Zinsen) sowie weiteren Kosten für Wartung, Inspektion und Instandhaltung (Betriebskosten) können Kapitalwert und Jahresgesamtkosten der Varianten berechnet werden.

#### 4.1 Energetische und ökologische Bewertung

Der energetischen Bewertung der Varianten liegen die Definitionen der bauphysikalischen und primärenergetischen Anforderungen der EnEV und des Berechnungsverfahrens nach DIN V 18599 zugrunde.

##### 4.1.1 Anforderungen der EnEV (2016 bzw. 2019/2021)

Die Energieeinsparverordnung bildet den rechtlichen Rahmen zur Definition der energetischen Anforderungen an Gebäude. Mit den Höchstwerten für den spezifischen Transmissionswärmeverlust  $H_T$  und den Jahres-Primärenergiebedarf  $Q_p$  werden die thermische Qualität der Gebäudehülle und die energetische Performance des Gebäudes als Hauptanforderungen definiert. Gegenüber der EnEV 2014 wurde zuletzt mit Inkrafttreten der EnEV 2016 eine weitere Verschärfung durchgesetzt. Damit sind gegenwärtig folgende Bedingungen einzuhalten [3]:

- Zur Einhaltung des Grenzwertes der Gebäudehülle ( $H'_{T}$ ) sind der tabellarische Mindestwert der EnEV und der berechnete Wert des Referenzgebäudes (d.h. Ausführung der Gebäudehülle mit Referenzwerten der EnEV für die einzelnen Bauteile) zu prüfen. Maßgebend dabei ist der niedrigere beider Werte, während in der EnEV 2014 nur der Tabellenwert zu berücksichtigen war (für den gegebenen Fall bedeutet dies:  $H'_{T} = 0,4$  für freistehende EFH mit einer Nutzfläche  $\leq 350\text{m}^2$ ).
- Zur Einhaltung des Grenzwertes für den Jahres-Primärenergiebedarf des Gebäudes ( $Q_p$ ) ist der Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes (Referenz-Gebäudehülle in Kombination mit Referenzausführung der Versorgungstechnik) zu ermitteln (entspricht der Anforderung der EnEV 2014) und um 25% zu reduzieren, also mit dem Faktor 0,75 zu multiplizieren.

Für das betrachtete Typengebäude ergeben sich aus diesen Neuerungen für die weiteren Untersuchungen keine Veränderungen hinsichtlich der baulichen Ausführung der Gebäudehülle, da diese sowohl den Mindestanforderungen der EnEV 2014 als auch der EnEV 2016 entspricht. Auswirkung auf die baulichen Kosten durch die EnEV 2016 können daher nicht dargestellt werden. Demgegenüber bedeutet der neue Primärenergie-Grenzwert bereits eine Einschränkung bei der Auswahl geeigneter Versorgungssysteme, was in der Ergebnisauswertung dargestellt wird.

Für eine künftige EnEV 2021 werden im Rahmen dieser Studie im Hinblick auf den in der EU-Gebäudeeffizienzrichtlinie geforderten „Niedrigstenergie-Gebäudestandard“ die Vorgaben an den Transmissionswärmeverlust und Primärenergiebedarf in Anlehnung an den KfW-Förderstandard „Effizienzhaus 55“ (EH 55) definiert, an dem sich die aktuelle politische Diskussion orientiert.

Dieser verlangt für die Gebäudehülle eine Verbesserung um 30% und für den Primärenergiebedarf eine Reduktion um ca. 20% gegenüber der EnEV 2016 (55% gegenüber der EnEV 2014). Nachfolgend sind zum Vergleich die Anforderungen der EnEV-Varianten an das Typengebäude tabellarisch zusammengefasst:

**Tabelle 4: Primär- und Sekundäranforderungen EnEV. Für die EnEV 2021 wird der KfW-EH 55-Standard als Definition des NZEB angenommen.**

Anforderung	EnEV 2014	EnEV 2016	EH 55
Primärenergiebedarf $Q_p$	$\leq Q_p$ des jeweiligen Referenzgebäudes	$\leq 0,75 \times Q_p$ des jeweiligen Referenzgebäudes	$\leq 0,55 \times Q_p$ des jeweiligen Referenzgebäudes
$H'_{T}$ freistehende Wohngebäude mit $A_N \leq 350\text{m}^2$	$\leq 0,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$\leq H'_{T}$ des jeweiligen Referenzgebäudes und $\leq 0,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$\leq 0,7 \times H'_{T}$ des jeweiligen Referenzgebäudes und $\leq 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Neben Gebäudehülle und Primärenergiebedarf wird auch der Anteil erneuerbarer Energien beim Einsatz für die Wärmeversorgung als Nebenbestimmung (Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz, EEWärmeG) geregelt und als Teil der Anforderungen ausgewertet.

#### 4.1.2 Ausführung des Referenzgebäudes

Die Ausführung des Referenzgebäudes erfolgt auf Basis der EnEV 2014/2016. In Anlage 1, Tabelle 1 der EnEV sind die Kennwerte für die Konfiguration der Außenhülle und der Anlagentechnik definiert und in Tabelle 5 zusammengefasst.

**Tabelle 5: Auszug der wichtigsten Kennwerte zur Modellierung des Referenzgebäudes nach EnEV 2014/2016.**

Bauteile / System	Referenzausführung
Außenwände	0,28 W/(m <sup>2</sup> K)
Fenster	U <sub>w</sub> = 1,3 W/(m <sup>2</sup> K) und g = 0,6
Dach, oberste Geschossdecke	0,20 W/(m <sup>2</sup> K)
Kellerdecke	0,35 W/(m <sup>2</sup> K)
Außentüren	1,8 W/(m <sup>2</sup> K)
Wärmebrückenzuschlag	0,05 W/(m <sup>2</sup> K)
Heizungsanlage	Brennwertkessel, Heizöl
Warmwasseraufbereitung	gemeinsame Wärmebereitung mit Heizungsanlage
Kühlung	keine
Lüftung	zentrale Abluftanlage

#### 4.1.3 Energiebedarfsberechnungen nach DIN V 18599

Zur Berechnung der Energiebedarfe wird das Berechnungsverfahren entsprechend der DIN V 18599 verwendet. Die Berechnungen erfolgen mit der Software „ZUB-Helena“. Die Eingaben beruhen auf der gegebenen Gebäudegeometrie, den aus der EnEV abgeleiteten bauphysikalischen Eigenschaften, den angesetzten Anlagenvarianten und den klimatischen und nutzungsspezifischen Rahmenbedingungen entsprechend den Vorgaben der DIN V 18599.

Zur Ermittlung spezifischer Kennwerte für die unterschiedlichen Kostentypen werden die Energiebedarfe für verschiedene Bilanzgrenzen ausgewiesen. Für die energetische Bewertung - im Vergleich und bzgl. der gesetzlichen Anforderungen - sind dabei die End- und Primärenergiewerte entscheidend. Zusätzlich werden außerdem die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Basis der Endenergie-Werte berechnet, die in der politischen Diskussion hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele eine Rolle spielen. Die Ergebnisse gehen dann in die Wirtschaftlichkeitsbewertung der Investitionen zur Berechnung der Jahresgesamtkosten ein.

### Nebenanforderung EEWärmeG

Die EnEV beinhaltet seit 2009 zusätzlich zu den Kriterien für die Gebäudehülle und den Primärenergiebedarf mit dem Erneuerbare-Energien-Wärmegegesetz (EEWärmeG) eine Nebenanforderung, die einen Mindestbeitrag an erneuerbaren Energien bei der Wärmebereitstellung von Heizung und Warmwasser regelt.

Mit dem EEWärmeG sind Eigentümer von Gebäuden mit einer Nutzfläche von mehr als 50 m<sup>2</sup>, welche neu errichtet werden, dazu verpflichtet, den Wärme- und Kälteenergiebedarf anteilig durch Nutzung erneuerbarer Energien zu decken. Als erneuerbare Energien im Sinne dieses Gesetzes gelten Geothermie, Umweltwärme, solare Strahlungsenergie und Biomasse. Bei Verwendung dieser Energie muss der Anteil am Gesamtenergieverbrauch mindestens die Anforderungen aus Tabelle 6 erfüllen. Statt der Erfüllung des Deckungsgrades an erneuerbarer Energien, kann das EEWärmeG auch mit Ersatzmaßnahmen entsprechend Tabelle 7 eingehalten werden [7].

Die Untersuchungsvarianten werden auch hinsichtlich der aktuellen Kriterien des EEWärmeG berechnet. Annahmen für einen Ansatz ab 2021 werden an dieser Stelle nicht getroffen, da das EEWärmeG in die künftige Einsparverordnung integriert werden soll.

**Tabelle 6:      Hauptanforderung an die Integration von erneuerbaren Energien in die Versorgung von Gebäuden gemäß EEWärmeG [7]. Dies gilt als erfüllt, wenn folgende Mindestwerte eingehalten werden.**

Erneuerbare Energie	Deckungsgrad
Solare Strahlungsenergie	15 %
Biomasse	30 % bei gasförmiger Biomasse 50 % flüssiger und fester Biomasse
Geothermie	50 %

**Tabelle 7: derzeitige Ersatzmaßnahmen EEWärmeG [7].**

Ersatzmaßnahme	Anforderung
Deckung des Wärme- und Kälteenergiebedarfs durch Nutzung technischer Abwärme oder aus Kraft- Wärme- Koppelungsanlagen	Deckungsgrad mindestens 50 %
Einsparung von Energie	Unterschreitung der Anforderungen an den Primärenergiebedarf, sowie an die Wärmedämmung der Gebäudehülle der jeweils geltenden Energieeinsparverordnung um mindestens 15 %
Unmittelbarer Anschluss an Fernwärme- oder Fernkältenetze	Erfüllung des jeweiligen Deckungsgrades, welcher für die Erneuerbare Energiequelle gültig ist

## 4.2 Ökonomische Bewertung

Zur ökonomischen Bewertung der energetischen Baustandards nach EnEV 2016 und EH 55 werden im Detail nur die energetisch relevanten Kosten für die Gebäudehülle und Anlagentechnik betrachtet. Die Bauwerkskosten, entsprechend den Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 (KG 300 und KG 400), werden daher nur in Teilen abgebildet, können aber durch die Bauwerkskostendifferenz, die für alle Varianten gleich ist, vervollständigt werden. Damit können die Kostenentwicklungen allein für die energetischen Maßnahmen als auch im Bezug zu den Gesamtbaukosten dargestellt werden. Als Kenngröße werden für die vereinbarten Varianten jeweils die Jahresgesamtkosten mit deterministischen Rahmenbedingungen ausgewiesen.

### 4.2.1 Kostenermittlung

Die Feststellung der Kostenwerte (Bundesdurchschnitt, inkl. Mehrwertsteuer, Kostenstand: 1. Quartal 2016) für die jeweiligen Bauteilkonstruktionen und Versorgungsvarianten erfolgte im Wesentlichen auf Grundlage der kontinuierlich aktualisierten Kosten- und Preisdatenbanken der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes

Bauen e.V.<sup>1</sup>. Diese Primärdaten wurden zusätzlich noch durch die Erfassung der gängigen Baupraxis von fertiggestellten und abgerechneten Neubauvorhaben ergänzt. Außerdem wurden in Zusammenhang mit der vorliegenden Untersuchung über „Wirtschaftlichkeit von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie-Gebäudestandard“ insbesondere in Bezug auf die Außenwandkonstruktionen supplementäre Datenerhebungen durchgeführt. Bei diesen Detaildatenerhebungen wurden zusätzliche Daten von Produktherstellern, verarbeitenden Unternehmen und Fachfirmen erfasst und ausgewertet.

Hierdurch konnte auf Basis der produktbezogenen aktuellen Preis- und Kostenangaben unter Berücksichtigung von entsprechenden Fracht-/Abladegebühren sowie praxismgerechten Arbeitszeitrichtwerten und Lohnkosten unter Ansatz einer einheitlichen Wagnis- und Gewinnbetrachtung ein spezifischer Datenabgleich mit den primären Kostenwerten erfolgen.

Dieses Verfahren der Konvergenzbetrachtung hat den Vorteil einer hohen statistischen Sicherheit. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die vorgenannten Auswertungen immer auch eine Plausibilitätsprüfung sowie einer Bewertung der Angemessenheit von berechneten und erzielten Kosten beinhalten.

Zur Überprüfung der auf Grundlage der beschriebenen Primärdaten ermittelten Ergebnisse wurden diese mit Untersuchungsergebnissen aus Datenerhebungen und Auswertungen von anderen Instituten, Institutionen und Forschungseinrichtungen verglichen. Beispielsweise erfolgte eine umfangreiche Sekundäranalyse auf Basis der sirAdos Baudaten und der Angaben des Baukosteninformationszentrums Deutscher Architektenkammern (BKI).

Die im Rahmen dieser Untersuchung erfassten bzw. zur Verfügung stehenden Primärdaten verteilen sich auf das gesamte deutsche Bundesgebiet. Hierbei entsprechen die jeweiligen Datensegmente anteilig weitestgehend der vom Statistischen Bundesamt erhobenen Bautätigkeit in den einzelnen Bundesländern [8]. Um aus diesen regionalen Daten durchschnittliche Kostenwerte für ganz Deutschland abzuleiten, wurden diese mit regionalen Kostenfaktoren unter Berücksichtigung des Kos-

---

<sup>1</sup>Hinweis: Seit ihrer Gründung im Jahr 1946 finden jährliche Auswertungen und Berichte über die regionale und überregionale Bautätigkeit sowie die Erfassung spezifischer und bauwirtschaftlicher Daten statt. Gleichzeitig werden beispielsweise Preis-/Kostendatenbanken geführt, die auf der Analyse abgerechneter Baumaßnahmen beruhen. Diese werden in einem regionalen aber auch überregionalen Archiv mit Vergleich von nationalen Daten erfasst. Die Begleitung der Pilot- und Demonstrativbauvorhaben der Bundesrepublik Deutschland seit 1950 mit den Schwerpunkten der 50er, 60er, 70er und Anfang der 80er Jahre, die Begleitung und Evaluation der mit Schwerpunkt Energie- und Ressourcenschutz geplanten Projekte ab der 1990er Jahre sowie die Bestandserfassung der selbst durchgeführten Gebäudetypisierungen werden ebenfalls laufend ausgewertet.

tenaufwandes von individuellen sowie gebäude- und regionalspezifischen Besonderheiten abgeglichen<sup>2</sup>. Die aufgeführten Kostenangaben beinhalten die gesetzliche Mehrwertsteuer (Bruttokosten).

Die Kostenwerte stehen im direkten Zusammenhang mit den im Bauforschungsbericht Nr. 68 [9] der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. veröffentlichten Kennzahlen und Rahmendaten der Zusatzvariante des für den Einfamilienhausbau in Deutschland definierten Typengebäudes, welches ebenfalls unter dem Punkt 5.1 der vorliegenden Untersuchung zusammenfassend beschrieben und dargestellt wird.

#### 4.2.2 Investitionskosten

Die Investitionskosten des Typengebäudes werden in verschiedene Kostengruppen unterteilt, um die energiebedingten Mehrkosten für die Gebäudehülle, Versorgungstechnik und sonstige bauliche Kosten differenziert darzustellen. Die Kosten teilen sich damit folgendermaßen auf:

- Investitionskosten Bauwerkskostendifferenz
- Investitionskosten Versorgung
- Investitionskosten Gebäudehülle

Für alle Varianten gleich ist die „Bauwerkskostendifferenz“, die all diejenigen Kosten umfasst, die nicht die energetische Qualität des Gebäudes definieren, also ohne Gebäudehülle und Versorgungstechnik.

Die Kosten der Versorgungstechnik werden für sieben typische Anlagenvarianten ausgewiesen, die sich nach Hauptwärmeerzeuger, Warmwasserbereitung, Lüftung und Übergabesystem unterscheiden und verschiedene Effizienz ausweisen. Mit dem Fokus auf die Kosten der Gebäudehülle werden in einer Variantenmatrix alle möglichen Kombinationen der einzelnen Bauteile (Außenwand, Fenster, Kellerdecke, Dach, Tür) entsprechend deren thermischen Eigenschaften und Anforderungen gebildet und die dazugehörigen Kosten berechnet.

Die Ergebnisse werden nach energetischer Qualität der Gebäudehülle und den dazu notwendigen Investitionskosten sortiert und zusätzlich die Medianwerte sowie die oberen und unteren Quartile als Minimal-/ Maximal-Werte dargestellt. Damit lassen sich auch die Mehrinvestitionskosten in Abhängigkeit verschiedener energetischer Standards der Gebäudehülle ausweisen.

---

<sup>2</sup> Bewertungsgrundlage: Baukosten, Baupreise und Regionalfaktoren aus den Datenbanken der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. im Abgleich mit sirAdos Ortsfaktoren und Angaben des Baukosteninformationszentrums Deutscher Architektenkammern (BKI) zu Regionalfaktoren in Deutschland.

Zum Vergleich der aus der Investition entstehenden jährlichen Kapitalkosten und zur Kalkulation der jährlichen Gesamtkosten müssen die Annuitäten aus den Anfangsinvestitionen ermittelt werden, die Zinsen, Preissteigerungen und einen definierten Betrachtungszeitraum berücksichtigen.

### 4.2.3 Jahresgesamtkosten

Die einfache Betrachtung der Investitionskosten ermöglicht zunächst keine Aussagen über den Nutzen einer Investition. Bei der Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden kann der Nutzen in Form der Energieeinsparung berechnet und monetär bewertet werden. Werden zusätzlich die weiteren Kosten (z.B. aus Betrieb, Wartung und Instandhaltung) berücksichtigt, können die Gesamtkosten einer Investition berechnet und – bei Definition eines einheitlichen Betrachtungszeitraums - als Jahresgesamtkosten abgebildet werden. Wird dies für verschiedene Varianten durchgeführt, ergibt sich die wirtschaftlichste Maßnahme im Vergleich durch die geringsten Jahresgesamtkosten. In die Berechnungen gehen Preis- (z.B. für Energiepreise) und Zinsänderungen (z.B. effektiver Kapitalzins) innerhalb des Betrachtungszeitraums mit ein. Die Berechnung der Annuitäten für die einzelnen Kostenarten wird wie folgt durchgeführt:

#### Kapitalkosten

Die Annuität der kapitalgebundenen Kosten ergibt sich aus der Anfangsinvestition  $A_0$  zuzüglich der Barwerte von möglichen Ersatzinvestitionen ( $A_1 \dots A_n$ ) und abzüglich eventueller Restwerte ( $R_w$ ), multipliziert mit dem Annuitätenfaktor  $a$ .

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - R_w) \cdot a$$

$A_{N,K}$	Annuität der kapitalgebundenen Kosten
$A_0$	Anfangsinvestition
$A_1 \dots A_n$	Barwert der ersten, zweiten, n-ten Ersatzinvestition
$R_w$	Restwert
$a$	Annuitätenfaktor

Vereinfachend wird in den nachfolgenden Berechnungen zu den Jahresgesamtkosten von einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ausgegangen. Die technische Lebensdauer der Baukonstruktion liegt bei mindestens 50 Jahren und mehr, die Lebensdauer der Hauptkomponenten der Versorgungstechnik liegt für alle betrachteten Varianten bei etwa 20 Jahren, bevor mit Ersatzinvestitionen zu rechnen ist.

