

Tim Schöndube, Svenja Carrigan, Oliver Kornadt  
Torsten Schoch, Marco Hartner, Tobias Schilly  
Daniel Weber, Jonas Wilhelm

# **Niedrigstenergiegebäude – Entwicklung eines Standards und einer Berechnungsmethode für die Gebäudeenergieeffizienz**

F 3056

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0221-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

# Endbericht

## **Niedrigstenergiegebäude – Entwicklung eines Standards und einer Berechnungsmethode für die Gebäudeenergieeffizienz**

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.42)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



**Projektlaufzeit:** 03.09.2015 – 03.11.2017

**Zuwendungsempfänger:** Technische Universität Kaiserslautern  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung  
Paul-Ehrlich-Straße  
Gebäude 29  
D-67663 Kaiserslautern

**Projektleitung:** Dipl.-Ing. (BA) Tim Schöndube, M.Sc. (TUK)  
Jun.-Prof. Dr. Svenja Carrigan (TUK)  
Prof. Dr. Oliver Kornadt (TUK)

**Weitere Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Torsten Schoch (Xella)  
Dipl.-Ing. Marco Hartner (TUK)  
Dipl.-Ing. Tobias Schilly (TUK)  
Daniel Weber (TUK)  
Jonas Wilhelm, B.Sc. (TUK)

# Inhalt

1	Hintergrund .....	4
1.1	Energiesparendes Bauen in der Bundesrepublik Deutschland .....	5
1.2	Vorgaben durch die Europäische Union.....	8
2	Methodik .....	11
2.1	Festlegung von Modellgebäuden .....	16
2.2	Auswahl zu untersuchender Energieeffizienzmaßnahmen.....	19
2.3	Berechnung des Primärenergiebedarfs.....	19
2.4	Ermittlung der Gesamtkosten .....	20
2.5	Festlegung der Randbedingungen.....	21
2.6	Durchführung einer Sensitivitätsanalyse.....	29
2.7	Bestimmung des kostenoptimalen Energieeffizienzniveaus mit Hilfe von Modellgebäuden.....	30
2.8	Festlegung des nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards .....	32
3	Ergebnisse .....	33
3.1	Betrachtete Varianten Wohngebäude (für Modellgebäude 1-3).....	33
3.2	Modellgebäude 1: Einfamilienhaus klein .....	35
3.2.1	Kostenoptimalitätsberechnung.....	35
3.2.2	Sensitivitätsanalyse .....	37
3.3	Modellgebäude 2: Doppelhaushälfte .....	40
3.3.1	Kostenoptimalitätsberechnung.....	40
3.3.2	Sensitivitätsanalyse .....	43
3.4	Modellgebäude 3: Mehrfamilienhaus groß.....	46
3.4.1	Kostenoptimalitätsberechnung.....	47
3.4.2	Sensitivitätsanalyse .....	49
3.5	Betrachtete Varianten Büro (Modellgebäude 4).....	51
3.6	Modellgebäude 4: Büro .....	53
3.6.1	Kostenoptimalitätsberechnung.....	53
3.6.2	Sensitivitätsanalyse .....	55
3.7	Betrachtete Varianten Hotel (Modellgebäude 5).....	58
3.8	Modellgebäude 5: Hotel klein .....	60
3.8.1	Kostenoptimalitätsberechnung.....	60
3.8.2	Sensitivitätsanalyse .....	62
3.9	Referenzgebäude Niedrigstenergiegebäudestandard .....	64
3.9.1	Wohngebäude .....	65
3.9.2	Nichtwohngebäude .....	65
3.10	Berechnungsmethode / Gebäudesimulation .....	66
3.11	Bonussystem / Anrechnung aktiver und passiver Energieeinsparmaßnahmen.....	67

3.12	Energieausweis.....	68
4	Zusammenfassung und Ausblick .....	69
5	Literatur .....	71
6	Anhang A - Investitionskosten.....	75
7	Anhang B – Untersuchte Varianten.....	85

## 1 Hintergrund

Der Gebäudesektor verursacht einen wesentlichen Anteil am bundesdeutschen Energieverbrauch. Der Energiebedarf von Gebäuden, der für das Kühlen und Heizen benötigt wird, beträgt ca. 30% des gesamten Energiebedarfs Deutschlands [1]. Es ist europaweit erklärtes Ziel von Politik und Gesellschaft hier zu einer namhaften Reduktion zu gelangen [2]. Die Verringerung des Energiebedarfs von Gebäuden stellt einen besonders sinnvollen Ansatz dar. Zum einen besteht hier ein sehr hohes Potential. Die benötigte Endenergie zur Beheizung und Warmwasserbereitung moderner Gebäude hat sich auf etwa 1/10 im Vergleich zu unsanierten Altbauten reduziert [3], wobei vor allem durch die Wärmedämmung von Gebäuden, also die energetische Optimierung der Gebäudehülle, ein namhafter Beitrag geleistet wurde [4]. Zum anderen bieten energieeffiziente Gebäude zusätzlich noch einen besonders hohen thermischen Komfort und niedrige Betriebskosten. Sie besitzen daher in der Gesellschaft eine sehr hohe Akzeptanz [5].

Deutschland hat im internationalen Vergleich bereits einen sehr hohen Standard hinsichtlich der Energieeffizienz von Gebäuden. Um die 2010 vom Europäischen Rat beschlossene Strategie „Europa 2020: eine neue europäische Strategie für Beschäftigung und Wachstum“ [6] - die Treibhausgasemissionen sollen gegenüber dem Niveau des Jahres 1990 um 20% verringert werden, der Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch soll auf 20% steigen, und es wird eine 20%ige Erhöhung der Energieeffizienz angestrebt - erfolgreich umzusetzen, müssen jedoch weitere Optimierungen vorgenommen werden.

Mit Vorlage des Berichts „Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft“ der Ethikkommission „Sichere Energieversorgung“ [7] am 30. Mai 2011 und anschließendem Beschluss des Bundestags zum Ausstieg aus der Kernenergie wurde die Energiewende beschlossen. Das Konzept der Energiewende ruht auf zwei Säulen: dem Ausbau der erneuerbaren Energien als Alternative zur Kernkraft und der Energieeffizienz.

Mit der Umsetzung der EU-Richtlinie 2010/31/EU [2] in innerstaatliches Recht sind mögliche Anpassungen der bestehenden Verordnungen zu untersuchen und für Deutschland sinnvolle und möglichst praktikable Lösungen zu erarbeiten. Dies beinhaltet insbesondere

- die Entwicklung einer Methode zur Berechnung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden,
- die Festlegung von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz,
- die Festlegung von Anforderungen an gebäudetechnische Systeme,
- die Definition von „nearly zero energy buildings“ bzw. im Deutschen Niedrigstenergiegebäuden, insbesondere Bestimmung eines Grenzwertes für den Primärenergieverbrauch, Festlegung von Primärenergiefaktoren und
- die Sicherstellung des Erreichens des „kostenoptimalen Niveaus“.

Niedrigstenergiegebäude besitzen eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz. Darüber hinaus sollte der fast bei null liegende oder sehr geringe Energiebedarf 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. Die Bewertung der Energieeffizienz eines Gebäudes könnte auch um die Berücksichtigung intelligenter Gebäudesteuerungssysteme, der Nachhaltigkeit des Gesamtkonzepts des Gebäudes und um die Betrachtung des Gebäudes als Energiespeicher erweitert werden, was zu völlig neuartigen Anforderungen führen könnte.

Die Berücksichtigung der Kostenoptimalität der Energieeffizienz, d.h. die Erzielung eines „kostenoptimalen Niveaus“, spielt hierbei eine zentrale Rolle. Es gilt also, für die Mindestanforderungen ein Mittelmaß zwischen Energieeffizienz, Stand der Technik, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit zu finden.

## 1.1 Energiesparendes Bauen in der Bundesrepublik Deutschland

### Richtlinien zum Energiesparenden Bauen

In der Bundesrepublik Deutschland ist der bauliche Wärmeschutz bereits seit mehr als 50 Jahren gesetzlich geregelt. Anfänglich stellte die Senkung des Energieverbrauches den auslösenden Faktor für die Wärmeschutzverordnungen dar. Die sich in den letzten Jahrzehnten verstärkende Umweltproblematik und die dadurch notwendige Reduktion von Kohlendioxidemissionen ergeben einen zusätzlichen Grund, den Energieverbrauch zu senken.