Ersatzbeschaffungen werden nicht in den Berechnungen berücksichtigt, da künftige Investitionen in die Versorgungstechnik aufgrund der technischen und gesetzlichen dynamischen Veränderungen vom gegenwärtigen Zeitpunkt nicht sinnvoll bewertet werden können. Ohne Ersatzinvestitionen und Restwerte werden die Annuitäten damit wie folgt berechnet:

$$A_{N,K} = A_0 \cdot a$$

Der Wert des Annuitätenfaktors wird dabei mit folgender Formel ermittelt:

$$a = \frac{r}{1-r^T}$$

r            Zinsfaktor

T            Betrachtungszeitraum

## Energiekosten

Zur Berechnung der Energiekosten werden die Endenergiebedarfe für alle verwendeten Energieträger ermittelt und mit den jeweiligen Energiepreisen multipliziert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Endenergiebedarfe für Öl, Gas und Holz auf ihren Brennwert bezogen und auf den Heizwert umzurechnen sind. Als Energiepreise werden statistische Auswertungen des BMWi für die Energieträger Öl, Gas, Strom und Fernwärme verwendet [10]. Die Preise für Holzpellets wurden Preisübersichten von CARMEN e.V. entnommen [11].

**Tabelle 8: Verbraucherpreise der verschiedenen Energieträger in €/kWh für Haushalte im Jahr 2015 [10] [11].**

Energieträger	Energiepreise [€/kWh]
Heizöl (Brennwert)	0,056
Erdgas	0,071
Strom	0,292
Fernwärme	0,089
Holzpellets	0,050

Für die Bewertung über den gesamten Betrachtungszeitraum von 20 Jahren sind wiederum die Annuitäten der Zahlungen zu bilden. Dazu werden Preissteigerungen und Zinsen im Barwert- bzw. Annuitätenfaktor berücksichtigt.

$$A_{N,E} = A_{E,0} \cdot a \cdot b$$

$A_{N,E}$  Annuität der Energiekosten

$A_{E,0}$  Energiekosten im ersten Jahr

$a$  Annuitätenfaktor

$b$  Barwertfaktor

Der Barwertfaktor gilt dabei folgender Zusammenhang:

$$\text{für } r_i \neq r \quad b = \frac{r-1}{1-r^T}$$

$$\text{für } r_i = r \quad b = \frac{T}{r}$$

$b$  Barwertfaktor

$r_i$  Preisänderungsfaktor/ Inflationsrate

## Betriebs- und Instandhaltungskosten

Die Betriebskosten umfassen den jährlichen Aufwand für Wartung, Instandhaltung und Inspektion der Versorgungstechnik. Diese werden anteilig über die Investitionskosten summe für Teilkomponenten des Versorgungsystems anhand von Tabellenwerten (VDI 2067 Blatt 1) ermittelt [12]. Soweit möglich und nötig, wurden die Werte der VDI-Richtlinie angesetzt und bei Bedarf durch Annahmen in Anlehnung an die VDI ergänzt.

Die Annuitäten ergeben sich wiederum aus den aktuellen Betriebskosten, dem Barwert- und Annuitätenfaktor.

$$A_{N,B} = A_{IN} \cdot a \cdot b$$

$A_{N,B}$  Annuität der Betriebskosten

$A_{IN}$  Kosten für Wartung und Instandhaltung im ersten Jahr

$$A_{IN} = A_0 \cdot f_{IN}$$

$f_{IN}$  Faktor für den Aufwand bei Wartung, Instandhaltung und Inspektion

**Tabelle 9: rechnerischer Ansatz des Aufwands für Inspektion, Wartung und Instandsetzung für verschiedene Anlagenkomponenten nach VDI 2067 (Auszug) [12].**

Anlagenkomponente	Aufwand für in Instandsetzung	Aufwand für Wartung und Inspektion
Gas-Brennwertkessel	1,0%	1,5%
Holzpelletkessel	3,0%	3,0%
Wärmepumpe LW	1,0%	1,5%
Wärmepumpe WW	1,0%	1,5%
Hausübergabe FW	2,0%	1,0%
Trinkwasserspeicher	1,0%	1,0%
Solarkollektoren	0,5%	1,0%
Platten-WRG	2,0%	10,0%
Ventilator	2,0%	5,0%
Umwälzpumpen	2,0%	1,0%

### 4.3 Ökonomische Randbedingungen

Die ökonomische Bewertung der energetischen Gebäudestandards erfolgt auf Basis der absoluten Investitions- und Energiekosten und der jährlichen Gesamtkosten (Annuitäten). In die Berechnung der jeweiligen Indikatoren gehen verschiedene Annahmen von Rahmenbedingungen als Parameter ein. Berücksichtigt sind:

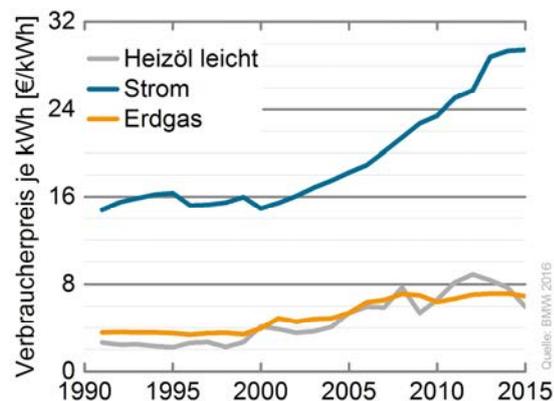
- Energiepreise
- Energiepreissteigerung
- Kapitalzins
- Gesamtinflation
- Nutzungsdauer bzw. Betrachtungszeitraum

Die Ansätze und Annahmen für die einzelnen Parameter werden nachfolgend dargestellt.

### **Energiepreise und Energiepreissteigerung**

Eine Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen kann nur erreicht werden, wenn künftige Einsparungen durch niedrigere Energiekosten die investiven Mehrkosten kompensieren oder übertreffen. Entscheidend hierfür ist neben dem geringeren Energiebedarf/-verbrauch der Energiepreis. Die weltweit zunehmende Nachfrage nach Energie und die gleichzeitige Verknappung der Rohstoffe hat in den letzten 15 Jahren für einen deutlichen Anstieg der Energiepreise gesorgt, die deutlich über der allgemeinen Preisinflation lag (siehe Abbildung 10). Auch wenn die vergangenen beiden Jahre aufgrund geopolitischer Besonderheiten für eine Entspannung bei der Preisentwicklung gesorgt haben, ist mittelfristig wieder mit deutlich steigenden Preisen, insbesondere für fossile Energien, zu rechnen.

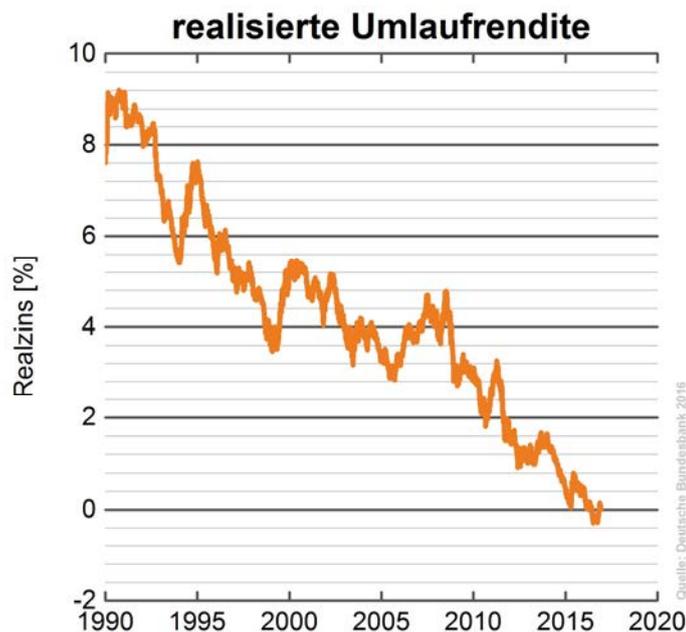
Im Rahmen dieser Studie wird ein vorsichtiger Preisanstieg von 3% gewählt, der leicht über der allgemeinen Inflation und der Zinsentwicklung liegt, aber niedriger ist als in den Jahren 2000-2014, um die aktuellen Tendenzen zu berücksichtigen. Höhere Steigerungsraten führen im Ergebnis zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit von Effizienzmaßnahmen und umgekehrt.



**Abbildung 10: Entwicklung der Endverbraucherenergiepreise von 1990 bis 2015 für unterschiedliche Energieträger [10].**

## Kapitalzins

Die Umlaufrendite ist die durchschnittliche Rendite aller im Umlauf befindlichen inländischen festverzinslichen Bundeswertpapiere mit einer Laufzeit von mindestens 3 und maximal 30 Jahren. Sie gilt als Maß für den Nominalzinssatz, der zusammen mit der Inflationsrate vereinfacht zur Ermittlung des Realzinssatzes führt. Hierbei wird die Inflationsrate vom Nominalzins abgezogen, um eine inflationsbereinigte Bewertung zu ermöglichen. Wie stark der Realzins schwanken kann, zeigt sich anhand der Zinszyklen mit Auf- und Abschwungphasen, die in Abbildung 11 für die Umlaufrendite dargestellt sind. Mit der Finanzkrise 2008 rutschte die Umlaufrendite und in Deutschland auf ein Niveau von unter zwei Prozent pro Jahr. Seit einigen Monaten liegt diese sogar im negativen Bereich [13].



**Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung der realisierten Umlaufrendite im Zeitraum 1990 bis 2015 [13].**

Für die Berechnungen der Jahresgesamtkosten wurde in dieser Studie ein Kapitalzins von 2% angesetzt, mit dem der Kapitalwert gegenwärtiger und künftiger Zahlungen ermittelt und mit Hilfe des Annuitätenfaktors über den Betrachtungszeitraum verteilt werden kann.

Höhere Zinsen führen zu steigenden Kapitalkosten und damit einer ungünstigeren Wirtschaftlichkeit, während niedrigere Zinsen diese verbessern. Die aktuellen Förderprogramme der KfW-Bank für energieeffiziente Neubauten und Sanierungen sind durch Tilgungszuschüsse und niedrige Zinssätze dementsprechend konzipiert.

### **Gesamtinflation**

Die allgemeine Preisinflation geht in die Berechnungen der Betriebs- und Instandhaltungskosten ein. Die Steigerungsrate wird hier mit 1,5% berücksichtigt und umfasst sowohl die Kosten für Material als auch für Arbeit. Höhere Raten bewirken einen Anstieg der laufenden Kosten und reduzieren die Wirtschaftlichkeit.

### **Nutzungszeit/ Betrachtungszeitraum**

Den Berechnungen der annuitären Kosten liegt ein Betrachtungszeitraum von 20 Jahren entsprechend der VDI 2067 zugrunde, da für alle betrachteten Anlagenkomponenten von einer entsprechenden technischen Lebensdauer ausgegangen werden kann [12]. Für die Gebäudehülle liegt diese deutlich darüber ( $\geq 50a$ ). Bei einem aktuell durchschnittlichen Lebensalter des Käufers von ca. 40 Jahren [14] beim

Immobilienwerb entsprechen 20 Jahre üblichen Zinsbindefristen bzw. Finanzierungslaufzeiten, die vor Renteneintritt geleistet werden sollten.

Re- oder Ersatzinvestitionen werden hier bewusst nicht berücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass die technischen Entwicklungen und ordnungspolitischen Anforderungen weiter fortschreiten und Annahmen hinsichtlich Kosten und Konfiguration künftiger Anlagen nur eingeschränkt möglich sind. Die Restwerte der Gebäudehülle werden aufgrund der ähnlich hohen Lebensdauer von Außenwandkonstruktionen und der verwendeten Mediankosten als gleichwertig betrachtet und im Weiteren daher nicht berücksichtigt.

Längere Betrachtungszeiträume, wie beispielsweise in der EU-Direktive formuliert, bewirken eine günstigere Bewertung der jährlichen Gesamtkosten, da die erzielten Einsparungen über einen längeren Zeitraum abgebildet werden.

#### 4.4 Ökologische Randbedingungen

Die energetische und ökologische Bewertung des Gebäudes wird für die verschiedenen Bilanzgrenzen anhand Nutz-, End- und Primärenergie durchgeführt, um entlang der einzelnen Bilanzgrenzen die energetische Qualität ganzheitlich abzubilden. Zusätzlich werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen für alle Versorgungsvarianten ausgewiesen. Hierzu sind verschiedene Umrechnungs- und Bewertungsfaktoren in den Berechnungen anzuwenden.

##### Brennwert / Heizwert

Die Berechnungen des Endenergiebedarfs der brennstoff-bezogenen Versorgungsvarianten (Öl-/ Gas-Brennwertkessel, Holzpelletkessel) berücksichtigen den Brennwert der jeweiligen Energieträger, während sich die angegebenen PE- und CO<sub>2</sub>-Faktoren und auch die Energiepreise auf den Heizwert beziehen. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Versorgungssysteme und zur korrekten Darstellung der energetischen Kennwerte und Kosten werden die in Tabelle 10 gelisteten Umrechnungsfaktoren verwendet [15].

**Tabelle 10: Brennwert / Heizwert für Umrechnung der Endenergiewerte [15].**

Faktor	Gas	Heizöl	Holzpellet
Brennwert / Heizwert	1,11	1,06	1,08
Heizwert / Brennwert	0,901	0,943	0,926

## Primärenergiefaktoren

Die Primärenergie berücksichtigt den Energieaufwand der Energieträger, der für deren Bereitstellung aus allen Vorketten/ Prozessen (Rohstoffgewinnung, Aufbereitung, Lieferung, Umwandlung, etc.) notwendig ist. Zur einfachen Kalkulation stehen Primärenergiefaktoren zur Verfügung, die mit den Endenergiewerten der jeweiligen Energieträger multipliziert werden. Zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs werden die aktuell gültigen Faktoren der DIN V 18599 (Tabelle 11) verwendet [15]. Über den Verlauf von 20 Jahren ist auch hier mit Veränderungen durch den weiteren Ausbau und die Integration von erneuerbaren Energien bei der Strom- und eventuell Gasversorgung (Power to Gas) zu rechnen. Entsprechende Szenarien werden in den Kalkulationen aufgrund der Komplexität des Energieversorgungssystems nicht abgebildet.

**Tabelle 11: Primärenergiefaktoren nach Energieträger (DIN V 18599) [15].**

PE-Faktor	Strom	Gas	Heizöl	Holzpellet	Fernwärme
$f_p$ [-]	1,8	1,1	1,1	0,2	0,7

## CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren

Mit der Bestimmung des Primärenergiebedarfs wird die Effizienz der Gesamtversorgung von der Gewinnung des Energieträgers bis hin zur Nutzenübergabe beschrieben. Aussagen zur Umwelt- bzw. Klimawirkung sind aufgrund der unterschiedlichen Prozessketten und Systeme nur eingeschränkt möglich: Eine hohe Systemeffizienz bedingt in der Regel auch niedrigere Auswirkungen auf die Umwelt. Auf Basis von Emissionsfaktoren können die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Varianten berechnet und die Klimawirkung beurteilt werden. Grundlage sind hier Angaben des Bundesgesetzblattes [16] und des Umweltbundesamtes [17].

**Tabelle 12: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren nach Energieträger [16] [17].**

CO <sub>2</sub> -Emissionen	Strom-Mix	Gas	Heizöl	Holzpellet	Fernwärme
$f_{CO_2}$ [kg/kWh <sub>EE</sub> ]	0,58	0,25	0,32	0,034	0,20

## 5 Anwendungsbeispiel: Typengebäude Einfamilienhaus (EFH)

Wie im Untersuchungsansatz in den einleitenden Kapiteln erläutert, erfolgen die Berechnungen anhand eines Typengebäudes. Eine Datenauswertung von einzelnen Gebäuden kann grundsätzlich insbesondere bei Detailbetrachtungen zu aufschlussreichen Ergebnissen führen. Allerdings handelt es sich bei solchen Einzelanalysen aufgrund der ggf. vorhandenen Besonderheiten des Projektes i.d.R. nicht um repräsentative Aussagen, so dass diese nicht ohne weiteres auf den Wohnungsbau in Deutschland übertragen werden können. Selbst bei einer Vielzahl von ausgewerteten Beispielgebäuden einer bestimmten Größenordnung sind die gebäudespezifischen Besonderheiten (z.B. besondere Einbau- oder Gründungssituationen, individuelle Bauausführungen u.a. ohne oder mit Kellergeschoss sowie verschiedene Umsetzungen in Bezug auf Barrierefreiheit und hinsichtlich des energetischen Standards etc.) von so großer Bedeutung, dass die Ergebnisse nur in sehr weiten Spannen dargestellt und somit lediglich in ihrer Tendenz gewertet werden können.

Um in der vorliegenden Untersuchung zu repräsentativen und übertragbaren Ergebnissen zu kommen, werden deshalb alle Berechnungen und Auswertungen auf die Rahmendaten des im Folgenden definierten Typengebäudes bezogen. Dieses stellt kein auf Einzelauswertungen beruhendes Beispielgebäude dar, sondern spiegelt vielmehr das auf Grundlage von aktuellen Statistiken, Marktbeobachtungen und einer differenzierten Bautätigkeitserfassung bestimmte Mittel (z.B. durchschnittliche Größe, Ausführung und Ausstattung) für den deutschen Einfamilienhausbau in der derzeitigen Baupraxis wider.

### 5.1 Definition

Aus den bereits vorstehend genannten statistischen Erkenntnissen, allgemeinen Marktbeobachtungen und Datenauswertungen zum Einfamilienhausbau in Deutschland, werden in Verbindung mit bedarfsgerechten Ansätzen die Rahmendaten für das Typengebäude definiert. Somit ergibt sich aus den folgenden Festlegungen in ihrer Gesamtheit die Basis für eine praxisbezogene Umsetzungsbetrachtung.

#### **Eckdaten für das Typengebäude – Einfamilienhaus**

Festlegungen auf Grundlage der aktuellen Wohnungsbausituation:

- Einfamilienhaus im mittleren Qualitätssegment
- Einbausituation: Freistehend
- Anzahl Wohnungen: 1 WE
- Ø Wohnungsgröße: ca. 146 m<sup>2</sup>
- Überwiegend 4 bis 5 Wohnräume

Ergänzende Festlegungen auf Grundlage bedarfsgerechter Ansätze:

- Einzelhaus mit zwei Vollgeschossen
- Erschließung: Innenliegende Treppe
- Betrachtete Variante: Pultdach/mit Kellergeschoss

### 5.1.1 Beispielhafte Darstellung

Um die vorgenannten Rahmendaten des Typengebäudes EFH zu veranschaulichen, wurde in Zusammenarbeit mit externen Planern und Architekten eine beispielhafte Darstellung entwickelt. Die sich hieraus ergebenden Ansichten und Grundrisse stellen die betrachtete Variante einer Umsetzungsmöglichkeit dar. Diese Variante könnte aber auch je nach Bedarf um zusätzliche bauliche Aspekte erweitert werden.

In Tabelle 13 sind die wichtigsten Kennwerte und Bauteilflächen des gewählten Typengebäudes EFH zusammengefasst. In Abbildung 12 folgen die Ansichten und Grundrisse des Gebäudes.

**Tabelle 13: Auszug der wichtigsten Kennwerte sowie Flächen des Typengebäudes.**

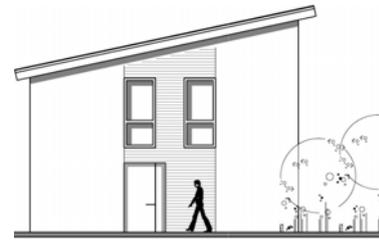
beheiztes Volumen $V_e$	565 m <sup>3</sup>
Gebäudenutzfläche $A_n$ (nach EnEV)	181 m <sup>2</sup>
Nettogrundfläche NGF	148 m <sup>2</sup>
Gebäudehüllfläche $A$	427 m <sup>2</sup>
$A/V_e$	0,76 m <sup>-1</sup>
Spezifischer Transmissionswärmeverlust $H'_{T, Ref}$	0,429 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Keller	unbeheizt

**Tabelle 14: Auszug der wichtigsten Kennwerte sowie Flächen des Typengebäudes.**

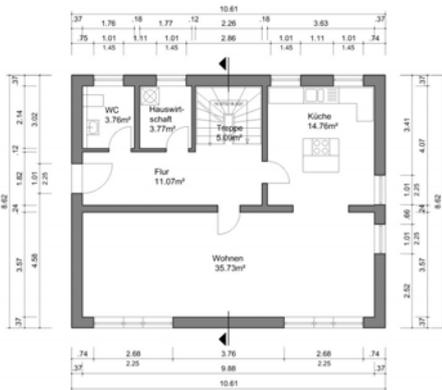
<b>Bauteil</b>		<b>Fläche [m<sup>2</sup>]</b>
Kellerdecke		91,5
Dach (gesamt/ thermische Hülle)		114,0 / 93,6
Süd	Außenwand	54,3
	Fenster	21,2
Ost	Außenwand	44,2
	Fenster	9,1
Nord	Außenwand	42,2
	Fenster	13,3
West	Außenwand	46,4
	Fenster	4,6
	Tür	2,3



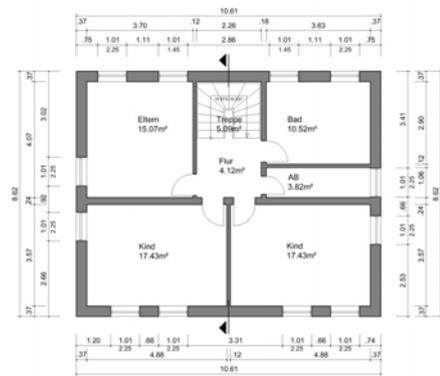
Ansicht Gartenseite



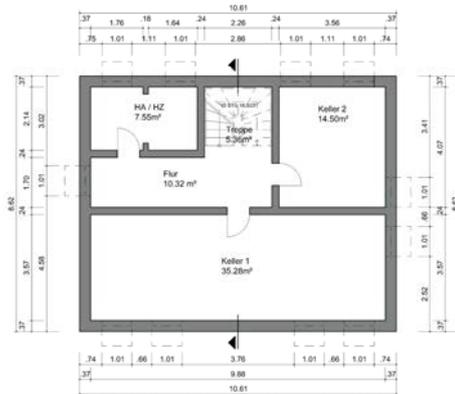
Ansicht Giebelseite / Eingang



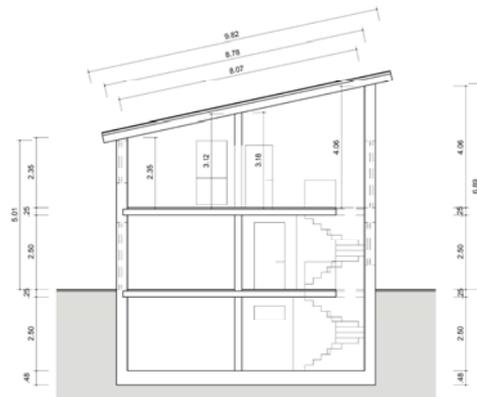
Grundriss Erdgeschoss



Grundriss Obergeschoss



Grundriss Kellergeschoss



Gebäudeschnitt

**Abbildung 12: Ansichten und Grundrisse des Typengebäudes. Orientierung des Eingangs nach Osten.**

## 5.1.2 Gebäudehülle: Auswahl der Bauweisen und Konstruktionen

### Außenwände

Um neben der Gebäudegeometrie auch eine möglichst repräsentative Definition der Gebäudehülle zu erhalten, wurden verschiedenste Bauweisen der Außenwände definiert und ihre Kosten bei den Berechnungen betrachtet. Diesen liegen verschiedene für den Einfamilienhausbau repräsentative Mauerwerkskonstruktionen zugrunde. Zur Darstellung der Ergebnisse in diesem Bericht werden die Medianwerte der einzelnen Außenwandtypen entsprechend der jeweiligen Marktanteile (aus Daten des statistischen Bundesamtes) ermittelt. In Tabelle 15 sind die untersuchten Konstruktionen zusammengefasst.

**Tabelle 15: Gewählte Konstruktionen der Außenwände**

Bauweise	Konstruktionen
Monolithisches Mauerwerk	Hochlochziegel mit und ohne mineralischer Füllung Porenbeton Mauerwerk Leichtbeton Mauerwerk mit und ohne mineralischer Füllung
Mauerwerk mit WDVS	Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem

Für die Durchführung der Parameterstudie wurden für die gewählten Bauweisen in folgenden sechs verschiedenen energetischen Niveaus mit folgenden U-Werten ausgeführt:

- 0,30 W/(m<sup>2</sup>·K)
- 0,28 W/(m<sup>2</sup>·K) (entspricht Anforderungen Referenzgebäude nach EnEV)
- 0,24 W/(m<sup>2</sup>·K)
- 0,20 W/(m<sup>2</sup>·K)
- 0,18 W/(m<sup>2</sup>·K)
- 0,15 W/(m<sup>2</sup>·K)

### Sonstige Bauteile der Gebäudehülle

Neben den Außenwänden sind für die Definition der Gebäudehülle für das Typengebäudes EFH weitere Annahmen für folgende Bauteile und Kennwerte notwendig:

- Fenster
- Haustüre
- Kellerdecke
- Dach
- Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$

Die Konstruktionen dieser Bauteile sind für die drei betrachteten Bauweisen der Außenwände jedoch identisch. Eine Variation erfolgt dabei nur über die energetischen Eigenschaften.

### Bauteilkosten

In nachfolgender Abbildung 13 sind die für die ökonomische Bewertung angesetzten Bauteilkosten der zuvor definierten Konstruktionen zusammengefasst. Die Kostenermittlung erfolgte durch die ARGE Kiel wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Die Angaben beziehen sich auf den Kostenstand 1. Quartal 2016 und beinhalten die gesetzliche Mehrwertsteuer (Bruttokosten). Über die reine Kostenauswertung hinaus, wurden alle Ergebnisse einer nachstehenden Plausibilitätsprüfung unterzogen (u.a. Datenabgleich z.B. mit BKI, IWU, VZ, aktuellen Forschungsarbeiten z.B. „EnEV 2017 – Vorbereitende Untersuchungen“ von Prof. Dr. Maas sowie durch Experteninterviews).

Die angesetzten Bruttokosten entsprechen den Medianwerten der jeweils ermittelten Kostenspanne pro Bauteil und Konstruktion.

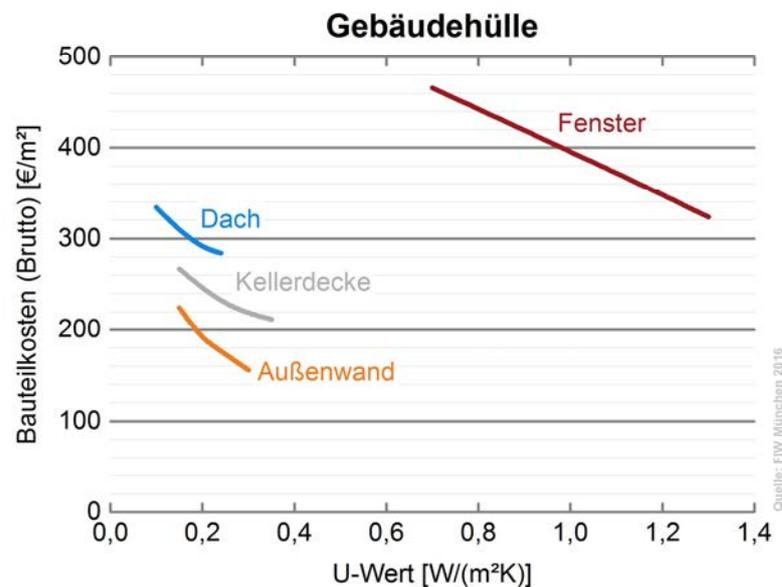


Abbildung 13: flächenbezogene Brutto-Bauteilkosten (Median) in Abhängigkeit des Wärmedurchgangs für die bestimmenden Bauteile der Gebäudehülle.

## Mehrkosten: Ausführung Wärmebrücken

Für die Berücksichtigung der konstruktiven Ausführung der Wärmebrücken im Typengebäude wurden drei verschiedene Ansätze des Wärmebrückenzuschlags  $\Delta U_{WB}$  definiert und in Tabelle 16 zusammengefasst. Als Basisfall wird ein Zuschlag von  $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angesetzt. Dieser entspricht dem Nachweis der Gleichwertigkeit nach DIN 4108 Beiblatt 2 und dem heutigen Stand der Technik. Mehrkosten durch besondere rechnerische Nachweise oder konstruktive Sonderlösung sind für die Einhaltung des Beiblattes nicht notwendig. Es werden daher keine Mehrkosten für diese Ausführungsvariante angesetzt.

Für die Erreichung des Wärmebrückenzuschlags von  $0,035 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ist eine detaillierte und für das Gebäude individuelle Berechnung des  $\Delta U_{WB}$  notwendig. Dies kann unter Anwendung von Wärmebrückenkatalogen erfolgen. Durch diese Ausführung entstehen Mehrkosten aufgrund des planerischen Mehraufwandes im Vergleich zur DIN 4108 Beiblatt 2. Diese umfassen für das Typengebäude etwa  $1.000 \text{ €}$ .

Bei detaillierten Nachweis, sowie teilweise konstruktiver Optimierungen und Anpassungen kann ein Wärmebrückenzuschlag für das Typengebäude von  $0,025 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht werden. Die planerischen Mehrkosten für die detaillierten Berechnungen werden pauschal mit  $2.000 \text{ €}$  angesetzt. Anpassungen in den Konstruktionen oder für höherwertige Bauteile werden pauschal mit  $3.000 \text{ €}$  veranschlagt ( $\Sigma 5.000 \text{ €}$ ).

**Tabelle 16: Mehrkosten (Brutto) für Optimierung der Wärmebrücken**

Ausführung	$\Delta U_{WB}$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	Mehrkosten [€]
Standardausführung nach WB-Beiblatt ohne Nachweis (z.B. nur bildlicher Vergleich)	0,050	0 €
Anwendung von Wärmebrückenkatalogen (ohne WB-Berechnungen und ohne zusätzliche Baustoffe)	0,035	1.000 €
Anwendung von WB-Katalogen, einzelne Berechnungen und Verwendung einiger verbesserter Materialien	0,025	5.000 €

### 5.1.3 Anlagentechnik

Für die Versorgung des Typgebäudes wurden verschiedene Anlagenvarianten definiert, die eine relevante Auswahl der heute zur Verfügung stehenden Möglichkeiten darstellt. Dabei werden die Art der Lüftung (Fensterlüftung, zentrale Abluftanlage, Lüftungsanlage mit WRG), unterschiedliche Typen der Energieversorgung (Gasbrennwertkessel, solare Trinkwarmwasserbereitung, Wärmepumpen, Holzpelletkessel und Fernwärme), die Art der Wärmeübergabe (Fußbodenheizung, Heizkörper)

und davon abhängig die Systemtemperaturen variiert. Die untersuchten Varianten bilden sich damit wie folgt in Tabelle 17 ab:

**Tabelle 17: Untersuchte Varianten der Anlagentechnik**

	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	Hz	FW
Lüftung	ABL	Fenster	LA mit WRG	ABL	LA mit WRG	Fenster	
Heizung	Brennwert (Öl)	Brennwert (Gas)		WP	WP	Holzpellet	Fernwärme
Warmwasser	Solarthermie			Luft-Wasser	Wasser-Wasser		
Wärmeübergabe	Heizkörper			Flächenheizung		Heizkörper	
Systemtemperatur VL/RL [°C]	55/45			35/28		55/45	

Abkürzungen:

LA:	Lüftungsanlage
ABL:	Zentrale Abluftanlage
WRG:	Wärmerückgewinnung
WP:	Wärmepumpe
Fenster:	freie Fensterlüftung
VL/RL:	Vorlauf/ Rücklauf

### Kosten Anlagentechnik

Die Kosten für die Anlagentechnikvarianten wurden als Pauschalkosten für das gesamte Typengebäude EFH ermittelt. In Tabelle 18 sind die Bruttokosten der verschiedenen Varianten zusammengefasst. Darin enthalten sind die Kosten für die Wärmeerzeuger und Wärmeübergabesysteme, sowie eventuellen Anschlüsse an Versorgungsnetze, Schornsteine und Lüftungsanlagen.

Diese Kostenannahmen variieren innerhalb der durchgeführten Parameterstudie nicht. Eventuelle Einflüsse aufgrund des schwankenden Energiebedarfs in den verschiedenen Varianten auf die Anlagengröße und somit auch auf die Kosten sind marginal und werden daher in dieser Studie vernachlässigt.

**Tabelle 18: Bruttokosten (Median) der Anlagentechnik aus den Marktauswertungen.**

Versorgungsvariante		Bruttokosten [€]
BW-Ref	Öl-Brennwert, Solaranlage für WW, Abluftanlage	25.610
BW1	Gas-Brennwert, Solaranlage für WW	21.280
BW2	Gas-Brennwert, Solaranlage für WW, Lüftungsanlage mit WRG	31.070
WP1	Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Flächenheizung, Abluftanlage	24.430
WP2	Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit Flächenheizung, Lüftungsanlage mit WRG	35.190
H <sub>z</sub>	Biomasse Wärmeerzeuger - Holzpellets	29.190
FW	Nah-/Fernwärme mit Primärenergiefaktor $f_p < 0,7$	10.810

## 5.2 Ergebnisse: Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Energiebedarfe wurden mit der Software „ZUB-Helena“ auf Basis der DIN V 18599 berechnet und nach End- und Primärenergie ausgewertet. Die zusätzliche Ausweisung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist im Rahmen der EnEV oder DIN V 18599 nicht gefordert, gibt jedoch Auskunft über die Klimawirkung der untersuchten Varianten und ist für die politischen Zielsetzungen und Debatten, die eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses fokussieren, von Relevanz.

### 5.2.1 Nutzenergiebedarf

Der Nutzenergiebedarf des Typengebäudes setzt sich zusammen aus dessen Heizwärmebedarf (HWB) und den Wärmebedarf des Trinkwarmwassers (TWW). Verluste für Umwandlung, Speicherung und Verteilung sind dabei nicht enthalten. Trotz gleicher Konfiguration der Gebäudehülle ergeben sich für die untersuchten Varianten sehr unterschiedliche Energiebedarfe zur Deckung der Heizwärme, da sich die betrachteten Versorgungstechniken in Ihrer Effizienz unterscheiden und entsprechende Systemverluste wiederum dem Gebäude zugutekommen. Durch folgende Parameter bzw. Systemrahmenbedingungen wird der Heizwärmebedarf maßgeblich beeinflusst:

- Systemtemperaturen (Vorlauf-/ Rücklauftemperatur: Heizkörper 55/45, Fußbodenheizung 35/28)

- Aufstellort Erzeuger (z.B. hohe Anlagenverluste innerhalb der beheizten Zone reduzieren den Heizwärmebedarf)
- Aufstellort Speicher (z.B. Speicherverluste innerhalb der beheizten Zone reduzieren den Heizwärmebedarf)
- Fensterlüftung, Abluft mit DC-Motor, Lüftungswärmerückgewinnung (mit Wärmebereitstellungsgrad von 80%)

Der Trinkwarmwasser-Wärmebedarf wird nach DIN V 18599 mit  $11 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGFA}})$  [18], bezogen auf die Nettogeschossfläche  $A_{\text{NGF}}$ , angesetzt. Umgerechnet auf die Nutzfläche  $A_{\text{N}}$ , die als Bezugsgröße für alle anderen Energiebedarfe verwendet wird, ergibt das einen Trinkwarmwasser-Wärmebedarf von etwa  $9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

**Tabelle 19: Nutzenergiebedarf für Heizung (HWB) und Warmwasser (TWW). Die Varianten, die den EnEV 2016- bzw. den EH 55-Standard erfüllen sind grau bzw. orange markiert.**

Energiebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	H <sub>z</sub>	FW
HWB, EnEV 2014	65,7	68,6	51,5	70,4	55,6	57,4	67,6
HWB, EnEV 2016	61,0	63,8	47,2	65,6	51,0	52,9	62,9
HWB, EH 55	49,1	51,7	35,5	53,5	39,1	40,6	50,8
TWW	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0

HWB Heizwärmebedarf

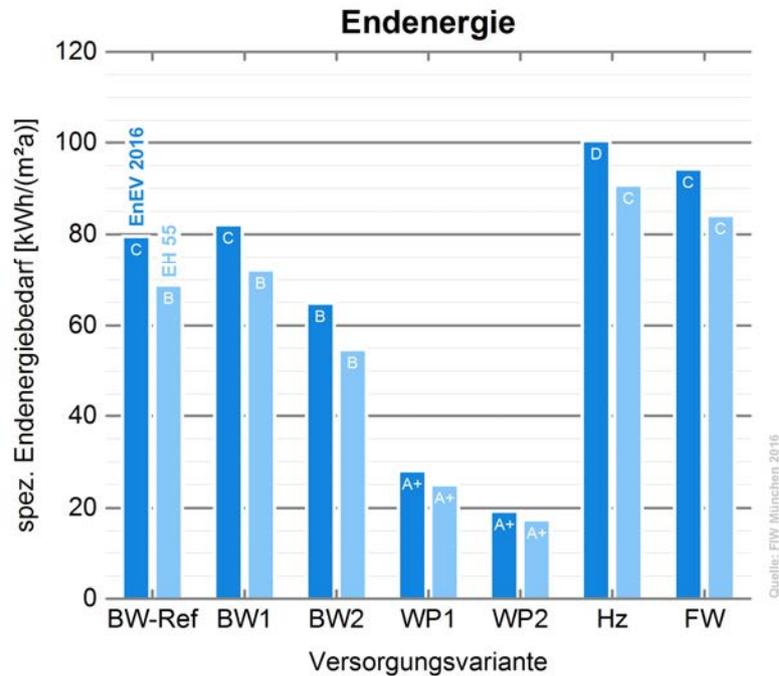
TWW Wärmebedarf Trinkwarmwasser

## 5.2.2 Endenergiebedarf

Die Endenergie umfasst im Ergebnis den Nutzenergiebedarf sowie zusätzlich alle Verluste für Umwandlung, Speicherung, Verteilung und Übergabe und gibt damit Aufschluss über die Gesamteffizienz der verschiedenen Versorgungssysteme. Je niedriger der Endenergiebedarf, desto effizienter wird die eingesetzte Energie genutzt. In Abbildung 14 sind die Ergebnisse für die untersuchten Energiestandards (EnEV 2016 und EH 55) und deren Versorgungsvarianten dargestellt und in Analogie zum Energieausweis den Effizienzklassen (A, B, C, D, etc.) zugeordnet. Kennzeichnend ist, dass die Varianten mit höheren Systemtemperaturen - bedingt durch Verbrennungsprozesse (Öl, Gas, Holz, Fernwärme) - in der Gesamteffizienz deutlich schlechter abschneiden (Effizienzklassen C und D für EnEV 2016 bzw. B und C für EH 55) als die strombasierten Niedertemperatursysteme auf Basis von Wärmepumpen (A+).

Durch die Effizienz der Wärmepumpen mit hohen Anteilen an Umweltenergie fällt die absolute Endenergieeinsparung durch das EH 55 gegenüber der EnEV 2016 im

Vergleich zu den anderen Versorgungssystemen verhältnismäßig gering aus (2,5-3,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) gegenüber 13,5-14,7 kWh/(m<sup>2</sup>a)), so dass die Klassifizierung (A+) unverändert bleibt.



**Abbildung 14:** errechneter spezifischer Endenergiebedarf nach DIN V 18599 der Versorgungsvarianten für das Typengebäude bei Annahme der energetischen Standards EnEV 2016 und EH 55 Standard. Die jeweils gültigen Effizienzklassen sind gesondert angegeben.