Bis zum Erlass der 1. Wärmeschutzverordnung galt der Mindestwärmeschutz der DIN 4108 [8], „Wärmeschutz im Hochbau“ (1952). 1976 erließ der Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates das erste Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden, welches die Grundlage für die von der Bundesregierung erlassenen Rechtsverordnungen über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnungen) und über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen [9] sowie Brauchwasseranlagen bildet. Die 1. Wärmeschutzverordnung, in welcher erstmals Anforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsflächen von Gebäuden festgelegt sind, wurde 1977 erlassen [10]. 1984 trat die 2. Wärmeschutzverordnung in Kraft. Über die Ermittlung eines die gesamte Gebäudehülle betrachtenden, mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten wurde ein erhöhter Wärmeschutz verlangt. In der 3. Wärmeschutzverordnung von 1995 [11] wurde gefordert, dass beim Errichten von neuen Gebäuden der Jahres-Heizwärmebedarf zu reduzieren ist. Mit der ersten Fassung der Energieeinsparverordnung (EnEV) im Jahr 2002 [12] wurden die Anforderungen an die Gebäudehülle [11] mit den Anforderungen an die Anlagentechnik [9] zusammengelegt. Zusätzlich wurden die Bilanzierungsgrenzen der Wärmeschutzverordnung erweitert und die Anforderungen auf den Primärenergiebedarf bezogen. In der Neufassung der Verordnung, EnEV 2007 [13], kam u.a. erstmals die Berücksichtigung alternativer Energieversorgungssysteme und des sommerlichen Wärmeschutzes hinzu, sowie die Ausstellung von Energieausweisen für bestehende Gebäude. Mit den Änderungen in der EnEV 2009 [14] konnten die Beschlüsse zum Integrierten Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung weitgehend umgesetzt werden, mit dem Ziel, Energie-, Heizungs- und Warmwasserbedarf im Gebäudebereich um zirka 30 % zu senken.

Die Bilanzierungsmethode der DIN V 18599 [15] wird seitdem auch auf Wohngebäude angewendet. Für die Gebäudehülle wurden neue Referenzwerte festgelegt. Überarbeitet wurden auch die Anforderungen der Nachrüstung im Baubestand.

Am 1.5.2014 trat die derzeit gültige EnEV 2014 [16] in Kraft (formell die zweite Verordnung zur Änderung der EnEV 2009), deren inhaltliche Grundlage die EU-Richtlinie 2010/31/EU [2] ist. In dieser Richtlinie enthalten sind ambitionierte Ziele, nämlich die Verbesserung der Energieeffizienz um 20 % und die Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen um ebenfalls 20 % (gegenüber dem Wert von 1990) bis zum Jahr 2020. Erklärtes Ziel ist die Schaffung von Mindeststandards für die Energieeffizienz von neu zu errichtenden und Bestands-Gebäuden. Sie zielt ab auf die Umsetzung eines Niedrigstenergiegebäudestandards im Neubaubereich bis zum Jahr 2021. Wesentliche Elemente sind die Anrechenbarkeit der erneuerbaren Energien in den nationalen Berechnungsmethoden sowie eine plakative Darstellung von Energieverbräuchen in Form von Energieausweisen.

Verglichen mit der EnEV 2009 wird in der EnEV 2014 im Neubau auf eine moderate Anforderungserhöhung gesetzt, welche zum 1. Januar 2016 in Kraft getreten ist (EnEV 2016). Der erlaubte Jahres-Primärenergiebedarf für Neubauten wird um 25 % und der Wert für die Mindestwärmedämmung der Gebäudehülle um durchschnittlich 20 % gesenkt. In Abbildung 1 ist die Entwicklung der Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf seit der 1. Wärmeschutzverordnung dargestellt. Die blaue Kurve zeigt herausragende Objekte, welche häufig als Forschungsvorhaben realisiert wurden und deutlich besser als die Anforderungen zur jeweiligen Zeit waren. Die grüne Kurve deutet an, auf welchem Niveau sich zur jeweiligen Zeit die in der Baupraxis realisierten Objekte in etwa befanden.

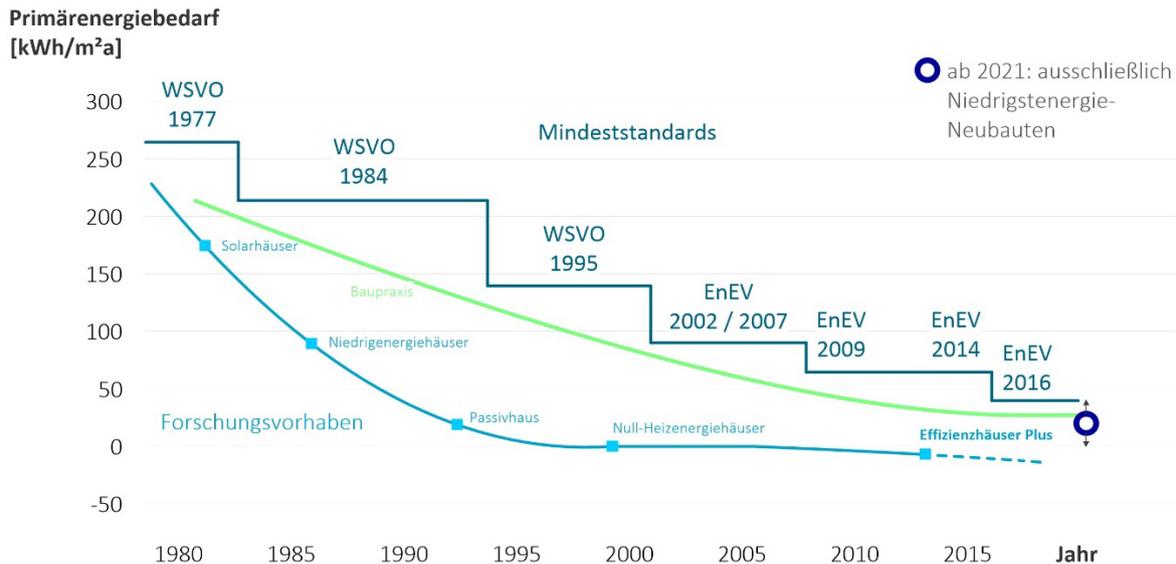


Abbildung 1 Entwicklung der Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf nach [17]

### Anforderungen der aktuell gültigen EnEV 2016 an Neubauten

Grundsätzlich ist die EnEV 2016 gültig für Gebäude, die „unter Einsatz von Energie beheizt oder gekühlt werden“ [18]. Ausnahmen bei der Gültigkeit der Verordnung existieren jedoch für „

1. Betriebsgebäude, die überwiegend zur Aufzucht oder zur Haltung von Tieren genutzt werden,
2. Betriebsgebäude, soweit sie nach ihrem Verwendungszweck großflächig und langanhaltend offengehalten werden müssen,
3. unterirdische Bauten,
4. Unterglasanlagen und Kulturräume für Aufzucht, Vermehrung und Verkauf von Pflanzen,
5. Traglufthallen und Zelte,
6. Gebäude, die dazu bestimmt sind, wiederholt aufgestellt und zerlegt zu werden, und provisorische Gebäude mit einer geplanten Nutzungsdauer von bis zu zwei Jahren,
7. Gebäude, die dem Gottesdienst oder anderen religiösen Zwecken gewidmet sind,
8. Wohngebäude, die
  - a) für eine Nutzungsdauer von weniger als vier Monaten jährlich bestimmt sind oder
  - b) für eine begrenzte jährliche Nutzungsdauer bestimmt sind, wenn der zu erwartende Energieverbrauch der Wohngebäude weniger als 25 Prozent des zu erwartenden Energieverbrauchs bei ganzjähriger Nutzung beträgt, und
9. sonstige handwerkliche, landwirtschaftliche, gewerbliche und industrielle Betriebsgebäude, die nach ihrer Zweckbestimmung auf eine Innentemperatur von weniger als 12 Grad Celsius oder jährlich weniger als vier Monate beheizt sowie jährlich weniger als zwei Monate gekühlt werden.“ [18]

Für neu zu errichtende Gebäude sind zwei Hauptanforderungen zu beachten. Zum einen ist der Jahres-Primärenergiebedarf zu begrenzen. Nachzuweisen ist, dass der Jahres-Primärenergiebedarf eines realen Gebäudes höchstens 75 % vom Jahres-Primärenergiebedarf des zugehörigen Referenzgebäudes beträgt. Dieses entspricht hinsichtlich Geometrie, Gebäudenutzfläche, Nettogrundfläche, Ausrichtung und Nutzung dem realen Vorbild und erfüllt die in Anlage 1 Tabelle 1 (Wohngebäude) und Anlage 2 Tabelle 1 (Nichtwohngebäude) angegebenen technischen Referenzausführungen [18].