Zu erkennen ist auch der Einfluss der Lüftungwärmerückgewinnung. Die niedrigeren Bedarfe von Variante BW2 zu BW1 (Brennwert mit solarer Trinkwarmwasserbereitung, Lüftungs-WRG vs. Fensterlüftung) und Variante WP2 zu WP1 (Luft-Wasser-WP vs. Wasser-Wasser-WP, Lüftungs-WRG vs. Abluft) sind im Wesentlichen auf die Einflüsse der Wärmerückgewinnung zurückzuführen. Der Einsatz der Lüftungs-WRG reduziert den Endenergiebedarf deutlich, auch wenn sich der höhere Strombedarf der Ventilatoren mit einem höheren Betrag für Hilfsenergie niederschlägt (vgl. Abbildung 15, Varianten BW1 und BW2).

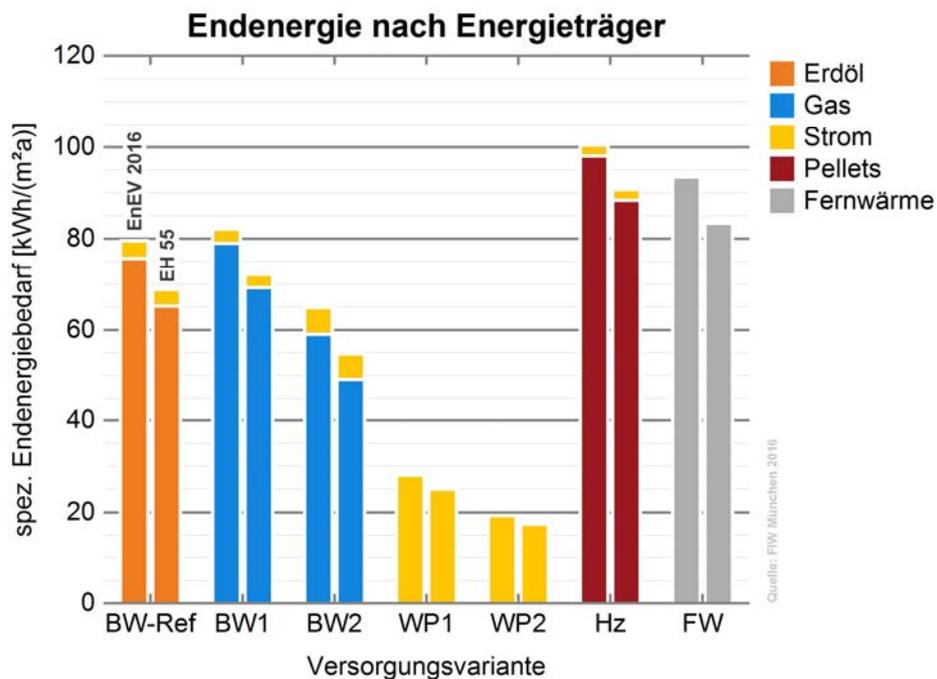


Abbildung 15: errechneter Endenergiebedarf nach DIN V 18599 der Versorgungsvarianten, dargestellt nach Energieträgern.

Neben einer weiteren Optimierung der Gebäudehülle und technischen Effizienzsteigerungen, die bei ausgereiften Systemen (z.B. Brennwertkessel) nur noch eingeschränkt möglich sind, bietet nur die umfassende Integration von Umweltenergie (Solar, Erdreich, Luft, Abwärme) in die Versorgung von Gebäuden das Potential, künftig die Endenergiebedarfe weiter zu reduzieren. Dies bedingt damit aber zunehmend multivalente und damit aufwändigere Systeme, die dann auch teurer ausfallen werden.

Tabelle 20: Endenergiebedarf in kWh/(m²a) für die Standards nach EnEV 2014, EnEV 2016 und EH 55. Die Varianten, die den EnEV 2016 bzw. den EH 55-Standard erfüllen sind grau bzw. orange markiert.

Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	Hz	FW
EnEV 2014	85,2	87,5	69,8	29,6	20,2	105,7	99,8
EnEV 2016	79,6	82,1	64,9	26,9	19,3	100,5	94,3
EH 55	65,7	68,9	51,9	23,2	16,8	88,0	80,8

### 5.2.3 Primärenergie

Der Grenzwert für den Primärenergiebedarf  $Q_p$  stellt zusammen mit der thermischen Qualität der Gebäudehülle die Hauptanforderung der EnEV dar. Die einzuhaltenden Werte ergeben sich für das hier untersuchte Typenhaus für die EnEV 2016 mit ca. 72 kWh/(m<sup>2</sup>a) und das EH 55 mit ca. 53 kWh/(m<sup>2</sup>a) (70% bzw. 55% in Bezug zum Referenzgebäude mit einem Primärenergiebedarf von 96,5 kWh/(m<sup>2</sup>a)).

In Abbildung 16 sind die beiden Grenzwerte als gestrichelte Linien abgebildet. Zu erkennen ist, dass sowohl die Referenzvarianten als auch die Varianten BW1 und BW2 weder die Grenzwerte des EH 55 noch der gültigen EnEV 2016 einhalten und somit keine zulässigen Versorgungsvarianten darstellen. Gleiches gilt für die Fernwärmeversorgung mit den Grenzwerten des EH 55. In diesen Fällen müsste daher entweder die Gebäudehülle verbessert oder der Anteil an regenerativen Energien erhöht werden.

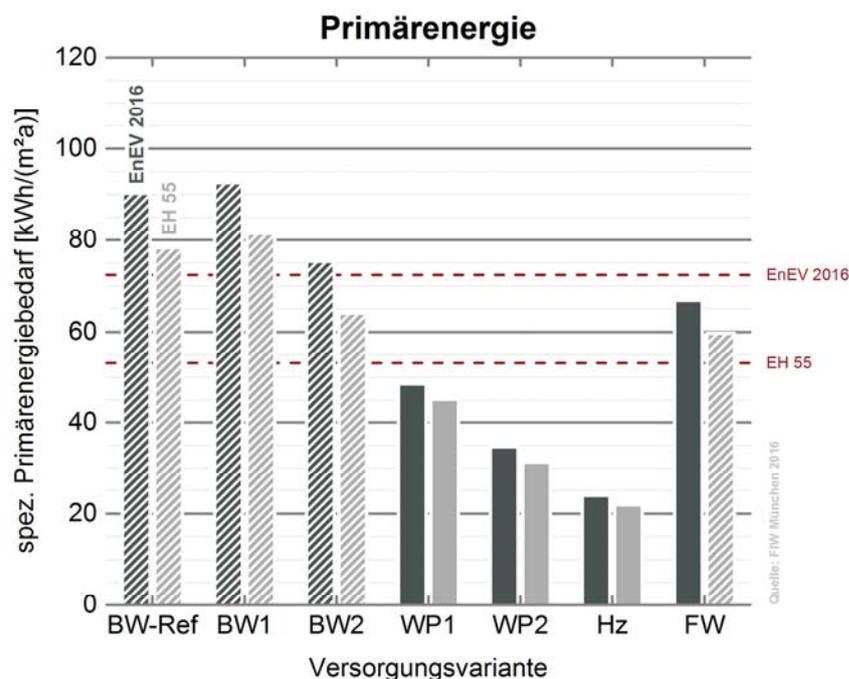


Abbildung 16: rechnerischer Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 der Versorgungsvarianten. Die schraffierten Säulen kennzeichnen die Versorgungsvarianten, die die jeweils gültigen Anforderungen der EnEV nicht erfüllen.

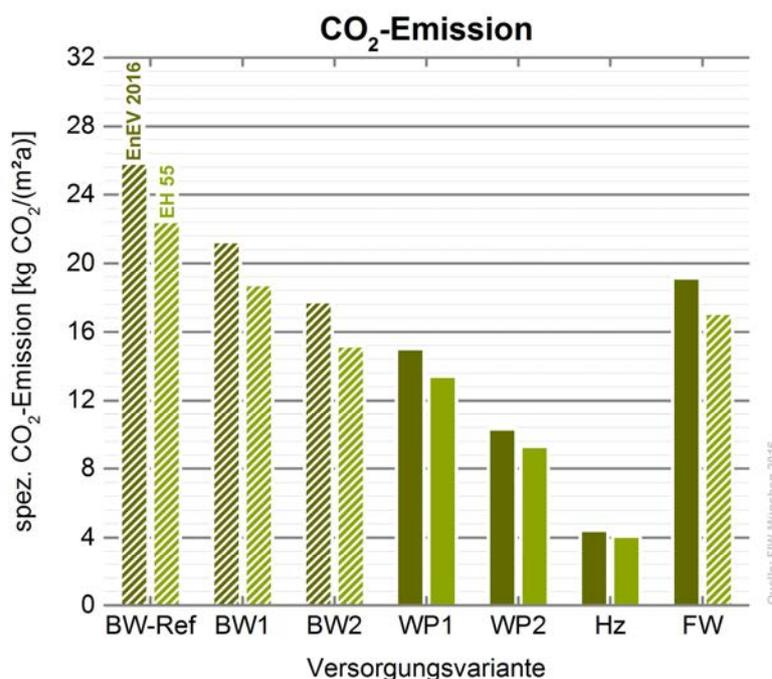
**Tabelle 21: Primärenergiebedarf in kWh/(m<sup>2</sup>a) für die Standards nach EnEV 2014, EnEV 2016 und EH 55. Die Varianten, die den EnEV 2016 bzw. den EH 55-Standard erfüllen sind grau bzw. orange markiert.**

Primärenergiebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	Hz	FW
EnEV 2014	96,5	98,6	80,9	53,3	36,4	25,0	70,8
EnEV 2016	90,2	92,6	75,4	48,5	34,7	23,9	66,9
EH 55	74,8	77,9	61,0	41,8	30,3	21,3	57,4

#### 5.2.4 CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Berechnungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen (Abbildung 17) zeigen Ähnlichkeiten zu den Ergebnissen des Primärenergiebedarfs. Unterschiede ergeben sich, da die Konversions-Faktoren für CO<sub>2</sub> und Primärenergie sich nicht proportional verhalten. Mit deutlichen Abstand emittiert der Holzpelletkessel als Biomasse-basiertes Versorgungssystem am wenigsten CO<sub>2</sub>, gefolgt von den beiden Wärmepumpensystemen mit hohem Umweltenergieanteil und begünstigt durch den wachsenden Anteil erneuerbar erzeugten Stroms. Die Versorgungssysteme auf Basis fossiler Energien weisen erwartungsgemäß die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Zu erkennen ist auch, dass die Systeme mit hohem Bewertungsfaktor (Brennwert, Fernwärme) stärker von einer besseren Gebäudehülle profitieren als die Systeme mit hohem Umweltenergieanteil oder Biomasse.

Die Substitution herkömmlicher Versorgungssysteme durch Biomasse stellt dennoch kein allgemeines Lösungsszenario zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen dar. Sowohl Holz als auch Bioöl/ Biogas stehen nur in begrenztem Umfang zur Verfügung. Insbesondere bei Bioöl/ Biogas stehen konkurrierende Verwendungsmöglichkeiten (Wärmeversorgung vs. Mobilität) sowie die problematische Landnutzung (Lebensmittel, Biodiversität) zur Diskussion.



**Abbildung 17:** rechnerische CO<sub>2</sub>-Emissionen der untersuchten Varianten. Die Versorgungsvariante auf Basis von Holzpellets erzielt die geringsten Emissionen aufgrund des niedrigen CO<sub>2</sub>-Faktors. Günstig sind auch die beiden Wärmepumpensysteme aufgrund der Einbindung von Umweltenergie.

**Tabelle 22:** CO<sub>2</sub>-Emissionen in kg/(m<sup>2</sup>a) für die Standards nach EnEV 2014, EnEV 2016 und EH 55. Die Varianten, die den EnEV 2016- bzw. den EH 55-Standard erfüllen sind grau bzw. orange markiert.

CO <sub>2</sub> -Emissionen [kgCO <sub>2</sub> /(m <sup>2</sup> a)]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	Hz	FW
EnEV 2014	27,6	22,6	19,0	15,8	10,8	4,6	20,2
EnEV 2016	25,8	21,3	17,7	14,4	10,3	4,4	19,1
EH 55	22,4	18,8	15,2	13,4	9,3	4,1	17,1

### 5.3 Ergebnisse: Ökonomie

Entsprechend der in Kapitel 4.2 erläuterten Methode wird die Wirtschaftlichkeit der Gebäude- und Versorgungsvarianten anhand der jährlichen Kosten (Annuitäten) für die getätigten Investitionen, Energie sowie Betrieb und Instandhaltung im Einzelnen sowie in der Summe (Jahresgesamtkosten) bewertet. Den Berechnungen liegt ein

Betrachtungszeitraum von 20 Jahren zugrunde, mit Berücksichtigung eines Kapitalzinses (2%), einer Energiepreissteigerung (3%) und einen Preisanstieg sonstiger Kosten (1,5%). Durch den Vergleich der jährlichen Gesamtkosten aller Varianten lässt sich anschaulich identifizieren, ob mit dem EH 55 gegenüber der EnEV 2016 unter den gewählten Rahmenbedingungen niedrigere Kosten erzielbar sind oder eine Deckungslücke existiert.

### 5.3.1 Jahresgesamtkosten

Die Jahresgesamtkosten setzen sich aus den Investitionskosten (Kapitalkosten), Energiekosten sowie den Kosten für Instandhaltung und Betrieb zusammen.

### 5.3.2 Investitions- bzw. Kapitalkosten

Die Investitionskosten umfassen die Kosten für die Gebäudehülle, Anlagentechnik und die Bauwerkskostendifferenz (Kosten für Ausbau und Maßnahmen, die für alle Varianten gleiche sind).

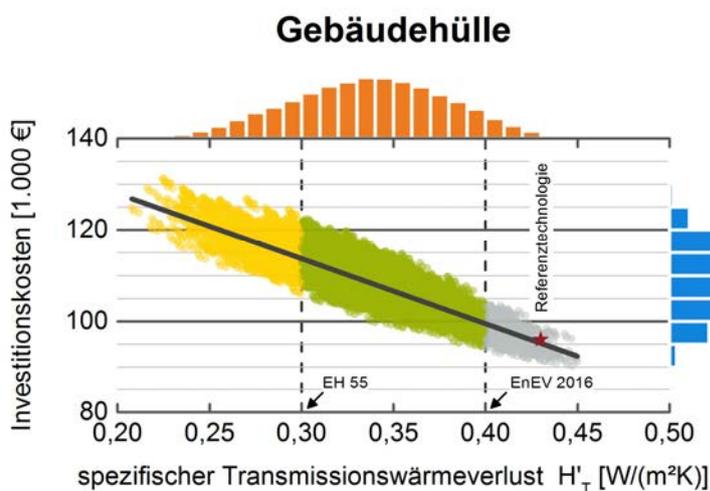
#### Gebäudehülle

Aus der Variation der verschiedenen, zuvor definierten Bauteile und Außenwandmaterialien ergeben sich insgesamt bis zu 1944 Kombinationsmöglichkeiten je Außenwandtyp alleine für die Gebäudehülle. In Summe werden damit ca. 10.700 Varianten für die Realisierung der Gebäudehülle abgebildet, entsprechend ihren thermischen Eigenschaften ( $H'_T$ ) sortiert und ihren Kosten zugeordnet.

In Abbildung 18 sind die Investitionskosten aller berechneten Varianten über den Transmissionswärmeverlust der Gebäudehülle abgetragen. Zusätzlich sind jeweils die Häufigkeitsverteilungen sowohl für die Kosten (blaue Balken) als auch für die Transmissionswärmeverlustkoeffizienten (orange Balken) dargestellt. Die häufigsten Lösungsvarianten ergeben sich erwartungsgemäß für mittlere Standards bei mittleren Kosten.

Die farbliche Unterscheidung der Punktwolke markiert im grünen Bereich all diejenigen Lösungen, die die aktuellen Anforderungen der EnEV 2016 unterschreiten. Die gelben Punkte stellen die Lösungen dar, die den EH 55-Standard erfüllen. Die Regression der Ergebnisse gibt anschaulich wider, dass mit zunehmender thermischer Qualität der Gebäudehülle die Investitionskosten quasi linear ansteigen. Bezogen auf einen bestimmten  $H'_T$ -Wert der Gebäudehülle können die Ergebnisse dabei deutlich schwanken. Bei einem  $H'_T$  von beispielsweise  $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ergibt die Regression einen Wert von ca. 106.000 € für die Gebäudehülle. Dieses thermische Niveau ist aber auch zu minimal knapp unter 100.000 € bzw. maximal etwa 115.000 € realisierbar, also mit einer Schwankungsbreite von etwa -7% bis +9%. Oder anders betrachtet: Bei einem gegebenen Betrag der Investitionskosten von beispielsweise

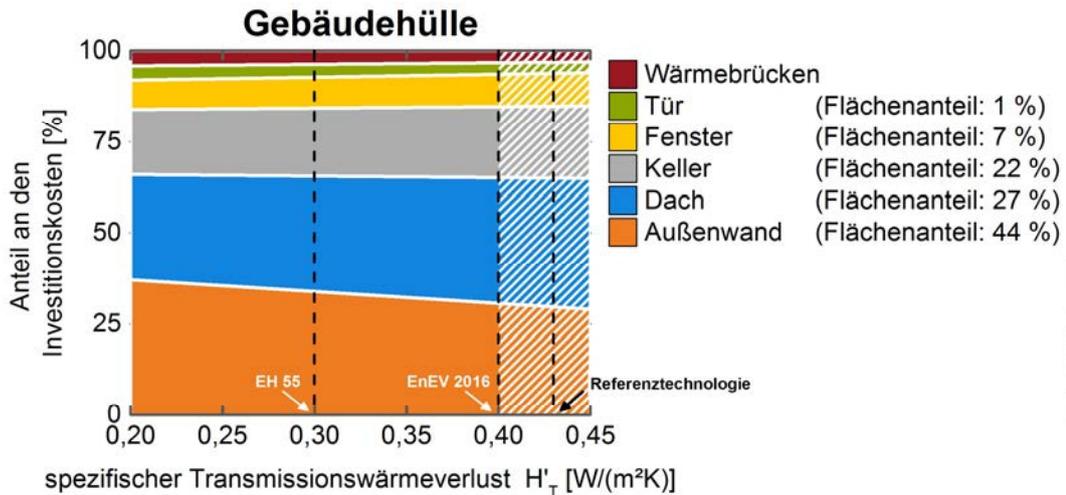
110.000 € ist eine Gebäudehülle mit einer Qualität zwischen etwa  $H'_T=0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und  $H'_T=0,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  möglich. Dies bedeutet, dass bei konsequenter Planung ein gewisser Spielraum gegeben ist, höhere Standards mit geringen Mehrkosten kostenbewusst umzusetzen. Die grundsätzliche Aussage, dass eine Verbesserung der thermischen Hülle einen Anstieg der Investitionskosten bewirkt, bleibt davon unberührt. Für den Sprung vom aktuellen Standard nach EnEV 2016 zum EH 55-Standard beträgt die Kostensteigerung der Gebäudehülle für die untersuchten Varianten bei mittleren Investitionskosten von 100.600 € bzw. 114.500 € etwa 14%.



Quelle: FIW München 2016

**Abbildung 18:** errechnete Investitionskosten der Gebäudehülle in Abhängigkeit ihres spezifischen Transmissionswärmeverlustkoeffizienten  $H'_T$ . Die grauen Punkte entsprechen den Anforderungen der EnEV 2014, die grünen Punkte den Anforderungen der EnEV 2016 und die gelben den Anforderungen des EH 55. Die Häufigkeitsverteilungen zur Qualität der Gebäudehülle und den jeweiligen Investitionskosten ist mit den orangen bzw. blauen Balken dargestellt.

Die Mehrkosten für eine energetisch effizientere Gebäudehülle sind bei einem Kostenvergleich der einzelnen Bauteile in erster Linie durch die Außenwandkonstruktion verantwortlich. In Abbildung 19 sind die Anteile der einzelnen Bauteile an den normierten Investitionskosten abgetragen. Während der Kostenanteil für Dach, Keller, Fenster und Tür rückläufig ist oder konstant bleibt, steigt der Aufwand für Außenwand und Wärmebrücken im Verhältnis an. Alleine für die Außenwand verändert sich der Kostenanteil von etwa 30% für  $H'_T=0,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  auf über 35% für  $H'_T=0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



**Abbildung 19:** Anteil der verschiedenen Bauteile an den normierten Investitionskosten der Gebäudehülle. Die hohen Flächenanteile von Dach und Außenwand machen sich auch bei den Investitionskosten bemerkbar. Mit Reduktion von  $H_T$  nehmen die Kosten für Dach, Keller, Fenster und Türen im Vergleich ab oder bleiben etwa gleich, die Kostenanteile für Außenwand und Wärmebrücken steigen.

## Versorgungstechnik

Bei Gebäuden mit hoher thermischer Qualität der Gebäudehülle wird die Auslegung der Gebäudetechnik anhand der maximalen Heizlast überwiegend von der Trinkwarmwasserbereitung bestimmt. Insgesamt können die Unterschiede in der Heizlast als so gering bewertet werden, dass auf diesem Niveau keine Adaption der Gebäudetechnik mehr stattfindet, die sich in einer Veränderung der Kosten darstellt. Entsprechend werden für die beiden energetischen Standards EnEV 2016 und EH 55 die gleichen Kosten für die Versorgungstechnik verwendet. Die jährlichen Kosten der untersuchten Versorgungsvarianten sind in Tabelle 23 aufgeführt.

**Tabelle 23:** Annuität der Investitionskosten für die Versorgungstechnik in €/m<sup>2</sup>a.

Kapitalkosten [€/m <sup>2</sup> a]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	H <sub>z</sub>	FW
Versorgungstechnik	8,7	7,2	10,5	8,3	11,9	9,9	3,7

## Gesamtinvestitionen

Die jährlichen Kosten für die Gesamtinvestitionen setzen sich aus den energetisch relevanten Kosten für die Gebäudehülle und Versorgungstechnik sowie allen übr-

gen Bauwerkskosten (Bauwerkskostendifferenz) zusammen. Die Bauwerkskostendifferenz berücksichtigt letztlich alle notwendigen Investitionen, die für Baukonstruktion (z.B. Innenausbau) und technischer Ausbau notwendig sind, aber keinen Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudes haben und für alle untersuchten Varianten gleich angesetzt werden können. Für das Typengebäude beträgt die jährliche Bauwerkskostendifferenz 49,2 €/m<sup>2</sup>a). Damit können die jährlichen Gesamtkosten in der Summe wie folgt (Tabelle 24) angegeben werden.

**Tabelle 24: Annuität der Gesamtinvestitionskosten (KG300+KG400) in €/m<sup>2</sup>a).**

Kapitalkosten [€/m <sup>2</sup> a]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	Hz	FW
EnEV 2014	89,7	88,2	91,5	89,3	92,9	90,9	84,7
EnEV 2016	91,9	90,4	93,7	91,5	95,1	93,1	86,9
EH 55	96,5	95,1	98,4	96,1	99,8	97,8	91,5

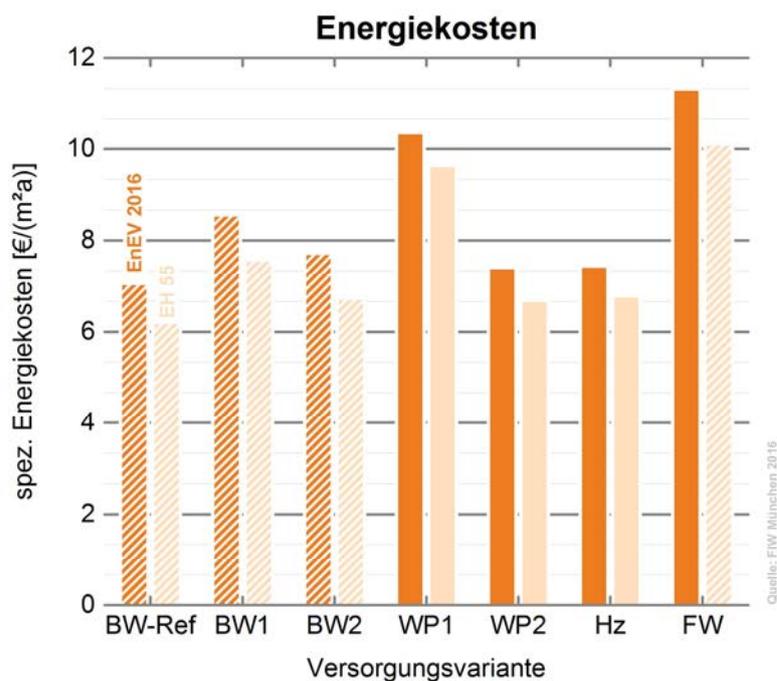
### 5.3.3 Energiekosten

Die untersuchten Versorgungssysteme weisen sehr unterschiedliche Effizienzen und Umweltenergieanteile auf. Die Angabe der Energiekosten pro kWh Endenergie ist als Vergleichsgröße nicht geeignet. Beispielsweise ist für den Betrieb von Wärmepumpen elektrischer Strom notwendig, der im Vergleich die höchsten Bezugskosten aufweist. Nutzen und Effizienz bleiben dabei unberücksichtigt. Für alle Varianten wird zum Vergleich daher vom gleichen Nutzen ausgegangen, d.h. dass die Wohnung mit ausreichend Wärme bei vergleichbarem Wohnkomfort versorgt wird. Dazu werden die Energiekosten auf die Wohnfläche  $A_N$  bezogen.

In Abbildung 20 sind die resultierenden spezifischen Energiekosten der Versorgungsvarianten für die Standards nach EnEV 2016 und EH 55 zusammengefasst. Die spezifischen Energiekosten sind für die Referenzversorgung auf Basis von Brennwertkessel und Solarthermie (BW-Ref), der Brennwertkessel mit Solarthermie und Lüftungswärmerückgewinnung (BW2), der Holzpelletkessel (Hz) und die Wasser-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer Lüftungswärmerückgewinnung (WP2) vergleichbar.

Für den EnEV-2016-Standard liegen die spezifischen Energiekosten für diese Systeme zwischen 7 und knapp 8 €/m<sup>2</sup>a), für das EH 55 zwischen 6 und 7 €/m<sup>2</sup>a). Die mit Abstand höchsten spezifischen Energiekosten entstehen beim Anschluss an das Fernwärmenetz, gefolgt von der Außenluft-Wärmepumpe (WP1).

Gegenüber dem Referenzgebäude nach EnEV 2016 mit einer Versorgung auf Basis einer Öl-Brennwerttherme und Solarthermie können mit dem EH 55-Standard nicht in allen Fällen die Energiekosten reduziert werden. Die günstigen Varianten erreichen eine Einsparung zwischen 7,5% und 23,6% (BW-Ref, BW1, BW2, WP2, Hz). Für Gebäude auf Basis der Wärmeversorgung WP1 oder FW steigen die Energiekosten gegenüber der Referenz trotz des höheren Standards sogar an.



**Abbildung 20:** errechnete spezifische jährliche Energiekosten der Versorgungsvarianten. Im direkten Vergleich der Gebäudestandards EnEV 2016 und EH 55 liegen die Einsparungen der Energiekosten bei gleicher Versorgungstechnik zwischen 17,3 und 24,8%. In Bezug zur Referenz (BW-Ref, EnEV 2016) wird nicht mit allen Varianten eine Einsparung erzielt. Hier liegen die Ergebnisse zwischen 3,9 und 12,0% Minderkosten bzw. 7,4 und 43,2% Mehrkosten.

Tabelle 25 stellt nachfolgend die spezifischen Energiekosten aller Varianten für die Gebäudestandards nach EnEV 2016 und EH 55 gegenüber. Ergänzend sind die Kosten der EnEV 2014 ausgewiesen.

**Tabelle 25: Annuität der Energiekosten im Vergleich der Gebäudestandards EnEV 2016 und EH 55 sowie verschiedener Versorgungssysteme.**

Energiekosten [€/m <sup>2</sup> a]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	Hz	FW
EnEV 2014	7,5	9,1	8,2	11,4	7,8	7,8	12,0
EnEV 2016	7,1	8,6	7,7	10,4	7,4	7,4	11,3
EH 55	6,2	7,6	6,7	9,6	6,7	6,8	10,1

### 5.3.4 Betriebs- und Instandhaltungskosten

Für das betrachtete Typengebäude wird davon ausgegangen, dass aufgrund der sehr niedrigen Leistungswerte für beide Energiestandards (EnEV 2016 und EH 55) keine Veränderung der Anlagentechnik notwendig ist. Damit bleiben unabhängig vom energetischen Standard der Gebäudehülle die Betriebs- und Instandhaltungskosten gleich, unterscheiden sich aber durch die Auswahl des Versorgungssystems. Die Kosten differieren dabei erheblich. Während für Fernwärme (FW) lediglich jährliche Kosten von 1,3 €/m<sup>2</sup>a entstehen, sind für den Holzpelletkessel (Hz) bis zu 9,4 €/m<sup>2</sup>a notwendig (vgl. Tabelle 26). Bei den weiteren Versorgungssystemen ist zu erkennen, dass die Systeme mit Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung (BW2 bzw. WP2) im Vergleich zu den Systemen ohne Lüftung bzw. mit einfacher Abluft (BW1 bzw. WP1) höhere Betriebskosten aufweisen.

**Tabelle 26: Annuität der Betriebs- und Instandhaltungskosten für die untersuchten Versorgungsvarianten in €/m<sup>2</sup>a.**

Annuität [€/m <sup>2</sup> a]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	Hz	FW
Betrieb + Instandhaltung	2,8	2,4	4,2	3,2	4,9	9,4	1,3

### 5.3.5 Laufende Kosten

Die laufenden Kosten des Typengebäudes werden aus der Summe von Energie- und Betriebskosten gebildet. Die Versorgungssysteme auf Basis von Brennwertkesseln (BW-Ref, BW1, BW2) weisen die geringsten laufenden Kosten auf (Abbildung 21). Im mittleren Bereich bewegen sich die Wärmepumpensysteme und der Fernwärmeanschluss. Letztere können die höheren Energiekosten mit niedrigeren Betriebskosten kompensieren. Das Gegenteil ist für den Holzpelletkessel der Fall. Hier

liegen die laufenden Kosten um fast 75% (EnEV 2016) bis 80% (EH 55) höher als bei der Referenztechnologie (BW-Ref).

Gegenüber der Referenzvariante (BW-Ref, EnEV 2016) weisen alle Systemvarianten, die den EH 55-Standard erfüllen (WP1, WP2, Hz), höhere laufende Kosten auf. Das bedeutet letztlich für diesen Vergleich, dass eine Kompensation der höheren Investitionskosten durch geringere laufende Kosten nicht möglich ist.

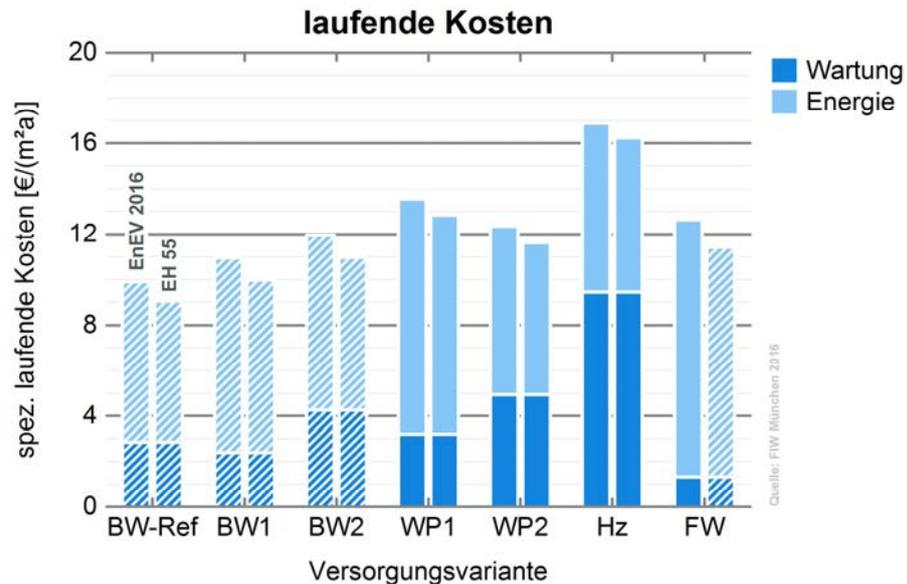


Abbildung 21: Annuität der laufenden Kosten für die unterschiedlichen Versorgungssysteme und energetischen Standards.

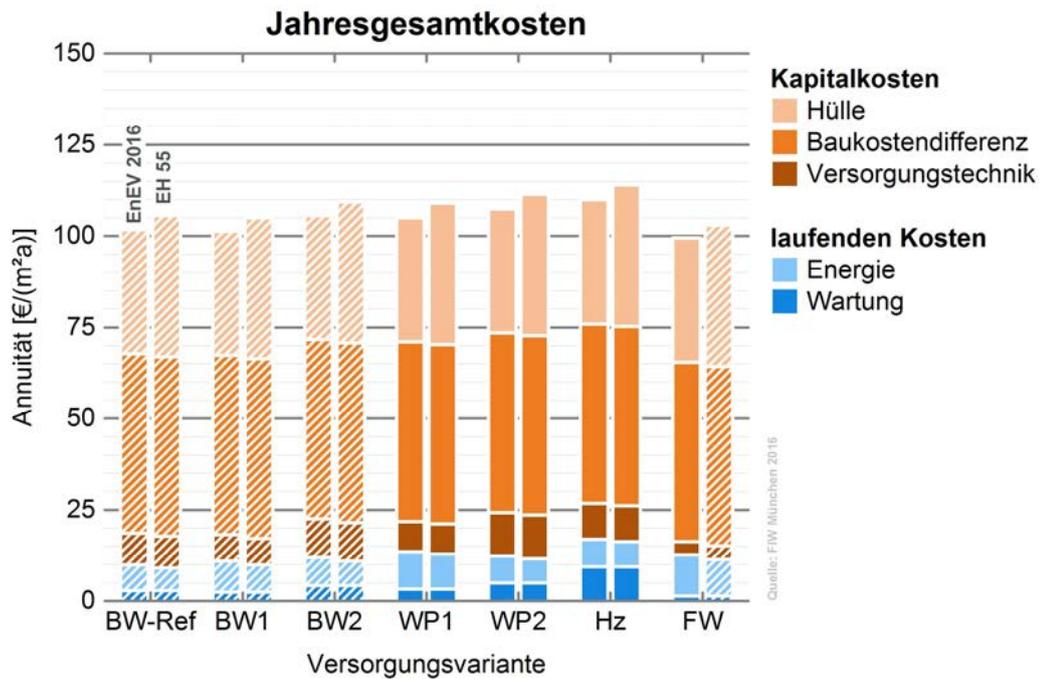
Tabelle 27: Annuität der laufenden Kosten für die untersuchten Versorgungsvarianten in €/m²a.

Laufende Kosten [€/m²a]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	Hz	FW
EnEV 2014	10,3	11,5	12,5	14,6	12,7	17,2	13,3
EnEV 2016	9,9	10,9	12,0	14,0	12,4	16,9	12,6
EH 55	9,1	10,0	11,0	12,8	11,6	16,2	11,4

### 5.3.6 Jahresgesamtkosten

Aus den Berechnungen der Jahresgesamtkosten (Summe aus Kapitalkosten und laufenden Kosten) ergeben sich für den EH 55-Standard für praktisch alle Varianten gegenüber der EnEV 2016 Mehrkosten. Nur die Kombination mit einer Fernwärmeversorgung verspricht eine nahezu kostenneutrale Umsetzung, deren praktische Relevanz aufgrund der zu niedrigen Energiedichten von Einfamilienhäusern jedoch fraglich ist.

Dies bedeutet, dass über den gewählten Betrachtungszeitraum von 20 Jahren die Energieeinsparungen nicht ausreichen, ein vergleichbares Gesamtkostenniveau zu erreichen. Dies gilt sowohl für den Bezug auf die Referenzausführung (BW-Ref, EnEV 2016) als auch für den direkten Bezug der beiden energetischen Standards bei gleicher Versorgungstechnik. Abbildung 22 zeigt dazu die Jahresgesamtkosten der untersuchten Varianten und deren Zusammensetzung, getrennt nach Kapital- und laufenden Kosten. Zu erkennen ist, dass die Anteile der Bauwerkskostendifferenz, Versorgungstechnik und Wartung gleichbleiben, die Kapitalkosten der Gebäudehülle zunehmen, während die laufenden Kosten nicht im gleichem Maße zurückgehen. Eine Deckung der Mehrkosten ist damit nicht gegeben (Deckungsfehlbetrag).



**Abbildung 22:** errechnete Jahresgesamtkosten der Versorgungsvarianten nach VDI 2067. Dargestellt sind die jeweiligen Kosten für Kapital, differenziert nach Hülle, Baudifferenzkosten und Anlage sowie die laufenden Kosten für Betrieb und Instandhaltung der Anlage. Die schraffierten Balken erfüllen die jeweiligen Anforderungen an den Primärenergiebedarf nicht.

Die energetischen Anforderungen des EH 55 werden nur noch in Kombination mit drei Versorgungsvarianten erreicht. Neben den beiden Wärmepumpenvarianten (WP1 und WP2) kann nur der Holzpelletkessel (Hz) den Primärenergiegrenzwert unterschreiten. Mit Modifikationen an der Anlagenkonfiguration ist dies auch noch für den Brennwertkessel mit Solarthermie und Lüftungs-WRG (BW2) sowie die Fernwärmeversorgung (FW) denkbar. Werden nur die zulässigen Varianten betrachtet, dann stellt die Außenluft-Wärmepumpe (WP1) im Vergleich die kostengünstigste, aber nicht kostenoptimale Lösung dar.

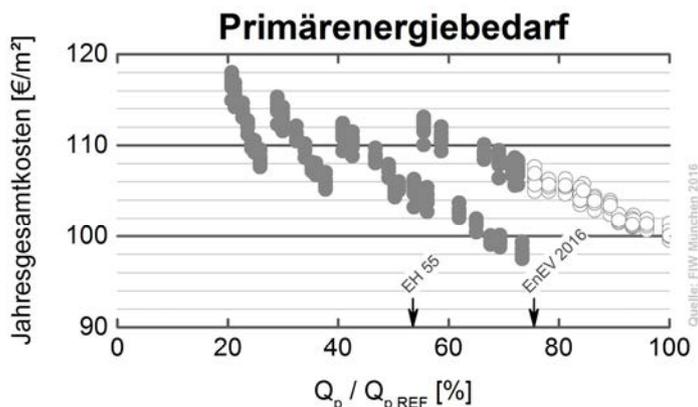
Der Deckungsfehlbetrag für die möglichen Varianten bewegt sich im Vergleich zur Ausführung nach Referenztechnologie (EnEV 2016+BW-Ref) im Bereich von 7,2 und 12,2 €/m²a und im Vergleich zur günstigsten zulässigen EnEV 2016-Variante (EnEV 2016+WP1) im Bereich von 4,5 und 8,5€/m²a. Bei einer Nutzfläche  $A_N$  von knapp 181m² für das Typengebäude entspricht dies also zwischen etwas über 800 und bis zu 2200 € Mehrkosten pro Jahr.