Zum anderen ist der Transmissionswärmeverlust über die Gebäudehülle zu begrenzen. Für Wohngebäude sind die beiden Nachweise zu erbringen, dass der spezifische Transmissionswärmeverlust  $H_T$  eines realen Gebäudes den zugehörigen Höchstwert gemäß EnEV 2016 Anlage 1 Tabelle 2 sowie den spezifischen Transmissionswärmeverlust des zugehörigen Referenzgebäudes nicht übersteigt. Handelt es sich bei einem zu bewertenden Bauwerk hingegen um ein Nichtwohngebäude, ist abweichend nachzuweisen, dass die mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsflächen die Maximalwerte entsprechend EnEV 2016 Anlage 2 Tabelle 2 nicht überschreiten [18]. Weiterhin sind für neu zu errichtende Gebäude fünf Nebenanforderungen zu berücksichtigen.

Zur Vermeidung energieintensiver Kühlmaßnahmen und unbehaglicher Raumlufttemperaturen, sind die Vorgaben der DIN 4108-2 [19] an den sommerlichen Wärmeschutz zu erfüllen. Ein Nachweis ist mindestens für den Aufenthaltsraum eines Gebäudes mit den höchsten Anforderungen zu führen. Auf einen Nachweis darf verzichtet werden, sofern der Fensterflächenanteil eines zu untersuchenden Raumes unter den in der DIN 4108-2 Tabelle 6 angegebenen Grenzwerten liegt. Ebenfalls kann bei Wohngebäuden sowie bei Gebäudeteilen zur Wohnnutzung auf einen Nachweis verzichtet werden, wenn der kritischste Aufenthaltsraum einen grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von höchstens 35 % aufweist und wenn deren Fenster in Ost-, Süd- oder Westorientierung mit außenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen mit einem Abminderungsfaktor von maximal 0,30 – bei einer Fensterverglasung mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad von mehr als 0,40 – bzw. mit einem Abminderungsfaktor von höchstens 0,35 – bei einer Fensterverglasung mit einem g-Wert von höchstens 0,40 – ausgestattet sind. Es gibt zwei Möglichkeiten zum Nachweis der Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz – das Sonneneintragskennwerte-Verfahren und thermische Gebäudesimulationen. Bei dem Sonneneintragskennwerte-Verfahren handelt es sich um ein vereinfachtes Verfahren mit standardisierten Randbedingungen. Für einen zu untersuchenden Raum müssen der vorhandene Sonneneintragskennwert sowie der zulässige Sonneneintragskennwert bestimmt werden. Im Anschluss sind die ermittelten Werte gegenüberzustellen. Die Anforderung an den sommerlichen Wärmeschutz ist erfüllt, wenn der vorhandene Sonneneintragskennwert den zulässigen Sonneneintragskennwert nicht übersteigt. Soll für einen Raum der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes mit Hilfe einer thermischen Gebäudesimulation erbracht werden, ist die Einhaltung eines Übertemperaturgradstunden-Anforderungswertes erforderlich. Die Bezugswerte der operativen Raumtemperatur sind abhängig von der Sommerklimaregion und können der DIN 4108-2 Tabelle 9 entnommen werden. Abhängig von der Gebäudenutzung beträgt der Übertemperaturgradstunden-Anforderungswert für Wohnhäuser 1200 Kh/a und für Nichtwohngebäude 500 Kh/a. Die Randbedingungen für die Anfertigung einer thermischen Gebäudesimulation sind detailliert in der DIN 4108-2 Abschnitt 8.4 enthalten [18, 19].

Außerdem sind die wärmeübertragenden Umfassungsflächen einschließlich der Fugen dauerhaft luftundurchlässig abzudichten entsprechend den anerkannten Regeln der Technik. Ein konkreter Nachweis der Gebäudedichtheit nach Fertigstellung der Baumaßnahmen wird nicht verlangt. Dennoch ist eine Luftdichtheitsprüfung empfehlenswert. Ein erfolgreicher Nachweis ermöglicht nämlich, dass bei der Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarfs ein günstigerer Wert für den Raumluftwechsel angesetzt werden darf. Um eine verbesserte Luftdichtheit ansetzen zu können, muss im Rahmen einer Differenzdruck-Messung gemäß DIN EN 13829 [20] nachgewiesen werden, dass der ermittelte Volumenstrom, bei einer Druckdifferenz von 50 Pa zwischen dem Gebäudeinneren und der Außenwelt, die Werte entsprechend EnEV 2016 Anlage 4 nicht überschreitet. Des Weiteren ist die Forderung zu beachten, dass der zum Zwecke der Gesundheit und Beheizung erforderliche Mindestluftwechsel sicherzustellen ist [18].

Für Bauteile gegen Außenluft, gegen Erdreich sowie Konstruktionen, die Gebäudebereiche mit wesentlich unterschiedlichen Innentemperaturen voneinander trennen, sind Vorgaben an den Mindestwärmeschutz nach den anerkannten Regeln der Technik zu erfüllen. Zu den anerkannten Regeln der Technik zählt unter anderem die DIN 4108-2. Diese Norm enthält Mindestwerte für den Wärmedurchlasswiderstand von Bauteilen. Für zu untersuchende Konstruktionen ist der Nachweis zu erbringen, dass die Mindest-Wärmedurchlasswiderstände erreicht werden.

Um Wärmebrückenprobleme zu vermeiden, ist der Einfluss konstruktiver Wärmebrücken nach den anerkannten Regeln der Technik so gering wie möglich zu halten [21, 22]. Die dafür notwendigen Maßnahmen müssen wirtschaftlich vertretbar sein. Der verbleibende Einfluss von Wärmebrücken muss bei der energetischen Bewertung von Gebäuden berücksichtigt werden. Insgesamt existieren dafür zwei Varianten. Zum einen besteht die Möglichkeit entsprechend der DIN EN ISO 10211 [23] den genauen Einfluss von Wärmebrücken detailliert zu ermitteln. Soll dieses Verfahren nicht eingesetzt werden, kann der Wärmebrückeneinfluss alternativ mit Hilfe von pauschalen spezifischen Wärmebrückenzuschlägen erfasst werden. Entsprechen die Wärmebrückendetails den Planungsgrundsätzen gemäß der DIN 4108 Beiblatt 2 [24], darf der Wärmebrückeneinfluss durch Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten um  $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  berücksichtigt werden. Erfüllen die Bauteile nicht mindestens die Vorgaben entsprechend der DIN 4108 Beiblatt 2 [24] und weisen die Außenbauteile keine innenliegenden Dämmschichten auf, ist ein pauschaler spezifischer Wärmebrückenzuschlag von  $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  anzusetzen. Beim Einsatz von Innendämmsystemen beträgt der pauschale spezifische Wärmebrückenzuschlag  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Neben der EnEV enthält auch das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) [25] wesentliche Anforderungen an die energetische Qualität von Gebäuden. Das Gesetz verpflichtet zum Mindesteinsatz eines vorgeschriebenen Prozentanteils von erneuerbaren Energien bei der Deckung des Energiebedarfs von Neubauten und zu sanierenden öffentlichen Gebäuden. Abhängig von der erneuerbaren Energiequelle variiert der vorgeschriebene Anteil am Gesamtenergiebedarf. Ersatzweise zum Einsatz von erneuerbaren Energieträgern können die Anforderungen des EEWärmeG auch durch Energie aus Anlagen zur Nutzung von Abwärme und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) erfüllt werden. Auch Maßnahmen zur erhöhten Einsparung von Energie im Vergleich zum derzeit geltenden EnEV-2016-Standard sind zur Erfüllung des Gesetzes zulässig. Eine Kombination aus erneuerbaren Energien und Ersatzmaßnahmen ist ebenfalls möglich.