**Tabelle 28: Jahresgesamtkosten als Annuitäten für die Varianten nach EnEV 2016 und EH 55 in €/m<sup>2</sup>a.**

Jahresgesamtkosten [€/m <sup>2</sup> a]	BW-Ref	BW1	BW2	WP1	WP2	H <sub>z</sub>	FW
EnEV 2014	100,0	99,7	104,0	103,9	105,6	108,1	98,0
EnEV 2016	101,8	101,3	105,7	105,5	107,5	110,0	99,5
EH 55	105,6	105,0	109,4	109,0	111,4	114,0	103,0

Um eventuell günstigere Lösungen zu identifizieren, wurden zusätzlich die Jahresgesamtkosten des Typengebäudes für weitere Varianten der Gebäudehülle untersucht. Ausgehend vom Referenzgebäude wurde die thermische Qualität der Gebäudehülle in 10%-Schritten verbessert (Ref, 90, 80, 70, 60) und der jeweilige Kostenmedian berechnet. Der 55%-Wert wurde zusätzlich mit aufgenommen, da dieser dem KfW-Förderstandard Effizienzhaus 40 (EH 40) entspricht.

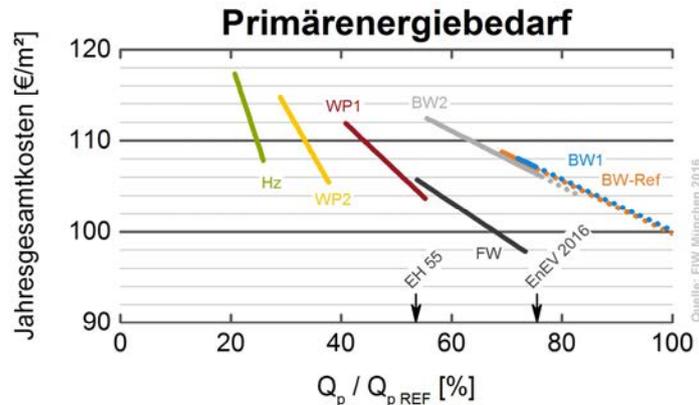
In Abbildung 23 sind die Jahresgesamtkosten in Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs  $Q_P$  für die unterschiedlichen Gebäudevarianten dargestellt. Die Grenzwerte für  $Q_P$  sind für den EnEV 2016- und den EH 55-Standard in der Grafik mit Pfeilen markiert.



**Abbildung 23:** berechnete Jahresgesamtkosten in €/m<sup>2</sup>a in Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs für unterschiedliche thermischen Qualitäten der Gebäudehülle (H<sub>T</sub>) und Versorgungssysteme. Die beiden Pfeile markieren die Mindestanforderungen an den Primärenergiebedarf, die entsprechend der EnEV 2016 bzw. des EH 55 einzuhalten sind.

Werden die Jahresgesamtkosten den untersuchten Versorgungssystemen zugeordnet, ergibt sich für diese ein nahezu linearer Verlauf der Kostenentwicklung in Ab-

hängigkeit des Gebäudestandards. Die Regression von Kosten und Primärenergiebedarf wird in Abbildung 24 dargestellt. Die Steigungen der Geraden sind direkt abhängig vom Versorgungssystem und dem verwendeten Hauptenergieträger.



**Abbildung 24:** Regression der Jahresgesamtkosten für unterschiedliche Versorgungssysteme in Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs  $Q_p$ . Die gepunkteten Linien entsprechen den Anforderungen der EnEV 2014.

Je größer die Anpassung von  $H'_T$  ist, desto teurer wird eine weitere Reduktion des Primärenergiebedarfs. Dies ist hier insbesondere für den Holzpelletkessel und die Wärmepumpenvarianten der Fall. Zwei Effekte kommen hier zu tragen:

- (1) Bei Verwendung von primärenergetisch sehr günstig bewerteten Energieträgern haben Effizienzsteigerungen durch eine optimierte Gebäudehülle oder Versorgungstechnik nur noch verhältnismäßig geringen Einfluss und Wirksamkeit. Dies ist beim Holzpelletkessel der Fall, der einen sehr geringen Primärenergiefaktor vorweisen kann ( $f_p=0,2$ ).
- (2) Beim Einsatz hocheffizienter Versorgungssysteme zeigt eine Verbesserung der Gebäudehülle ebenfalls nur noch geringe absolute Wirkung. Die beiden Wärmepumpensysteme - einmal in Kombination mit einer Lüftungs-WRG - nutzen in hohem Umfang Umweltenergie, was den Einsatz von Primärenergie deutlich reduziert und die Systemeffizienz signifikant erhöht.

Die vorab beschriebenen Versorgungssysteme würden auch ohne Maßnahmen an der Gebäudehülle die Primärenergieanforderung des EH 55-Standards erfüllen. Die konventionellen Anlagen auf Basis von Brennwertechnik oder Fernwärme können die Anforderungen nicht oder nur mit entsprechenden Mehraufwand einhalten. Dazu ist entweder eine signifikant bessere Gebäudehülle oder aber ein höherer Anteil erneuerbarer Energien an der Versorgung notwendig, was beides nicht ohne zusätzliche Mehrkosten zu realisieren ist.

## 6 Zusammenfassung

Hohe energetische Gebäudestandards sind ein wesentlicher Bestandteil der klima- und energiepolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung und Europäischen Union, um eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Dazu stellen eine hochgedämmte Gebäudehülle, effiziente Versorgungstechnik und eine Optimierung der Systemeffizienz der Gesamtenergieversorgung wesentliche Beiträge dar. Ab 2021 verlangen die Vorgaben der EU für Neubauten die nationale Umsetzung von Niedrigstenergiegebäuden (NZEB). Deren Definition liegt in der Verantwortung der einzelnen Mitgliedsstaaten und wurde in Deutschland bisher nicht vollzogen.

Um die Wirtschaftlichkeit künftig möglicher energetischer Standards zu bewerten, wurden im Rahmen dieser Studie für unterschiedliche thermische Qualitäten der Gebäudehülle (Variation von  $H'_T$ ) in Kombination mit gängigen Versorgungssystemen die Jahresgesamtkosten (Annuitäten) und deren Kostenbestandteile für ein typisches EFH ermittelt. Im Fokus der Betrachtung steht das EH 55, der Förderstandard der KfW-Bank, der als Grundlage eines künftigen Niedrigstenergie-Gebäudestandards diskutiert wird.

### 6.1 Energetische Bewertung

Im ersten Schritt wurden der Primärenergiebedarf für die zuvor genannten Varianten als eine der Hauptanforderungen ermittelt. Nachfolgende Tabelle (Tabelle 29) veranschaulicht die Ergebnisse:

- (1) Die Anforderungen der EnEV 2016 und des EH 55 an die Gebäudehülle, definiert über den spezifischen Transmissionswärmeverlust  $H'_T$ , können mit den am Markt seit langem verfügbaren Außenwandsystemen eingehalten werden, ohne maßgebliche Veränderung der üblichen Außenwandstärken.
- (2) Die bereits heute geltenden Anforderungen an den Primärenergiebedarf (EnEV 2016) können von konventionellen Versorgungssystemen auf Basis von Brennwertkesseln bei Ausführung der Gebäudehülle entsprechend des EnEV-Referenzgebäudes nicht mehr erfüllt werden. Hierzu sind weitere Optimierungsmaßnahmen entweder an der Gebäudehülle oder Versorgungstechnik notwendig.
- (3) Um die Anforderungen des EH 55 zu erfüllen, müssen der Transmissionswärmeverlustkoeffizient  $H'_T$  der Gebäudehülle auf 70% und der Primärenergiebedarf auf 55% des Referenzgebäudes reduziert werden. Dies wird in diesem Vergleich praktisch nur noch in Kombination mit Versorgungssystemen auf Basis von Wärmepumpen oder Holzpelletkessel erreicht. Bei allen anderen Systemen sind zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz oder des Anteils erneuerbarer Energien notwendig, die mit einem Mehraufwand verbunden sind.

- (4) Bei Umsetzung von Versorgungssystemen mit hoher Effizienz (Wärmepumpen) oder günstigen Primärenergiefaktoren (Holzpelletkessel) sind die Effekte einer weiteren Optimierung der Gebäudehülle auf den Primärenergiebedarf nur noch gering. So bewirkt beispielsweise bei einer Wärmeversorgung auf Basis von Holzpellets (Hz) die Verbesserung der Gebäudehülle um 30% lediglich eine Primärenergiereduktion um 3%-Punkte, bei einer Wärmeversorgung auf Basis der Wärmepumpen um 8%- (WP1) bzw. 6%-Punkte (WP2).

**Tabelle 29:** Primärenergiebedarf in Abhängigkeit der Qualität der Gebäudehülle ( $H'_T$ ) im Verhältnis zum Referenzgebäude in %. Grau hinterlegt sind die Varianten, die die Anforderungen der EnEV 2016 ( $Q_p \leq 0,75 \cdot Q_{p,Ref}$ ) erfüllen. Die orangen Felder entsprechen den Anforderungen des EH 55 ( $Q_p \leq 0,55 \cdot Q_{p,Ref}$ ).

$Q_p / Q_{p,Ref}$ [%]	$H'_T / H'_{T,Ref.}$ [%]						
	100 EnEV 14	93 EnEV 16	90	80	70 EH 55	60	55
BW-Ref	100	94	91	86	81	73	69
BW1	102	96	93	89	84	76	72
BW2	84	78	76	71	66	59	55
WP1	55	52	51	49	47	43	41
WP2	38	36	35	34	32	30	29
Hz	26	25	24	24	23	21	21
FW	73	69	68	65	62	56	54

## 6.2 Ökonomische Bewertung

Die Anforderungen an den energetischen Gebäudestandard haben Auswirkungen auf die Wahl des Versorgungssystems und die Ausführung der Gebäudehülle und damit deren Kosten. Ausgehend von der Referenztechnologie beruhen die Investitionskosten der Gebäudehülle auf den Medianwerten verschiedener Außenwandkonstruktionen und der weiteren Bauteile. Dazu kommen weitere Kosten für alle anderen konstruktiven Maßnahmen (Bauwerkskostendifferenz), die Versorgung sowie den laufenden Betrieb (Energie und Wartung/ Instandhaltung). Die jährlichen Gesamtkosten auf Basis der Annuitäten (entsprechend VDI 2067) und ihre Bestandteile erlauben einen anschaulichen und nachvollziehbaren Vergleich der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Varianten.

Tabelle 30 zeigt im Ergebnis die Zunahme der jährlichen Kosten für die Gebäudehülle durch Verbesserung der thermischen Qualität. Mit der Umsetzung des EH 55-Standards ( $H'_T \leq 0,7 \cdot H'_{T,Ref}$ ) entstehen gegenüber der EnEV 2016 jährliche Mehrkosten von etwa 14%.

**Tabelle 30: prozentuale Zunahme der jährlichen Kosten für die Gebäudehülle in Abhängigkeit ihrer thermischen Qualität. Das orange hinterlegte Feld markiert die Mindestanforderung des EH 55.**

€ / € <sub>Ref</sub> [%]	H' <sub>T</sub> / H' <sub>T,Ref.</sub> [%]						
	100 EnEV 14	93 EnEV 16	90	80	70 EH 55	60	55
Gebäudehülle	-6,4	0	0,6	7,7	13,8	21,4	25,6

Die Energieeinsparungen können die höheren investiven Kosten nur teilweise kompensieren. Die vorhandene Unterdeckung führt hier auch langfristig zu Kostensteigerungen für Investoren und Bauherren und damit zu einer Verteuerung des Bauens. Da das Referenzgebäude noch auf den Definitionen der EnEV 2014 beruht, sind auch die Kostensteigerungen von der EnEV 2014 zur EnEV 2016 nachvollziehbar. Tabelle 31 gibt eine Übersicht der Jahresgesamtkosten.

**Tabelle 31: Jahresgesamtkosten der untersuchten Varianten. Die grau hinterlegten Felder erfüllen die Anforderungen der EnEV 2016, die orange hinterlegten die Anforderungen des EH 55. Die Variante in Kombination mit WP1 stellt im Vergleich die günstigste Variante dar, die die EnEV 2016 erfüllt.**

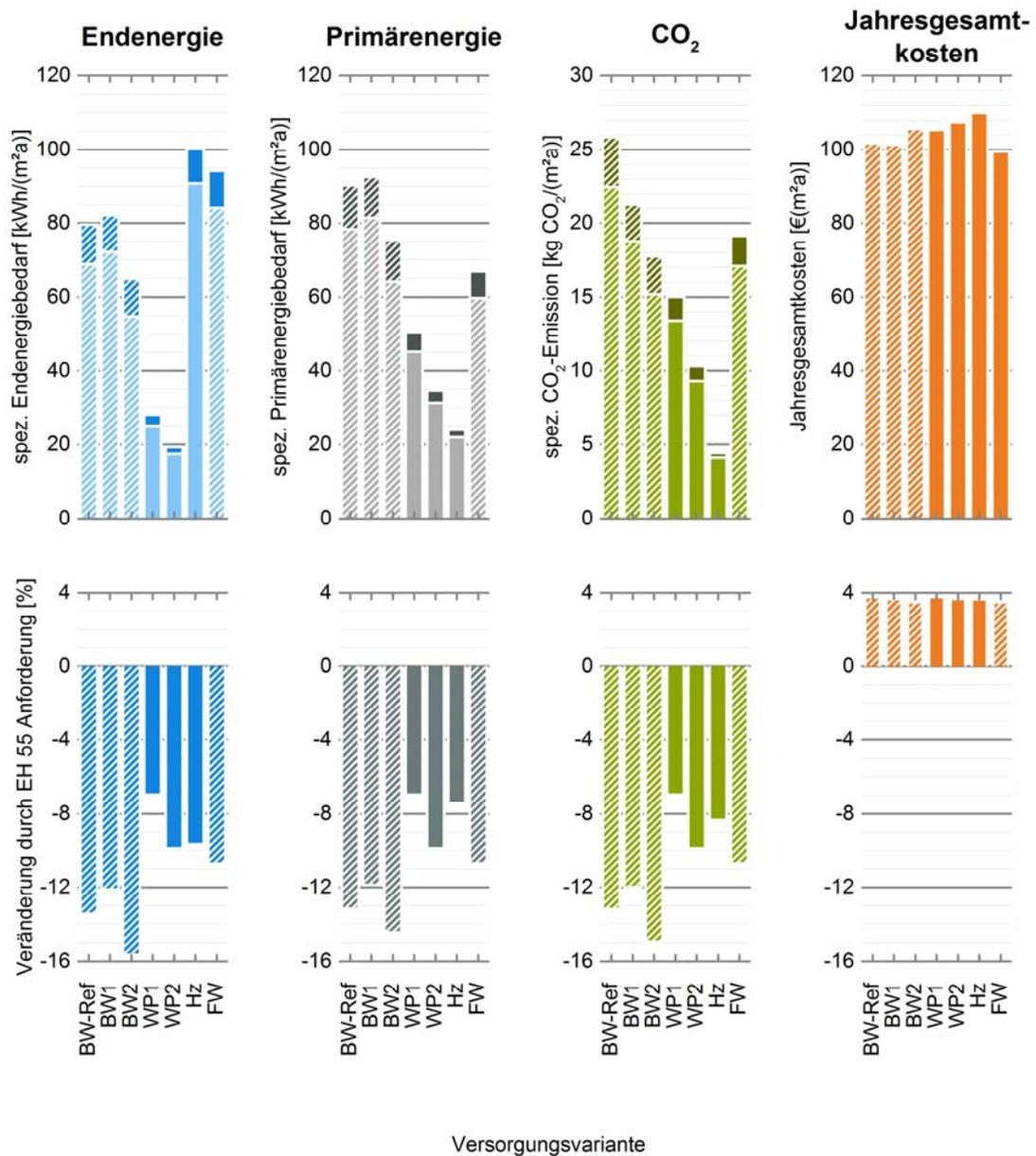
Jahresgesamtkosten [€/m <sup>2</sup> a]	H' <sub>T</sub> / H' <sub>T,Ref.</sub> [%]						
	100 EnEV 14	93 EnEV 16	90	80	70 EH 55	60	55
BW-Ref	100,0	101,8	101,8	103,9	105,6	107,6	108,8
BW1	99,7	101,3	101,3	103,4	105,0	106,9	108,0
BW2	104,0	105,7	105,7	107,7	109,4	111,3	112,5
WP1	103,9	105,5	105,4	107,4	109,0	110,7	111,8
WP2	105,6	107,5	107,5	109,7	111,4	113,5	114,7
Hz	108,1	110,0	110,0	112,2	114,0	116,1	117,4
FW	98,0	99,5	99,4	101,4	103,0	104,6	105,7

Da die Wärmepumpen-Variante auf Basis der EnEV 2016 die im Vergleich der zulässigen Varianten günstigsten Jahresgesamtkosten aufweist, bildet diese den Bezug für den Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen EnEV 2016 und EH 55 sowie für die Empfehlungen zu einem künftigen Niedrigstenergie-Gebäudestandard.

Tabelle 32 stellt dazu die prozentuale Erhöhung der Jahresgesamtkosten in Abhängigkeit der Gebäudehülle und Versorgungstechnik dar. Für das untersuchte Typengebäude bedeutete der Schritt vom Referenzgebäude (BW-Ref, EnEV 2014) zur günstigsten zulässigen Variante nach EnEV 2016 bereits eine Erhöhung der Jahresgesamtkosten von etwa 5%.

**Tabelle 32: prozentuale Erhöhung der Jahresgesamtkosten im Verhältnis zur günstigsten zulässigen Ausführung nach EnEV 2016 (WP1,  $H'_T/H'_{T,Ref}=93$ ). Die grau hinterlegten Felder erfüllen die Anforderungen der EnEV 2016, die orange hinterlegten die Anforderungen des EH 55.**

€ / € <sub>Ref</sub> [%]	$H'_T / H'_{T,Ref}$ [%]						
	100 EnEV 14	93 EnEV 16	90	80	70 EH 55	60	55
BW-Ref	-5,1	-3,5	-3,5	-1,5	0,1	2,0	3,2
BW1	-5,5	-3,9	-3,9	-1,9	-0,4	1,4	2,4
BW2	-1,4	0,2	0,2	2,2	3,7	5,5	6,6
WP1	-1,5	0,0	-0,1	1,9	3,3	5,0	6,0
WP2	0,2	1,9	1,9	4,0	5,6	7,6	8,8
Hz	2,5	4,3	4,3	6,4	8,1	10,1	11,3
FW	-7,1	-5,7	-5,7	-3,8	-2,4	-0,8	0,2



**Abbildung 25:** Variantenvergleich der prozentualen Einsparung an End- ( $Q_e$ ) und Primärenergie ( $Q_p$ ),  $CO_2$ -Emissionen sowie Jahresgesamtkosten durch die Durchführung nach EH 55 gegenüber den Anforderungen der EnEV 2016. Die oberen Balkendiagramme zeigen den Vergleich von EnEV 2016 (dunkler Balken der jeweiligen Farbe) mit dem EH 55 (heller Bereich der jeweiligen Farbe). Die Differenzen bzw. Veränderungen sind in den unteren Balkendiagrammen abgebildet.

Abbildung 25 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse und die Veränderungen bei Energiebedarf,  $CO_2$ -Emissionen und Jahresgesamtkosten durch die Anwendung des EH 55-Standards gegenüber dem EnEV 2016-Standard. Aus den Ergebnissen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- (1) Eine energetische Verbesserung der Gebäudehülle durch Verschärfung der Anforderungen an den Transmissionswärmeverlustkoeffizienten  $H_T$  führt bei Betrachtung der Mediankosten zu höheren jährlichen Kosten. Für den

EH 55-Standard betragen diese gegenüber der EnEV 2016 etwa 850€/a, was einer Steigerung von etwa 14% für die Gebäudehülle entspricht.

- (2) Die erzielten Einsparungen durch das EH 55 variieren in Abhängigkeit des gewählten Versorgungssystems, reichen aber nicht aus, die Mehrkosten zu kompensieren. Das bedeutet, dass eine kostenneutrale Umsetzung als wirtschaftliche Minimalanforderung nicht möglich ist. Die vorhandenen Deckungsfehlbeträge bieten Ansätze zur Gestaltung möglicher Fördermaßnahmen.
- (3) Der EH 55-Standard führt zu einer Erhöhung der Jahresgesamtkosten zwischen 4% und 9%. Der höhere bauliche Aufwand verursacht höhere Kapitalkosten, die trotz günstiger Rahmenbedingungen (Kapitalzins von 2%) deutlich stärker zum Tragen kommen als die Kostenersparnis durch geringeren Energieverbrauch. Dies ändert sich auch im Grundsatz nicht, wenn längere Betrachtungszeiträume (30a) und / oder hohe Energiepreissteigerungen (z.B. 5%) zugrunde gelegt werden. (Die Variante mit Fernwärmeversorgung wird hier nicht berücksichtigt, da der Einsatz von Fernwärme bei sehr hohen energetischen Standards aus Sicht des Betreibers nicht mehr wirtschaftlich ist und damit kaum zum Einsatz kommen wird).
- (4) Eine technologieoffene Umsetzung des EH 55-Standards ist nur mit Einschränkungen gegeben. Von den betrachteten Versorgungssystemen können nur die Wärmepumpenvarianten und der Holzpelletkessel bei einfacher Konfiguration die Anforderungen an den Primärenergiekennwert erfüllen. Alle anderen Systeme benötigen zusätzliche Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz (z.B. bessere Gebäudehülle, effizientere FW) oder zur zusätzlichen Einbindung erneuerbarer Energien (z.B. höherer Solarthermieanteil, Biogas, etc.). Insbesondere für multivalente Systeme (Versorgungssysteme die mehrere Wärmequellen nutzen) ist dann von einem weiteren deutlichen Anstieg der Kosten auszugehen.
- (5) Das Kosteneinsparpotenzial für Baukonstruktion und Anlagentechnik durch weiteren technischen Fortschritt ist begrenzt. Zwar ist mit Verschiebungen von Marktanteilen (z.B. Brennwertkessel → Wärmepumpen) zu rechnen. Diese werden jedoch weder die Kostenstrukturen noch Geschäftsmodelle auf absehbare Zeit disruptiv verändern.

### 6.3 Weiterführende Fragestellungen und Forschungsbedarf

Aus den Ergebnissen zur Wirtschaftlichkeit energetischer Gebäudestandards ergeben sich weiterführende Fragestellungen und Forschungsbedarf:

- (1) Die hier vorgestellten Untersuchungen beschränken sich auf ein typisches Einfamilienhaus. Die Aussagen können im Grundsatz auf alle kleineren Ge-

bäudetypen wie Reihenhäuser, Doppelhäuser, 2-3-Familienhäuser übertragen werden. Im mehrgeschossigen Wohnungsbau verändern sich nicht nur die baulichen Begebenheiten, sondern auch Akteure und Interessen, wodurch andere Rahmenbedingungen in der Wirtschaftlichkeitsbewertung berücksichtigt werden müssen. Für Aussagen zur Wirtschaftlichkeit energetischer Standards im Geschosswohnungsbau sind daher getrennte Untersuchungen notwendig, die auf dafür geeigneten und angepassten Datengrundlagen beruhen.

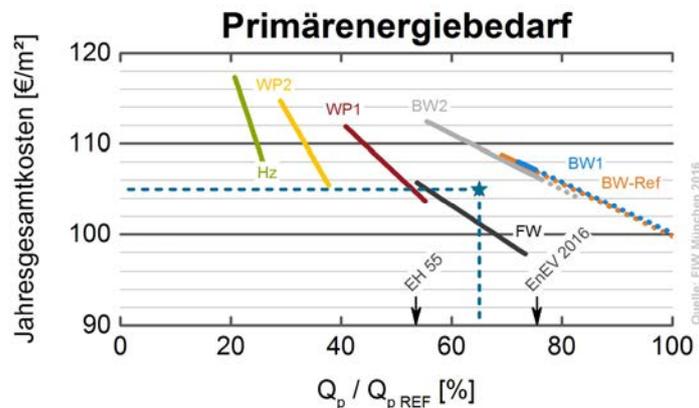
- (2) Die Ergebnisse für das EFH zeigen, dass bei Einsatz effizienter Versorgungstechnik oder hohen Anteilen erneuerbarer Energien (z.B. Wärmepumpe, Holzpelletkessel) eine stetige Verbesserung der Gebäudehülle nur geringe Effekte hinsichtlich der Reduktion des Primärenergieverbrauchs oder der CO<sub>2</sub>-Emissionen bewirkt. Für diese Kombinationen ist bereits heute ein Grenznutzen gegeben. Bei gleichen Kosten können mit anderen Effizienzmaßnahmen (z.B. effizientere Versorgungstechnik, Optimierung des Energiesystems) höhere Einsparungen an CO<sub>2</sub> oder Primärenergie erreicht werden. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist diesen Maßnahmen der Vorrang zu geben. Allerdings existieren nur wenige Aussagen, die die Wirtschaftlichkeit unterschiedlichster Effizienzmaßnahmen im Vergleich setzen und hinsichtlich ihrer volkswirtschaftlichen und klimapolitischen Relevanz bewerten. Bei begrenzt verfügbaren monetären Mitteln ist dies jedoch notwendig, damit Klimaschutzmaßnahmen plan- und sinnvoll eingesetzt werden. Hierzu ist die Entwicklung umfassender Szenarien und Studien notwendig.
- (3) Die energetische Optimierung von Gebäuden bleibt eine kapitalintensive Maßnahme zur Reduktion des Primärenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen. In den Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist daher der Einfluss der Kapitalkosten im Vergleich am höchsten, selbst wenn extreme Energiepreiserhöhungsraten (10-15%) berücksichtigt würden. Für eine Umsetzung von energieeffizienten Gebäuden nach rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist es weiterhin notwendig, die Baukosten zu reduzieren. Die Gewerke übergreifende Entwicklung von Produkten und integrative Planung bieten weiteres Potential, Synergien zu nutzen und Kosten zu reduzieren. Dazu bedarf es weiterer Forschungsarbeiten, um diese Potentiale zu identifizieren und in entsprechenden Produkten umzusetzen.

## 6.4 Empfehlungen

Der Einfluss des Gebäudesektors auf den Gesamtenergieverbrauch in allen Volkswirtschaften ist unbestritten und vielfach zitiert. Entsprechend sehen die klima- und energiepolitischen Zielsetzungen von Bundesregierung und EU strengere Anforderungen an die künftigen energetischen Standards für Neubauten vor. Diese umfassen genaue Vorgaben an die Qualität der Gebäudehülle und an den Gesamtprimär-

energiebedarf des Gebäudes. Gleichzeitig ist das Wirtschaftlichkeitsgebot zu berücksichtigen und auf die Kosteneffizienz („kostenoptimales Niveau“) der Maßnahmen zu achten. Vor diesem Hintergrund können aus den Ergebnissen dieser Studie folgende Empfehlungen zur Definition eines künftigen, gesetzlichen Niedrigstenergie-Gebäudestandards abgeleitet werden.

- (1) Die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich Jahresgesamtkosten und Primärenergiebedarf zeigt die Möglichkeiten zur Ausgestaltung der primärenergetischen Anforderungen. Mit Hinweis auf die Technologieoffenheit der Versorgungstechnik ergibt ein Verhältnis von etwa  $Q_p/Q_{p,Ref}=0,65$  eine Grenze bei der herkömmliche Versorgungstechnologien auf Basis von Brennkesseln mit noch sinnvollen Anteilen an Solarthermie (aber bereits mit Einsatz von Lüftungs-WRG) bei vergleichbaren Jahresgesamtkosten zum Einsatz kommen können (Abbildung 26). Höhere Anforderungen erlauben für diese Anlagenkonfigurationen kaum noch Spielraum und schließen diese praktisch aus oder verlangen eine signifikante Erhöhung des Anteils an regenerativer Energie mit entsprechenden Mehrkosten. Gleichzeitig kann auf diesem Niveau die Außenluft-WP als günstigste Variante im Vergleich zu den Anforderungen der EnEV 2016 nahezu kostenneutral (+0,3% Mehrkosten) realisiert werden.

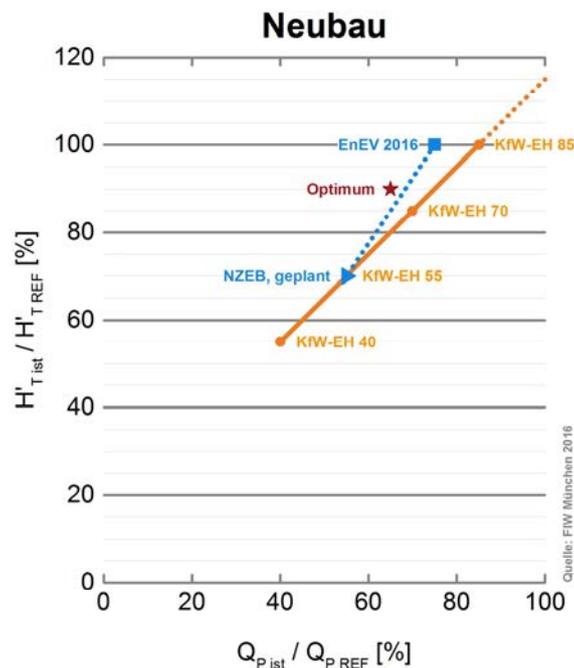


**Abbildung 26:** Jahresgesamtkosten der Versorgungsvarianten in Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs. Die blau gestrichelte Linie markiert den Grenzbereich, der eine technologieoffene Anlagenkonfiguration erlaubt und damit die maximale Anforderung an  $Q_p$  darstellen sollte.

- (2) Die Ergebnisse zeigen, dass hinsichtlich der thermischen Qualität der Gebäudehülle ein Grenznutzen erreicht ist. Eine deutliche Verschärfung der Anforderung bewirkt – insbesondere in Kombination mit effizienter oder auf erneuerbaren Energien basierender Versorgungstechnik – nur noch geringe Primärenergieeinspareffekte bei steigenden jährlichen Kosten. Wiederum die Kombination mit Wärmepumpe als kostengünstigste Lösung betrachtend, werden die oben formulierten Anforderungen mit einer leichten Erhöhung der Anforderungen an die Gebäudehülle erreicht ( $H'_T=H'_{T,Ref}=0,90$ ). Gegenüber

der EnEV 2016 entspricht dies einer Kostensteigerung von 0,6%.

- (3) Bei Umsetzung beider oben genannter Punkte ergibt sich als günstigste Systemvariante die Kombination mit einer Außenluft-Wärmepumpe (WP1). Gegenüber der ursprünglichen Referenzausführung nach EnEV 2014/2016 entspricht dies etwa einer Halbierung des Primärenergiebedarfs.
- (4) Ohne staatliche Förderung, sei es durch günstige Finanzierungsrahmenbedingungen, Steuernachlässe oder direkte Zuschüsse, ist mit dem EH 55-Standard eine Zusatzbelastung der Bauherren nicht zu vermeiden. Je nach Versorgungstechnik sind dies zwischen 4 und 9% höhere Jahresgesamtkosten gegenüber der EnEV 2016. Mit der Festlegung als gesetzlicher Standard entfällt jedoch die Förderfähigkeit. Entsprechend der bisherigen Förderlogik sollte das EH 55 als Förderstandard erhalten bleiben, um die Teuerungen des Bauens zu begrenzen und gleichzeitig den Anreiz für höhere energetische Standards aufrecht zu erhalten.



**Abbildung 27:** empfohlene Grenzwerte für  $H'_T$  und  $Q_p$  für einen künftigen Niedrigstenergie-Gebäudestandard sowie die parallele Entwicklung der Förderstandards.

**Als Anforderungen für einen künftigen Gebäudestandard und Förderrahmen für Einfamilienhäuser wird daher empfohlen:**

- (1) Erhalt der Endenergie  $Q_e$  als Kennwert für den tatsächlichen Energiebedarf und die Einteilung in Effizienzklassen (Energieausweis).**
- (2) Erhalt des Primärenergiebedarfs  $Q_p$  gegenüber  $CO_2$ -Äquivalenten als derzeit – im Kontext der nationalen und europäischen Regelwerke - konsistenterer Kennwert zur Bewertung der Klimarelevanz.**
- (3) Maximale Reduktion des spezifischen Transmissionswärmeverlustes auf 90% des Referenzwertes der EnEV.**
- (4) Maximale Reduktion des Primärenergiebedarfs auf 65% des Referenzwertes der EnEV.**
- (5) Beibehaltung des KfW-Effizienzhaus 55 (EH 55) als Förderstandard zur Kompensation der Kostensteigerungen.**

## Anhang

**Tabelle 33: Bruttokosten der Außenwände.** Diese wurden aus den Median-Werten unterschiedlicher Bauweisen mit einer Gewichtung entsprechend ihrer Marktanteile ermittelt. Die Ausführung entsprechend des Referenzgebäudes ist hervorgehoben.

	U-Wert	Median Bruttokosten Bauteil [€/m <sup>2</sup> ]
	[W/m <sup>2</sup> K]	Außenwand
AW1	0,30	149
<b>AW2</b>	<b>0,28</b>	<b>161</b>
AW3	0,24	176
AW4	0,20	190
AW5	0,18	204
AW6	0,15	224

**Tabelle 34: Bruttokosten (Median) der Bauteile Fenster, Haustüre, Kellerdecke und Dach. Die Ausführung entsprechend des Referenzgebäudes ist hervorgehoben.**

Bauteil		g-Wert	U-Wert	Median Bruttokosten
		[-]	[W/m <sup>2</sup> K]	[€/m <sup>2</sup> ]
<b>Fenster</b>				
<b>F1</b>	<b>Zweischeiben Wärmeschutzverglasung (Wärmeschutz A)</b>	<b>0,6</b>	<b>1,30</b>	<b>323</b>
F2	Dreischeiben Wärmeschutzverglasung	0,5	1,10	373
F3	Dreischeiben Wärmeschutzverglasung (Wärmeschutz A PLUS)	0,4	0,70	466
<b>Haustüre</b>				
<b>H1</b>	<b>Haustür, einflügelig mit Mehrfachverriegelung</b>		<b>1,80</b>	<b>1.089</b>
H2	Haustür, einflügelig mit Mehrfachverriegelung		1,30	1.245
H3	Haustür, einflügelig mit Mehrfachverriegelung		1,10	1.546
<b>Kellerdecke</b>				
<b>K1</b>	<b>Kellerdecke mit schw. Estrich (ca. 10 cm WD, <math>\lambda</math> 0,035 W/(m·K) )</b>		<b>0,35</b>	<b>212</b>
K2	Kellerdecke mit schw. Estrich (ca. 14 cm WD, $\lambda$ 0,035 W/(m·K) )		0,25	225
K3	Kellerdecke mit schw. Estrich (ca. 22 cm WD, $\lambda$ 0,035 W/(m·K) )		0,15	267
<b>Dach</b>				
D1	Sparrendachkonstruktion (ca. 18 cm WD, $\lambda$ 0,035 W/(m·K) )		0,24	284
<b>D2</b>	<b>Sparrendachkonstruktion (ca. 22 cm WD, <math>\lambda</math> 0,035 W/(m·K) )</b>		<b>0,20</b>	<b>290</b>
D3	Sparrendachkonstruktion (ca. 22 cm WD, $\lambda$ 0,035 W/(m·K) + ca. 4 cm WD, $\lambda$ 0,024 W/(m·K) )		0,15	309
D4	Sparrendachkonstruktion (ca. 22 cm WD, $\lambda$ 0,035 W/(m·K) + ca. 12 cm WD, $\lambda$ 0,024 W/(m·K) )		0,10	334

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesgesetzblatt BGBl, Hrsg., *Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden - Energieeinsparungsgesetz EnEG*, Berlin: Bundesanzeiger Verlag, 2013.
- [2] Amtsblatt der Europäischen Union, Hrsg., *Richtlinie 2010/31/EU der europäischen Parlaments und Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden*, Brüssel: Online Publikation, 2010.
- [3] Bundesgesetzblatt BGBl, Hrsg., *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)*, Berlin: Bundesanzeiger Verlag, 2015.
- [4] Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), Hrsg., *Anlage zum Merkblatt Energieeffizient Bauen - Technische Mindestanforderungen*, Frankfurt, 2016.
- [5] BMUB, Hrsg., *Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*, Berlin, 2016.
- [6] Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), Hrsg., *Förderreport KfW Bankengruppe 2016*, Frankfurt, 2016.
- [7] Bundesgesetzblatt BGBl, Hrsg., *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG)*, Berlin: Bundesanzeiger Verlag, 2015.
- [8] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bautätigkeit und Wohnungen, Bautätigkeit - 2014*, Wiesbaden, 2015.
- [9] D. Walberg, O. Brosius, T. Schulze und A. Cramer, *Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden - Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht*, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Hrsg., Kiel, 2015.
- [10] BMWi, Hrsg., *Energiedaten - Gesamtausgabe*, Berlin, 2016.
- [11] CARMEN e.V., Hrsg., *Preisentwicklung bei Holzpellets*, 2016.
- [12] VDI 2067 Blatt 1, *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung.*, Verein Deutscher Ingenieure - VDI, Hrsg., Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [13] Deutsche Bundesbank, Hrsg., *Tägliche Umlaufrenditen festverzinslicher Wertpapiere inländischer Emittenten nach Wertpapierarten*, Frankfurt, 2016.
- [14] Die Welt, Hrsg., *Wer heute ein Haus kauft ist fast 40 Jahre alt*, Berlin: WeltN24 GmbH, 2014.
- [15] DIN V 18599 - 1, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*, DIN, Hrsg., Berlin: Beuth Verlag, 2011.

- [16] Bundesgesetzblatt, Hrsg., *Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2008-2012*, Berlin: Bundesanzeiger Verlag, 2011.
- [17] P. Icha und G. Kuhs, *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015*, Bd. Climate Change, Dessau-Roßlau: Online Publikation, 2016.
- [18] DIN V 18599 - 10, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10*, DIN, Hrsg., Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [19] D. Walberg, A. Holz, T. Gniechwitz und T. Schulze, *Wohnungsbau in Deutschland 2011 - Modernisierung oder Bestandsersatz*, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Hrsg., Kiel, 2011.
- [20] D. Walberg und T. Gniechwitz, *Wohngebäude Fakten 2016 - Eine Analyse des Wohngebäudezustands in Deutschland*, BfW und Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Hrsg., 2016.
- [21] D. Walberg und T. Gniechwitz, *Passivhaus, Effizienzhaus, Energiesparhaus & Co - Aufwand, Nutzen und Wirtschaftlichkeit*, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Hrsg., Kiel, 2010.
- [22] D. Walberg, T. Gniechwitz, T. Schulze und A. Cramer, *Optimierter Wohnungsbau*, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Hrsg., Kiel, 2014.
- [23] D. Walberg, T. Gniechwitz und M. Halstenberg, *Kostentreiber für den Wohnungsbau. Untersuchung und Betrachtung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Gestehungskosten und auf die aktuelle Kostenentwicklung von Wohnraum in Deutschland*, Bd. Bauforschungsbericht, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen, e.V., Hrsg., Kiel: Online Publikation, 2015.
- [24] D. Walberg und T. Gniechwitz, *Bestandsersatz 2.0 - Potenziale und Chancen - Studie zur aktuellen Bewertung des Wohngebäudezustandes in Deutschland unter Berücksichtigung von Neubau, Sanierung und Bestandsersatz*, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Hrsg., Kiel, 2016.
- [25] D. Thiel und M. Ehrlich, *Ermittlung von spezifischen Kosten energiesparender Bauteil-, Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nichtwohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012*, BMVBS, Hrsg., Berlin: Online Publikation, 2012.
- [26] N. Thamling, J. Kirchner und J. Pehnt, *Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude*, Prognos, Hrsg., Berlin, Heidelberg, Darmstadt.
- [27] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Wirtschaftsrechnungen - Einkommens- und Verbrauchsstichprobe, Haus- und Grundbesitz sowie Wohnverhältnisse privater Haushalte - 2008*, Wiesbaden, 2009.