## **1.2 Vorgaben durch die Europäische Union**

In der Europäischen Union werden ca. 40 % der Gesamtenergie durch den Gebäudesektor verbraucht. Für die Zukunft wird erwartet, dass dieser Anteil weiter steigt [2]. Um die Treibhausgasemissionen zu senken und die Energieabhängigkeit Europas von Drittstaaten zu senken, sieht die Europäische Union die Verringerung des Energieverbrauchs und die vermehrte Nutzung erneuerbarer Energien durch Gebäude vor. Um diese Zielstellungen erreichen zu können, hat die Europäische Union eine Vielzahl an Richtlinien und Verordnungen erlassen.

### **Stand in Europa**

Durch die europäische Richtlinie sind die einzelnen EU-Mitgliedstaaten verpflichtet, ihre nationale Festlegung zur Bestimmung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden zu überarbeiten bzw. zu optimieren und die Berechnungsmodelle sowie die Anforderungen hinsichtlich Energieeffizienz und Nachhaltigkeit an den Stand der Technik anzupassen und zu verschärfen bzw. zu erhöhen [26]. Eine Überprüfung des nationalen Anforderungsniveaus der energetischen Qualität von Gebäuden nach Maßgabe der kostenoptimalen Methode durch die Regierung der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2013 hat ergeben, dass zum damaligen Zeitpunkt die Anforderungen für Neubau und Sanierung kostenoptimal waren [27]. Ein allgemeiner Rahmen für die Überarbeitung der wesentlichen Inhalte wird durch die EU-Richtlinie [2] vorgegeben.

Auf der Suche nach einer wirtschaftlichen und technisch ausgewogenen Lösung gehen die Mitgliedsländer der EU eher unterschiedliche als einheitliche Wege. Nach Angaben des Buildings Performance Institute Europe [28] stellen die meisten EU-Staaten künftig vor allem Anforderungen an den maximalen Primärenergiebedarf des Gebäudes. In einigen Ländern wie z.B. Niederlande und Belgien wird der Primärenergiebedarf über einen dimensionslosen Koeffizienten beschrieben. In Ländern wie Großbri-

tannien, Norwegen und Spanien wird anstatt des Primärenergiebedarfes ein CO<sub>2</sub>-Indikator als Hauptindikator gewählt. In Österreich und Rumänien wirkt die CO<sub>2</sub>-Emission als Anforderung in Ergänzung zum Primärenergiebedarf des Gebäudes.

In einigen Ländern (Zypern, Litauen, Slowenien) wirkt neben dem Primärenergiebedarf auch der Endenergiebedarf als anforderungsgebend. Andere Länder (wie z.B. Deutschland) beschränken sich auf das Benennen dieser Größe in z.B. Energieausweisen, ohne diese Größe jedoch in den Zusammenhang zu einer Nebenanforderung zu stellen.

Sehr unterschiedlich gehandhabt werden die Anforderungen zur Nutzung erneuerbarer Energien. Zwar werden in 11 Staaten auch Anforderungen an den Anteil erneuerbarer Energien an der Deckung des Primärenergiebedarfs gestellt, doch nur in 8 Staaten wird diese Deckungsrate qualitativ beschrieben. Im Rest der EU werden bislang – womöglich aus Kostengründen – weder allgemeine noch qualitative Anforderungen an die Nutzung erneuerbarer Energien gestellt. Hier werden offensichtlich Lösungen bevorzugt, die sich nur auf die Anlagentechnik und Gebäudehülle beschränken.

Fast alle Staaten der EU stellen Minimalanforderungen an die Begrenzung des Transmissionswärmeverlustes der Gebäudehülle. Ein einheitlicher Wert zeichnet sich hierbei jedoch nicht ab. Zu erwarten sind Werte, die im Zusammenhang mit zum Teil historisch gewachsenen Konstruktionstypen in den Ländern stehen. So sind die skandinavischen Länder mit einem starken Einfluss der Leichtbauweise (viel Dämmung, wenig thermische Masse) zu U-Werten von 0,15 W/(m<sup>2</sup>K) bereit, währenddessen der west- und mitteleuropäische Wirtschaftsbereich mit der Tradition einer überwiegend massiven Bauweise stärker differenzieren wird. Hier werden U-Werte für die Außenwand von 0,18 – 0,22 W/(m<sup>2</sup>K) und für das Dach von 0,10 bis 0,15 W/(m<sup>2</sup>K) erwartet.

### **Richtlinie 2010/31/EU**

Die Richtlinie 2010/31/EU wurde vom Europäischen Parlament und vom Europäischen Rat am 19. Mai 2010 erlassen mit dem Ziel, die „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in der [Europäischen Union] unter Berücksichtigung der jeweiligen äußeren klimatischen und lokalen Bedingungen sowie der Anforderungen an das Innenraumklima und der Kosteneffizienz“ [2] zu verbessern.

Die EU-Richtlinie fordert unter anderem die Mitgliedstaaten der Europäischen Union dazu auf, einen nationalen Niedrigstenergiegebäudestandard zu definieren und ab 01.01.2019 für öffentliche Neubauten bzw. ab 01.01.2021 für alle sonstigen Neubauten umzusetzen. Im Verordnungstext wird ein Niedrigstenergiegebäude 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“ [2]. „Ein Mitgliedstaat ist [jedoch] nicht verpflichtet, Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz festzulegen, die über die geschätzte wirtschaftliche Lebensdauer nicht kosteneffizient sind“. Außerdem „[können Mitgliedstaaten beschließen], in besonderen und begründeten Fällen, in denen die Kosten-Nutzen-Analyse über die wirtschaftliche Lebensdauer des betreffenden Gebäudes negativ ausfällt, [Niedrigstenergiegebäude-Anforderungen] nicht anzuwenden“ [2]. Somit bleibt festzuhalten, dass die aktuell gültigen nationalen Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden nicht zwingend verschärft werden müssen, sofern dies aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist.

„Die Festlegung [nationaler Niedrigstenergiegebäudestandards] obliegt den Mitgliedstaaten“ [29] der Europäischen Union auf Basis von Kostenoptimalitätsberechnungen. Den Rahmen für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden bildet die Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012 [29].

### **Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012**

Die Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012 ist eng verknüpft mit der Europäischen Gebäuderichtlinie und „[schafft den Rahmen] für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Gebäudekomponenten“ [29].

Der Verordnungstext fordert von den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union die Berechnung kostenoptimaler Energieeffizienzniveaus aus mikroökonomischer und makroökonomischer Perspektive. Bei der mikroökonomischen Perspektive handelt es sich um eine rein finanzielle – und somit privatwirtschaftliche – Perspektive, wobei Steuern anzurechnen sind. Im Rahmen der makroökonomischen Perspektive werden hingegen die gesamtgesellschaftlichen Kosten und Nutzen von Investitionen in die Energieeffizienz von Gebäuden berücksichtigt. Demnach bezieht diese volkswirtschaftliche Perspektive auch Treibhausgasemissionskosten mit ein. Steuern sind hingegen nicht anzusetzen. Den Europäischen Ländern steht es frei, ob der nationale Niedrigstenergiegebäudestandard aus den mikroökonomischen oder makroökonomischen Kostenoptimalitätsberechnungen abgeleitet wird.

### **Leitlinien zur delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012**

Die Leitlinien zur Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 [30] ergänzen die Europäische Gebäuderichtlinie und flankieren den Rahmen für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden gemäß der Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012. Sie enthalten Zusatzinformationen, welche die Umsetzung der Delegierten Verordnung erleichtern sollen. Im Gegensatz zur Delegierten Verordnung sind die Leitlinien jedoch nicht rechtsverbindlich für die Mitgliedstaaten der Europäischen Union [30].

## 2 Methodik

In diesem Kapitel wird die Herangehensweise an die Definition des Niedrigstenergiegebäudestandards erläutert. Die Methodik wurde teilweise bereits in [31, 32] veröffentlicht. Es wurde sich an der in der Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 [29] vorgeschriebenen Vorgehensweise orientiert.

Die Delegierte Verordnung sieht vor, dass der nationale Niedrigstenergiegebäudestandard mit Hilfe der nachfolgend aufgelisteten Schritte festzulegen ist:

- Festlegung von Referenzgebäuden
- Auswahl der zu untersuchenden Energieeffizienzmaßnahmen
- Berechnung des Primärenergiebedarfs für die zu untersuchenden Energieeffizienzmaßnahmen
- Ermittlung der Gesamtkosten für die zu untersuchenden Energieeffizienzmaßnahmen
- Durchführung einer Sensitivitätsanalyse
- Bestimmung des kostenoptimalen Energieeffizienzniveaus für jedes Referenzgebäude
- Festlegung des nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards [29]

Es sind also zunächst geeignete Referenzgebäude festzulegen. Ein „Referenzgebäude bezeichnet ein hypothetisches oder reales Bezugsgebäude, das die Gebäudegeometrie und -systeme, die Energieeffizienz von Gebäudehülle und -systemen sowie die Funktionalität und Kostenstruktur im jeweiligen Mitgliedstaat in typischer Weise verkörpert und für die klimatischen Bedingungen und die geografische Lage repräsentativ ist“ [29]. Nach Möglichkeit sollen die ausgewählten Referenzgebäude den tatsächlichen Gebäudebestand in einem Europäischen Staat widerspiegeln, so dass repräsentative Erkenntnisse erzielt werden können. Der Verordnungstext sieht vor, dass die Europäischen Länder für die Gebäudekategorien

- Einfamilienhäuser,
- Mehrfamilienhäuser,
- Bürogebäude,
- Unterrichtsgebäude,
- Krankenhäuser,
- Hotels und Gaststätten,
- Sportanlagen,
- Gebäude des Groß- und Einzelhandels sowie
- sonstige Arten Energie verbrauchender Gebäude

jeweils ein geeignetes Referenzgebäude für Neubauten festlegen. Es besteht die Möglichkeit die Anzahl der verwendeten Referenzgebäude zu verringern, indem Referenzgebäude ausgewählt werden, die für mehrere Gebäudekategorien repräsentativ sind [2, 29, 30].

Als nächstes sind die Energieeffizienzmaßnahmen festzulegen, welche detailliert am Beispiel der Referenzgebäude untersucht werden. Die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden wird maßgeblich beeinflusst von der Wärmedämmqualität und der Luftdichtheit der Gebäudehülle sowie von der technischen Gebäudeausrüstung. Demnach ist es sinnvoll, das Wärmedämmniveau der Gebäudehülle sowie die Komponenten zur Konditionierung der Referenzgebäude zu variieren und zu Varianten zusammen zu fassen. Die Auswahl der zu bewertenden Energieeffizienzmaßnahmen hat technologisch neutral zu erfolgen, so dass keine technische Lösung gegenüber anderen Technologien bevorzugt wird. Es sind nur Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen zu untersuchen, mit deren Hilfe die derzeitigen nationalen Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden erfüllt werden können [29].

Im dritten Schritt ist der aus den gewählten Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen resultierende Primärenergiebedarf für die Referenzgebäude zu berechnen. Zu diesem Zweck

können nationale Berechnungsmethoden basierend auf Primärenergie-Umrechnungsfaktoren angewendet werden, „sofern diese mit Artikel 2 Absatz 4 und Anhang I der Richtlinie 2010/31/EU im Einklang [stehen]“ [29].

Im Anschluss sind die sich aus den festgelegten Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen ergebenden Gesamtkosten während des Berechnungszeitraums für die Referenzgebäude zu ermitteln. Für Wohngebäude sind dabei 30 Jahre anzusetzen, für Nichtwohngebäude 20 Jahre. Im Rahmen der mikroökonomischen Untersuchung sind die Kostenkategorien

- Anfangsinvestitionskosten,
- laufende Kosten,
- Energiekosten und
- ggf. Entsorgungskosten

zu berücksichtigen. Vernachlässigt werden können Kosten, welche für alle zu berechnenden Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen identisch sind sowie „Kosten für Gebäudekomponenten, die keinen Einfluss auf die Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes haben“ [29]. Der Restwert von Gebäudekomponenten am Ende des Berechnungszeitraums ist durch lineare Abschreibung der Anfangsinvestitions- oder Wiederbeschaffungskosten zu ermitteln. Dieser Restwert ist abzuzinsen auf den Beginn des Untersuchungszeitraums. Die Berechnung der Gesamtkosten aus finanzieller Perspektive erfolgt gemäß den nachstehenden Formeln [29]:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (1)$$

Legende:

$\tau$ : Berechnungszeitraum

$C_g(\tau)$ : Gesamtkosten (bezogen auf das Anfangsjahr  $\tau_0$ ) über den Berechnungszeitraum

$C_I$ : Anfangsinvestitionskosten für die Maßnahme  $j$

$C_{a,i}(j)$ : jährliche Kosten im Jahr  $i$  für die Maßnahme  $j$

$V_{f,\tau}(j)$ : Restwert der Maßnahme  $j$  am Ende des Berechnungszeitraums (abgezinst auf das Anfangsjahr  $\tau_0$ )

$R_d(i)$ : Abzinsungsfaktor für das Jahr  $i$  auf der Grundlage des Abzinsungssatzes  $r$  nach folgender Berechnung:

$$R_d(p) = \left( \frac{1}{1+r/100} \right)^p \quad (2)$$

mit

$p$ : Anzahl der Jahre ab dem Anfangszeitraum

$r$ : realer Abzinsungssatz

Auf makroökonomischer Ebene sind zusätzlich auch die Kosten von Treibhausgasemissionen zu erfassen. Dabei handelt es sich um die Ausgaben, welche aus den durch Gebäude-CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachten Umweltschäden resultieren. Die Gesamtkosten aus volkswirtschaftlicher Perspektive werden wie folgt berechnet [29]:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (3)$$

Legende:

$\tau$ : Berechnungszeitraum

$C_g(\tau)$ : Gesamtkosten (bezogen auf das Anfangsjahr  $\tau_0$ ) über den Berechnungszeitraum

$C_I$ : Anfangsinvestitionskosten für die Maßnahme j

$C_{a,i}(j)$ : jährliche Kosten im Jahr i für die Maßnahme j

$V_{f,\tau}(j)$ : Restwert der Maßnahme j am Ende des Berechnungszeitraums (abgezinst auf das Anfangsjahr  $\tau_0$ )

$C_{c,i}(j)$ : Kosten für die Maßnahme j im Jahr i

$R_d(i)$ : Abzinsungsfaktor für das Jahr i auf der Grundlage des Abzinsungssatzes r nach folgender Berechnung:

$$R_d(p) = \left( \frac{1}{1+r/100} \right)^p \quad (4)$$

mit

p: Anzahl der Jahre ab dem Anfangszeitraum

r: realer Abzinsungssatz

Darauffolgend ist eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Mit deren Hilfe sollen zum einen die wichtigsten kostenbezogenen Eingangsdaten bestimmt werden. Zum anderen soll überprüft werden, ob die Erkenntnisse aus den Kostenoptimalitätsberechnungen gleichbleiben, wenn sich Einflussfaktoren auf die Gesamtkosten in der Realität wesentlich ändern würden. Eine Sensitivitätsanalyse ist mindestens zu den Abzinsungssätzen und zur Energiepreisentwicklung von Energieträgern vorzunehmen [29].

Danach ist für jedes Referenzgebäude das kostenoptimale Energieeffizienzniveau zu bestimmen. Die Mitgliedstaaten der Europäischen Union werten dazu für jedes Referenzgebäude die Ergebnisse der Gesamtkostenberechnungen für die untersuchten Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen aus. Am kostenoptimalsten ist die Variante mit den niedrigsten Gesamtkosten während des Berechnungszeitraums. Sofern sich für mehrere Varianten gleiche Gesamtkosten ergeben, bildet die Variante mit dem geringeren Primärenergiebedarf das kostenoptimale Energieeffizienzniveau für das Referenzgebäude [29].

Abschließend ist auf Grundlage des für jedes Referenzgebäude ermittelten kostenoptimalen Energieeffizienzniveaus der nationale Niedrigstenergiegebäudestandard festzulegen. „Die nationalen Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz sollten nicht mehr als 15 % unter den kostenoptimalen Ergebnissen ... liegen“ [29].

Zur Flankierung des Rahmens für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden stellt die Europäische Kommission Leitlinien [30] bereit. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Zum einen enthalten die Leitlinien Zusatzinformationen hinsichtlich der Berechnung des Primärenergiebedarfs für zu untersuchende Energieeffizienzmaßnahmen. Zu berücksichtigen ist der nicht erneuerbare Teil der Primärenergie resultierend aus Heizung, Kühlung, Lüftung, Warmwasserversorgung und Beleuchtung eines Gebäudes [30].

Zum anderen konkretisieren die Leitlinien die Informationen bezüglich der Gesamtkostenermittlung für zu betrachtenden Energieeffizienzvarianten. Gebäude sind in einzelne Gebäudekomponenten zu unterteilen, wobei die Kosten für Gebäudekomponenten, die keinen Einfluss auf die Gesamtenergieeffizienz haben, vernachlässigt werden können. Außerdem können Kosten ausgenommen werden, die bei allen zu untersuchenden Varianten für ein Gebäude identisch sind. Bei der Berechnung der Anfangsinvestitionskosten sind die Ausgaben für Dämmung der Gebäudehülle, Fenster und Türen, Raumheizung, Warmwasser, Lüftungssysteme, Kühlung, Beleuchtung, Gebäudeautomatisierung- und -Steuerung, Energieversorgungsanschlüsse sowie für dezentrale Energieversorgungssysteme, die auf Energie aus erneuerbaren Quellen beruhen, zu berücksichtigen. Für die im Voraus aufgezählten Gebäudekomponenten sind neben möglichen Austauschkosten auch die Restwerte am Ende des Berechnungszeitraums einzubeziehen. Entsorgungskosten müssen hingegen nicht beachtet werden. Jegliche Kosten, die während des Berechnungszeitraums berücksichtigt werden, sind mit Hilfe von Abzinsungsfaktoren abzuzinsen auf den Beginn des Untersuchungszeitraums. Mit dem Restwert einer Gebäudekomponente mit einer längeren oder kürzeren Lebensdauer als der Berechnungszeitraum ist entsprechend Abbildung 2 und Abbildung 3 zu verfahren. Der Restwert am Ende des Berechnungszeitraums ist durch lineare Abschreibung der Anfangsinvestitions- oder Wiederbeschaffungskosten zu ermitteln. Dieser Restwert ist mit Hilfe eines Abzinsungsfaktors abzuzinsen auf den Beginn des Untersuchungszeitraums [30].

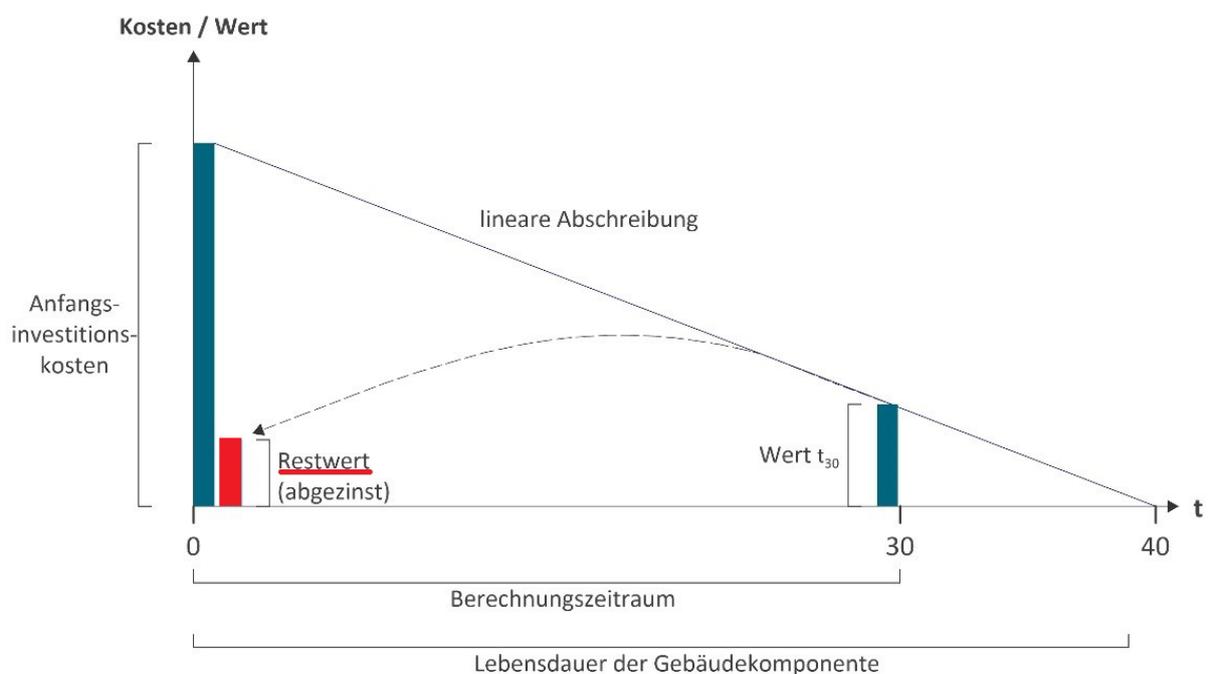


Abbildung 2 Berechnung des Restwerts (roter Balken) einer Gebäudekomponente mit einer längeren Lebensdauer als der Berechnungszeitraum nach [30]

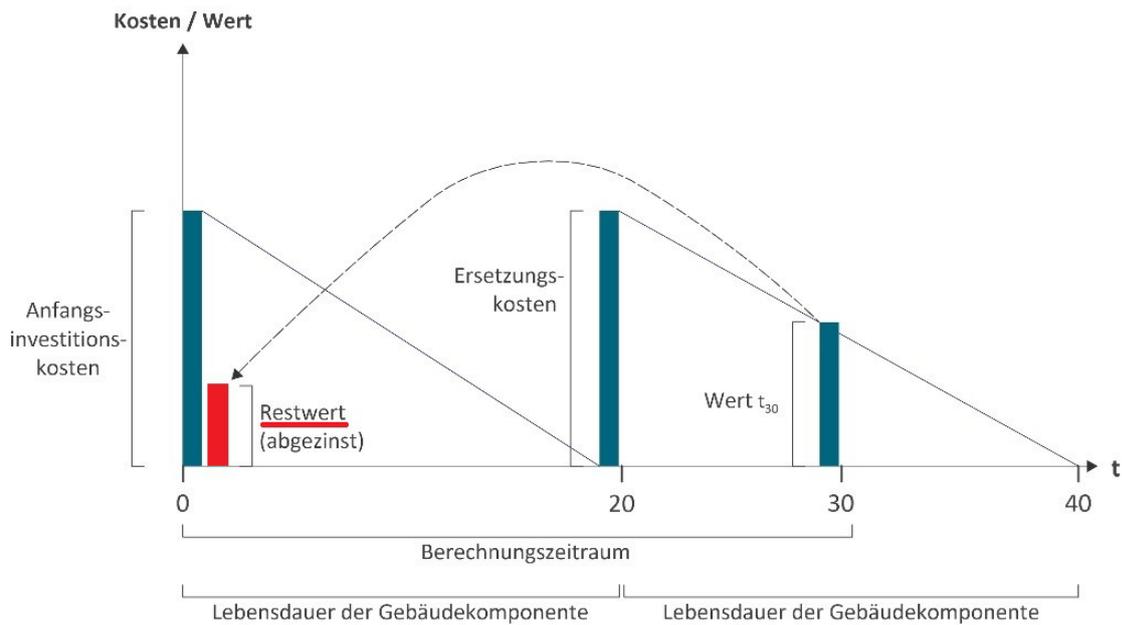


Abbildung 3 Berechnung des Restwerts (roter Balken) einer Gebäudekomponente mit einer kürzeren Lebensdauer als der Berechnungszeitraum, welche im Berechnungszeitraum ausgetauscht wird und am Ende des Berechnungszeitraums einen Restwert besitzt, nach [30]

Für mindestens elf Energieeffizienzmaßnahmenkombinationen sind der Jahres-Primärenergiebedarf und die Gesamtkosten während des Berechnungszeitraums zu bestimmen.

Zur Ermittlung des kostenoptimalen Spektrums sind für die einzelnen Referenzgebäude die berechneten Ergebnisse jeweils in ein Diagramm einzutragen, wobei die x-Achse den Primärenergiebedarf und die y-Achse die Gesamtkosten widerspiegelt. In Abbildung 4 ist ein solches Diagramm exemplarisch dargestellt [30].

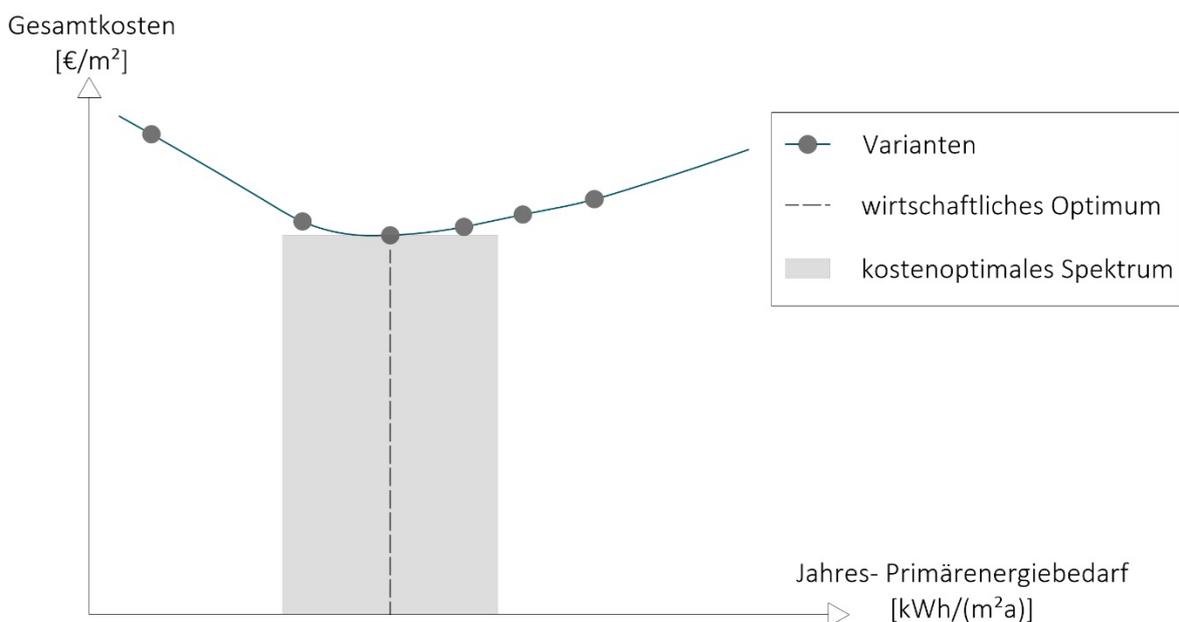


Abbildung 4 Diagramm zur Ermittlung des kostenoptimalen Spektrums nach [30]

Die Variante mit den niedrigsten Gesamtkosten „gibt automatisch das kostenoptimale Niveau der Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz an“ [30]. Das kostenoptimale Spektrum setzt sich zusammen aus dem mittleren Jahres-Primärenergiebedarf der Maßnahmenkombinationen, welche die gleichen oder sehr ähnlichen Kosten aufweisen wie die Variante mit den niedrigsten Gesamtkosten. Auf Grundlage der Diagramme für die einzelnen Referenzgebäude ist ein nationaler Niedrigstenergiegebäudestandard festzulegen.

## 2.1 Festlegung von Modellgebäuden

Gemäß der Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 [29] soll die Festlegung eines nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards mit Hilfe von Referenzgebäuden erfolgen. Nach Möglichkeit sollen die ausgewählten Referenzgebäude den tatsächlichen Gebäudebestand in einem Europäischen Staat widerspiegeln, so dass repräsentative Erkenntnisse erzielt werden können [30]. In Deutschland wird der Begriff Referenzgebäude bereits mit einer abweichenden Bedeutung verwendet. Entsprechend der EnEV 2016 handelt es sich bei einem Referenzgebäude für Wohngebäude um ein Gebäude mit „gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung mit der in Anlage 1 Tabelle 1 [der Verordnung] angegebenen technischen Referenzausführung“ [16] im Vergleich zu einem energetisch nachzuweisenden realen Gebäude. (Für Nichtwohngebäude gilt entsprechend Anlage 2 Tabelle 1.) Deshalb wird es als sinnvoll erachtet, Referenzgebäude im Zusammenhang mit der Europäischen Gebäuderichtlinie in Deutschland ersatzweise als Modellgebäude zu bezeichnen.

Im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ wurde das Projekt „Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit“ [33] bearbeitet. Durch dieses Forschungsprojekt ist eine Sammlung von 15 Wohn-Modellgebäuden und 22 Nichtwohn-Modellgebäuden entstanden, die hinsichtlich des zukünftig zu erwartenden Neubaubestandes in Deutschland ausreichend repräsentativ sind [33, 34]. Am Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung werden die Modellgebäude aus [33] entsprechend Abbildung 5 bis Abbildung 9 zur Bestimmung des nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards herangezogen.

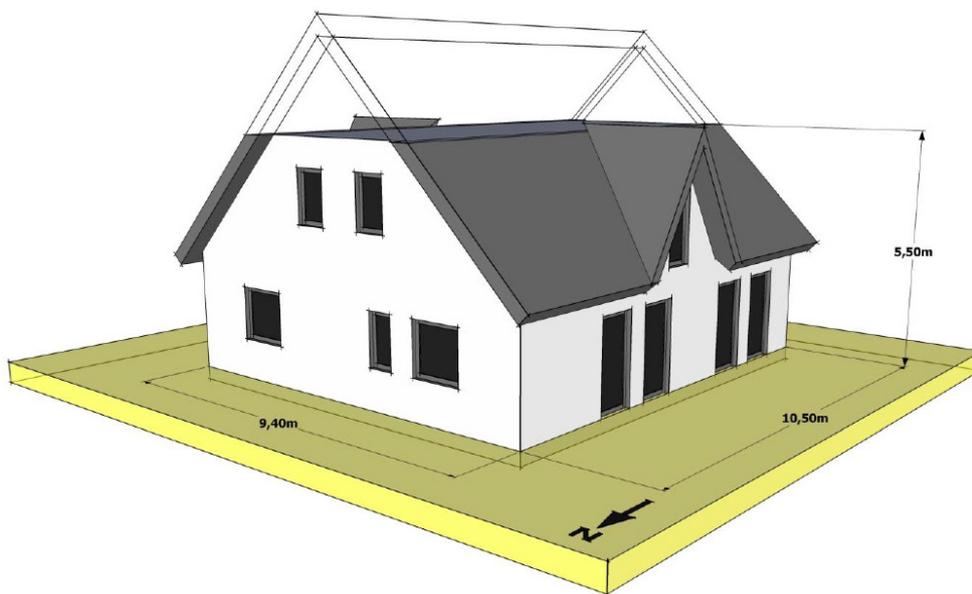


Abbildung 5 Modellgebäude „Einfamilienhaus klein“ [33]

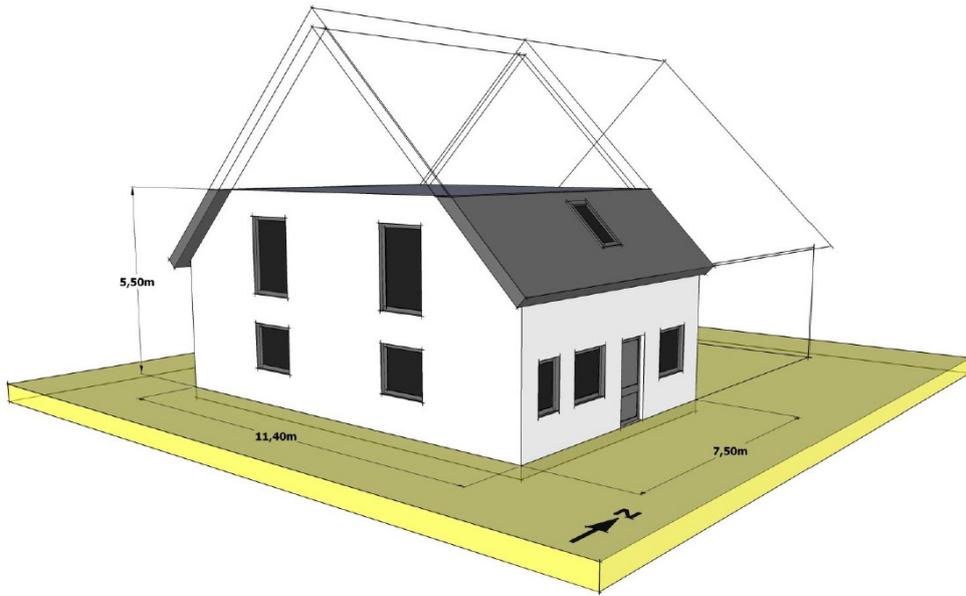


Abbildung 6 Modellgebäude „Doppelhaushälfte Süd“ [33]

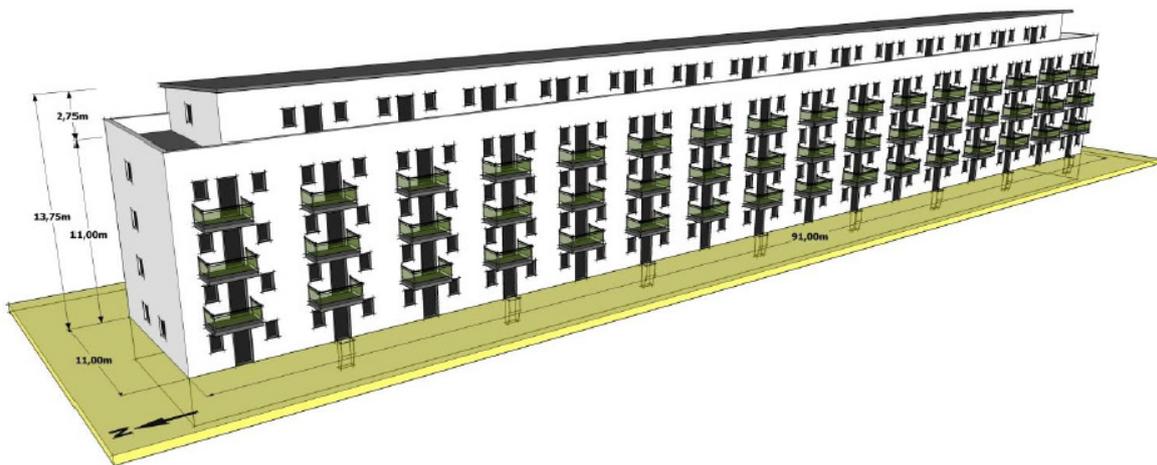


Abbildung 7 Modellgebäude „Mehrfamilienhaus groß mit 40 Wohneinheiten“ [33]

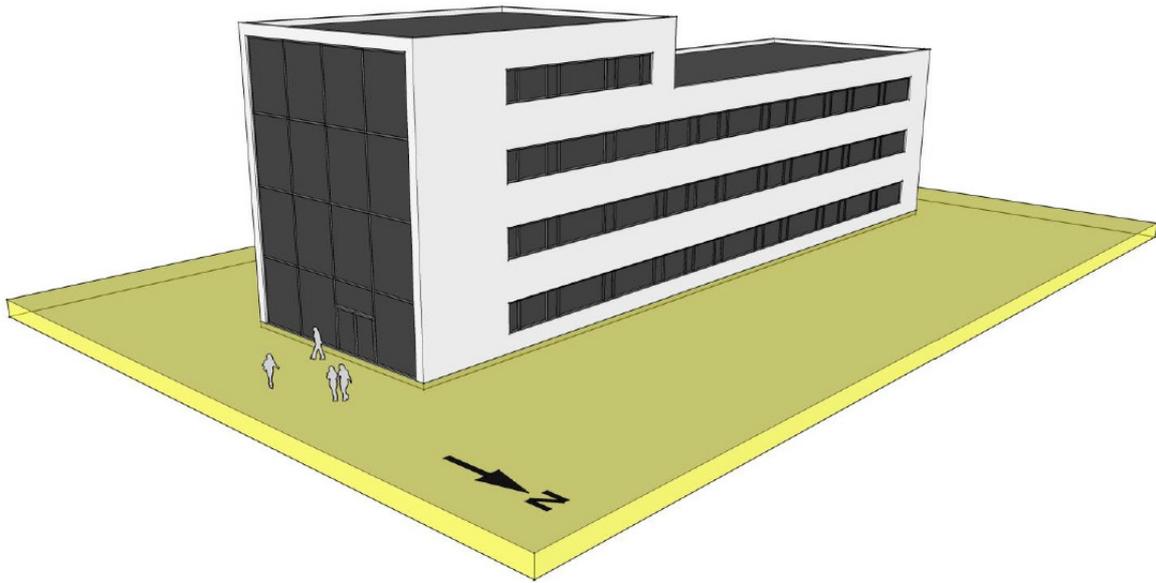


Abbildung 8 Modellgebäude „Büros – klein“ [33]

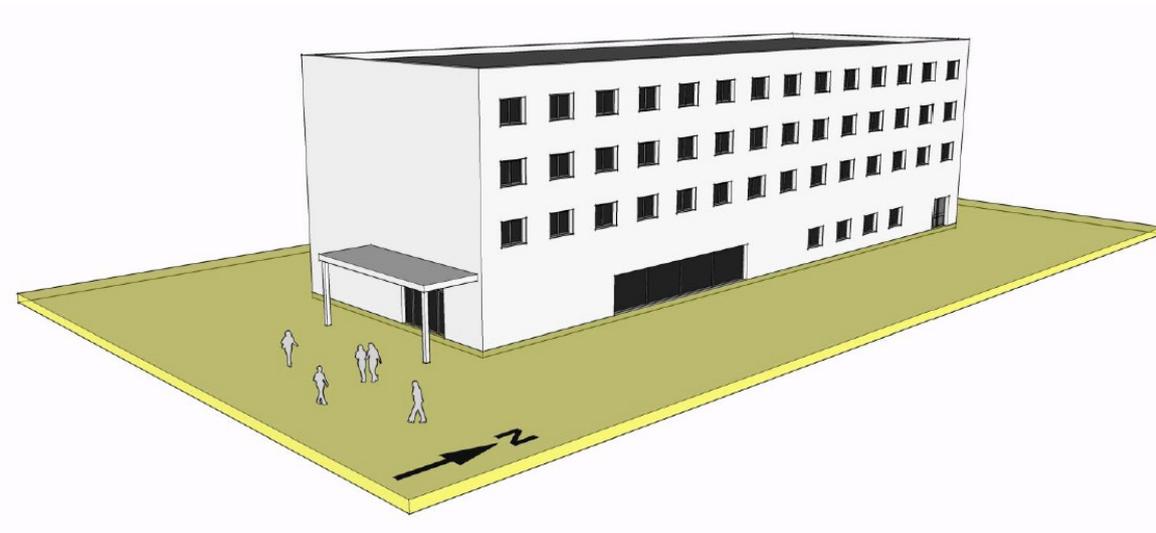


Abbildung 9 Modellgebäude „Hotels – klein“ [33]

Im Vergleich zum Bericht über die Berechnung des „Kostenoptimalen Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz“ [27], den Deutschland im Jahr 2013 an die Europäische Union übermittelt hat, ersetzt das „Mehrfamilienhaus groß mit 40 Wohneinheiten“ das „Mehrfamilienhaus klein mit sechs Wohneinheiten“ als Modellgebäude. Das große Mehrfamilienhaus weist nämlich im Vergleich zum kleinen Mehrfamilienhaus keine kleinen Wohneinheiten mit wenig Hüllfläche auf, wodurch es nicht besonders technikabhängig – und somit repräsentativer – ist.

Die Vorgaben der Europäischen Gebäuderichtlinie [2] und der zugehörigen Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 [30] sehen vor, für die Gebäudekategorien Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Bürogebäude, Unterrichtsgebäude, Krankenhäuser, Hotels und Gaststätten, Sportanlagen, Gebäude des Groß- und Einzelhandels sowie sonstige Arten Energie verbrauchender Gebäude jeweils ein geeignetes Modellgebäude für Neubauten festzulegen. In den Leitlinien zur Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 wird jedoch zusätzlich beschrieben, dass die Möglichkeit besteht, die Anzahl der verwendeten Modellgebäude zu verringern, indem Gebäude ausgewählt werden, die für mehrere Gebäudekategorien repräsentativ sind. Im Einklang mit [27] wird davon ausgegangen, dass die vorgeschlagenen Modellgebäude für alle geforderten Gebäudekategorien ausreichend repräsentativ sind.

## 2.2 Auswahl zu untersuchender Energieeffizienzmaßnahmen

Die EnEV 2016 enthält die aktuell in Deutschland