- [28] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Gebäude und Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland am 9. Mai 2011*, Wiesbaden, 2013.
- [29] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bautätigkeit und Wohnungen, Bestand an Wohnungen - 2013*, Wiesbaden, 2014.
- [30] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bautätigkeit und Wohnungen, Bautätigkeit - 2013*, Wiesbaden, 2014.
- [31] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bautätigkeit und Wohnungen, Bautätigkeit - 2012*, Wiesbaden, 2013.
- [32] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bautätigkeit und Wohnungen, Bautätigkeit - 2011*, Wiesbaden, 2012.
- [33] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bauen und Wohnen, Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte - 2010*, Wiesbaden, 2012.
- [34] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bauen und Wohnen, Baugenehmigungen/Baufertigstellungen, Baukosten - 2013*, Wiesbaden, 2014.
- [35] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bauen und Wohnen, Baugenehmigungen/Baufertigstellungen u.a. nach der Gebäudeart - 2014*, Wiesbaden, 2015.
- [36] M. Neitzel, S. Austrup, W. Gottschalk, D. Walberg und T. Gniechwitz, *Instrumentenkasten für wichtige Handlungsfelder der Wohnungsbaupolitik*, InWIS Forschung & Beratung und Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Hrsg., Bochum/ Kiel, 2016.
- [37] M. Neitzel, D. Dangel, W. Gottschalk, H. Schröder, N. Raschper und B. Wiblishauser, *Bericht der Baukostensenkungskommission*, N. B. u. R. (. Bundesministeriums für Umwelt, Hrsg., Berlin, 2015.
- [38] R. Neddermann und C. Weber, *Energetische Optimierung im Wohnungsbau. Wirtschaftlichkeit - Nutzen - Effizienz*, Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2016.
- [39] A. Maas, H. Erhorn , J. de Boer, B. Oschatz und H. Schiller, *Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Gebäude mit der EnEV 2012 - Anforderungsmethodik, Regelwerk und Wirtschaftlichkeit.*, BMVBS, Hrsg., Berlin: Online Publikation, 2012.
- [40] A. Maas, H. Erhorn, J. de Boer, B. Oschatz und H. Schiller, *Ergänzungsuntersuchungen zum Wirtschaftlichkeitsgutachten für die Fortschreibung der Energieeinsparverordnung*, BMVBS, Hrsg., Berlin: Online Publikation, 2012.
- [41] P. Icha, *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2013*, Umweltbundesamt, Hrsg., Dessau-Roßlau, 2014.
- [42] A. Holm, C. Mayer und C. Sprengard, *Wirtschaftlichkeit von wärmedämmenden Maßnahmen*, F. München, Hrsg., Gräfelfing: Online Publikation, 2015.

- [43] E. Hinz, *Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden*, B. u. S. (. Bundesministerium für Verkehr, Hrsg., Berlin, 2012.
- [44] M. Großklos, *Kumulierter Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und –versorgungen*, I. W. u. U. (IWU), Hrsg., Darmstadt, 2014.
- [45] M. Großklos, *Kumulierter Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und –versorgungen*, I. W. u. U. (IWU), Hrsg., Darmstadt, 2009.
- [46] V. Bürger, T. Hesse, D. Quack, A. Palzer und B. Köhler, *Klimaneutraler Gebäudebestand 2050*, Umweltbundesamt, Hrsg., Dessau-Roßlau, 2016.
- [47] Bundesumweltamt, Hrsg., *Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990-2014 unter Verwendung von Berechnungsergebnissen der Nationalen Koordinierungsstelle Emissionsberichterstattung*, Dessau-Roßlau: Online Publikation, 2016.
- [48] Bundesregierung, Hrsg., *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, Berlin, 2010.
- [49] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hrsg., *Energieeffizienzstrategie Gebäude - Wege zu einem klimaneutralen Gebäudebestand*, Berlin, 2015.
- [50] C. Beecken und S. Schulze, „Energieeffizienz von Wohngebäuden: Energieverbräuche und Investitionskosten energetischer Gebäudestandards,“ *Bauphysik*, Bd. 33, Nr. 6, 2011.
- [51] „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB),“ 2011.
- [52] Amtsblatt der Europäischen Union, Hrsg., *Empfehlung 2016/1318 der Kommission über Leitlinien zur Förderung von Niedrigstenergiegebäuden und bewährten Verfahren, damit bis 2020 alle neuen Gebäude Niedrigstenergiegebäude sind*, Brüssel, 2016.
- [53] Amtsblatt der Europäischen Union, Hrsg., *Delegierte Verordnung Nr. 244/2012 ... zur Ergänzung der Richtlinie 2010/31/EU ... durch die Schaffung eines Rahmens für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden ...*, Brüssel: Online Publikation, 2012.
- [54] R. Albert, M. Angrick, M. Bade und F. Balzer, *Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung - Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamtes*, UBA, Hrsg., Dessau-Roßlau: Online Publikation, 2016.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitliche Entwicklung der Anforderungen und des Bewertungsumfangs an das energiesparende Bauen in Deutschland seit 1977 durch Einführung des Energieeinspargesetzes im Jahr 1976. Im Laufe der verschiedenen Anpassungen der WSchV bzw. EnEV wurde das System immer komplexer.	10
Abbildung 2:	Zeitliche Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten für die Bauteile der Gebäudehülle in Abhängigkeit der verschiedenen Wärmeschutz- und Energieeinspar-Verordnungen.	10
Abbildung 3:	Zeitliche Entwicklung der Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz der Gebäudehülle. Bis zur Einführung der EnEV 2002 musste der Wärmeschutz in Form eines mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten $k_m$ nachgewiesen werden. Die Einführung der EnEV im Jahr 2002 führte zu einer Umstellung auf die vergleichbare Größe spezifischer Transmissionswärmeverlust $H'_T$ . Bis zum Jahr 2009 wurde der benötigte Wärmeschutz der Gebäudehülle in Abhängigkeit des $A/V_e$ Verhältnisses begrenzt. Seit 2009 gelten die Anforderungen an $H'_T$ entsprechend den Tabellenwerten der EnEV (Anlage 1, Tabelle 2). Hier wird nur zwischen Gebäudetypen unterschieden. Diese sind im Diagramm für die typischen Bereiche von $A/V_e$ eingezeichnet. Mit Einführung der EnEV 2016 gilt zusätzlich die Anforderung $H'_T \leq H'_{T,Ref}$ hinzu.	11
Abbildung 4:	Zusammenhang zwischen dem zukünftigen Energiesparrecht für Gebäude und EU Richtlinie 2010/31/EU	13
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Jahresgesamtkosten eines Gebäudes in unterschiedlichen Ausführungen in Abhängigkeit vom Primärenergiebedarf mit dem Ziel der Bestimmung des ökonomischen Optimums im Sinn der EU-Richtlinie 2010/31/EU.	16
Abbildung 6:	Förderstandards der KfW-Bank in Abhängigkeit der Hauptanforderungen $H'_T$ und $Q_p$ sowie aktueller und geplanter gesetzlicher Standard nach EnEV. Jede Förderstufe bedeutet eine Reduktion des Transmissionswärmeverlust $H'_T$ und der Primärenergiebedarfs $Q_p$ jeweils um 15%. Der geplante Standard (EH 55) sieht demgegenüber eine Verschärfung um 20% für $Q_p$ und 30% für $H'_T$ vor.	18
Abbildung 7:	Anzahl der geförderten Neubauten nach Förderstandards der KfW seit 2010. Für das Jahr 2016 sind bisher nur die Werte für das 1. bis 3. Quartal veröffentlicht. Ab April 2016 wurde der KfW-EH 70 Förderstandard für Neubauten gestrichen. Seither gilt nur noch KfW-EH 55, KfW-EH 40 und KfW-EH 40 Plus.	18
Abbildung 8:	Methodik zur Ermittlung des ökonomischen Optimums.	20
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Parameterstudie Gebäudehülle	21
Abbildung 10:	Entwicklung der Endverbraucherenergiepreise von 1990 bis 2015 für unterschiedliche Energieträger [10].	33
Abbildung 11:	Zeitliche Entwicklung der realisierten Umlaufrendite im Zeitraum 1990 bis 2015 [13].	34

Abbildung 12: Ansichten und Grundrisse des Typengebäudes. Orientierung des Eingangs nach Osten.	40
Abbildung 13: flächenbezogene Brutto-Bauteilkosten (Median) in Abhängigkeit des Wärmedurchgangs für die bestimmenden Bauteile der Gebäudehülle.	42
Abbildung 14: errechneter spezifischer Endenergiebedarf nach DIN V 18599 der Versorgungsvarianten für das Typengebäude bei Annahme der energetischen Standards EnEV 2016 und EH 55 Standard. Die jeweils gültigen Effizienzklassen sind gesondert angegeben.	47
Abbildung 15: errechneter Endenergiebedarf nach DIN V 18599 der Versorgungsvarianten, dargestellt nach Energieträgern.	48
Abbildung 16: rechnerischer Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 der Versorgungsvarianten. Die schraffierten Säulen kennzeichnen die Versorgungsvarianten, die die jeweils gültigen Anforderungen der EnEV nicht erfüllen.	49
Abbildung 17: rechnerische CO <sub>2</sub> -Emissionen der untersuchten Varianten. Die Versorgungsvariante auf Basis von Holzpellets erzielt die geringsten Emissionen aufgrund des niedrigen CO <sub>2</sub> -Faktors. Günstig sind auch die beiden Wärmepumpensysteme aufgrund der Einbindung von Umweltenergie.	51
Abbildung 18: errechnete Investitionskosten der Gebäudehülle in Abhängigkeit ihres spezifischen Transmissionswärmeverlustkoeffizienten $H^*_T$ . Die grauen Punkte entsprechen den Anforderungen der EnEV 2014, die grünen Punkte den Anforderungen der EnEV 2016 und die gelben den Anforderungen des EH 55. Die Häufigkeitsverteilungen zur Qualität der Gebäudehülle und den jeweiligen Investitionskosten ist mit den orangen bzw. blauen Balken dargestellt.	53
Abbildung 19: Anteil der verschiedenen Bauteile an den normierten Investitionskosten der Gebäudehülle. Die hohen Flächenanteile von Dach und Außenwand machen sich auch bei den Investitionskosten bemerkbar. Mit Reduktion von $H^*_T$ nehmen die Kosten für Dach, Keller, Fenster und Türen im Vergleich ab oder bleiben etwa gleich, die Kostenanteile für Außenwand und Wärmebrücken steigen.	54
Abbildung 20: errechnete spezifische jährliche Energiekosten der Versorgungsvarianten. Im direkten Vergleich der Gebäudestandards EnEV 2016 und EH 55 liegen die Einsparungen der Energiekosten bei gleicher Versorgungstechnik zwischen 17,3 und 24,8%. In Bezug zur Referenz (BW-Ref, EnEV 2016) wird nicht mit allen Varianten eine Einsparung erzielt. Hier liegen die Ergebnisse zwischen 3,9 und 12,0% Minderkosten bzw. 7,4 und 43,2% Mehrkosten.	56
Abbildung 21: Annuität der laufenden Kosten für die unterschiedlichen Versorgungssysteme und energetischen Standards.	58
Abbildung 22: errechnete Jahresgesamtkosten der Versorgungsvarianten nach VDI 2067. Dargestellt sind die jeweiligen Kosten für Kapital, differenziert nach Hülle, Baudifferenzkosten und Anlage sowie die laufenden Kosten für Betrieb und Instandhaltung der Anlage. Die schraffierten Balken erfüllen die jeweiligen Anforderungen an den Primärenergiebedarf nicht.	60

- Abbildung 23: berechnete Jahresgesamtkosten in €/m<sup>2</sup>a in Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs für unterschiedliche thermischen Qualitäten der Gebäudehülle ( $H'_T$ ) und Versorgungssysteme. Die beiden Pfeile markieren die Mindestanforderungen an den Primärenergiebedarf, die entsprechend der EnEV 2016 bzw. des EH 55 einzuhalten sind. 61
- Abbildung 24: Regression der Jahresgesamtkosten für unterschiedliche Versorgungssysteme in Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs  $Q_p$ . Die gepunkteten Linien entsprechen den Anforderungen der EnEV 2014. 62
- Abbildung 25: Variantenvergleich der prozentualen Einsparung an End- ( $Q_e$ ) und Primärenergie ( $Q_p$ ), CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Jahresgesamtkosten durch die Durchführung nach EH 55 gegenüber den Anforderungen der EnEV 2016. Die oberen Balkendiagramme zeigen den Vergleich von EnEV 2016 (dunkler Balken der jeweiligen Farbe) mit dem EH 55 (heller Bereich der jeweiligen Farbe). Die Differenzen bzw. Veränderungen sind in den unteren Balkendiagrammen abgebildet. 67
- Abbildung 26: Jahresgesamtkosten der Versorgungsvarianten in Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs. Die blau gestrichelte Linie markiert den Grenzbereich, der eine technologieoffene Anlagenkonfiguration erlaubt und damit die maximale Anforderung an  $Q_p$  darstellen sollte. 70
- Abbildung 27: empfohlene Grenzwerte für  $H'_T$  und  $Q_p$  für einen künftigen Niedrigstenergie-Gebäudestandard sowie die parallele Entwicklung der Förderstandards. 71

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Höchstwerte des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlusts nach EnEV 2016 (Anlage 1, Tabelle 2).	12
Tabelle 2:	Klimaschutzplan der Bundesregierung vom 14.11.2016. Formuliert Zielsetzungen für den Gebäudebereich bis 2050 [5].	15
Tabelle 3:	Die KfW hat in ihren Programmen „energieeffizientes Bauen“ bisher folgende Effizienzhausklassen definiert. Seit 1.4.2016 sind nur noch die KfW-EH 55, KfW-EH 40 und KfW-EH 40 Plus Standards förderfähig.	17
Tabelle 4:	Primär- und Sekundäranforderungen EnEV. Für die EnEV 2021 wird der KfW-EH 55-Standard als Definition des NZEB angenommen.	22
Tabelle 5:	Auszug der wichtigsten Kennwerte zur Modellierung des Referenzgebäudes nach EnEV 2014/2016.	23
Tabelle 6:	Hauptanforderung an die Integration von erneuerbaren Energien in die Versorgung von Gebäuden gemäß EEWärmeG [7]. Dies gilt als erfüllt, wenn folgende Mindestwerte eingehalten werden.	24
Tabelle 7:	derzeitige Ersatzmaßnahmen EEWärmeG [7].	25
Tabelle 8:	Verbraucherpreise der verschiedenen Energieträger in €/kWh für Haushalte im Jahr 2015 [10] [11].	29
Tabelle 9:	rechnerischer Ansatz des Aufwands für Inspektion, Wartung und Instandsetzung für verschiedene Anlagenkomponenten nach VDI 2067 (Auszug) [12].	31
Tabelle 10:	Brennwert / Heizwert für Umrechnung der Endenergiewerte [15].	35
Tabelle 11:	Primärenergiefaktoren nach Energieträger (DIN V 18599) [15].	36
Tabelle 12:	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren nach Energieträger [16] [17].	36
Tabelle 13:	Auszug der wichtigsten Kennwerte sowie Flächen des Typengebäudes.	38
Tabelle 14:	Auszug der wichtigsten Kennwerte sowie Flächen des Typengebäudes.	39
Tabelle 15:	Gewählte Konstruktionen der Außenwände	41
Tabelle 16:	Mehrkosten (Brutto) für Optimierung der Wärmebrücken	43
Tabelle 17:	Untersuchte Varianten der Anlagentechnik	44
Tabelle 18:	Bruttokosten (Median) der Anlagentechnik aus den Marktauswertungen.	45
Tabelle 19:	Nutzenergiebedarf für Heizung (HWB) und Warmwasser (TWW). Die Varianten, die den EnEV 2016- bzw. den EH 55-Standard erfüllen sind grau bzw. orange markiert.	46
Tabelle 20:	Endenergiebedarf in kWh/(m <sup>2</sup> a) für die Standards nach EnEV 2014, EnEV 2016 und EH 55. Die Varianten, die den EnEV 2016 bzw. den EH 55-Standard erfüllen sind grau bzw. orange markiert.	48
Tabelle 21:	Primärenergiebedarf in kWh/(m <sup>2</sup> a) für die Standards nach EnEV 2014, EnEV 2016 und EH 55. Die Varianten, die den EnEV 2016 bzw. den EH 55-Standard erfüllen sind grau bzw. orange markiert.	50
Tabelle 22:	CO <sub>2</sub> -Emissionen in kg/(m <sup>2</sup> a) für die Standards nach EnEV 2014, EnEV 2016 und EH 55. Die Varianten, die den EnEV 2016- bzw. den EH 55-Standard erfüllen sind grau bzw. orange markiert.	51
Tabelle 23:	Annuität der Investitionskosten für die Versorgungstechnik in €/(m <sup>2</sup> a).	54
Tabelle 24:	Annuität der Gesamtinvestitionskosten (KG300+KG400) in €/(m <sup>2</sup> a).	55

Tabelle 25:	Annuität der Energiekosten im Vergleich der Gebäudestandards EnEV 2016 und EH 55 sowie verschiedener Versorgungssysteme.	57
Tabelle 26:	Annuität der Betriebs- und Instandhaltungskosten für die untersuchten Versorgungsvarianten in €/m <sup>2</sup> a.	57
Tabelle 27:	Annuität der laufenden Kosten für die untersuchten Versorgungsvarianten in €/m <sup>2</sup> a.	58
Tabelle 28:	Jahresgesamtkosten als Annuitäten für die Varianten nach EnEV 2016 und EH 55 in €/m <sup>2</sup> a.	61
Tabelle 29:	Primärenergiebedarf in Abhängigkeit der Qualität der Gebäudehülle ( $H'_T$ ) im Verhältnis zum Referenzgebäude in %. Grau hinterlegt sind die Varianten, die die Anforderungen der EnEV 2016 ( $Q_p \leq 0,75 \cdot Q_{p,Ref}$ ) erfüllen. Die orangen Felder entsprechen den Anforderungen des EH 55 ( $Q_p \leq 0,55 \cdot Q_{p,Ref}$ ).	64
Tabelle 30:	prozentuale Zunahme der jährlichen Kosten für die Gebäudehülle in Abhängigkeit ihrer thermischen Qualität. Das orange hinterlegte Feld markiert die Mindestanforderung des EH 55.	65
Tabelle 31:	Jahresgesamtkosten der untersuchten Varianten. Die grau hinterlegten Felder erfüllen die Anforderungen der EnEV 2016, die orange hinterlegten die Anforderungen des EH 55. Die Variante in Kombination mit WP1 stellt im Vergleich die günstigste Variante dar, die die EnEV 2016 erfüllt.	65
Tabelle 32:	prozentuale Erhöhung der Jahresgesamtkosten im Verhältnis zur günstigsten zulässigen Ausführung nach EnEV 2016 (WP1, $H'_T/H'_{T,Ref}=93$ ). Die grau hinterlegten Felder erfüllen die Anforderungen der EnEV 2016, die orange hinterlegten die Anforderungen des EH 55.	66
Tabelle 33:	Bruttokosten der Außenwände. Diese wurden aus den Median-Werten unterschiedlicher Bauweisen mit einer Gewichtung entsprechend ihrer Marktanteile ermittelt. Die Ausführung entsprechend des Referenzgebäudes ist hervorgehoben.	73
Tabelle 34:	Bruttokosten (Median) der Bauteile Fenster, Haustüre, Kellerdecke und Dach. Die Ausführung entsprechend des Referenzgebäudes ist hervorgehoben.	74



**Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München**  
Lochhamer Schlag 4 | DE-82166 Gräfelfing  
Geschäftsführender Institutsleiter:

Bauaufsichtlich anerkannte  
Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle  
von Baustoffen und Bauteilen.

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des  
Wärme- und Feuchteschutzes

T+49 89 85800-0 | F +49 89 85800-40  
info@fiw-muenchen.de | www.fiw-muenchen.de  
Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm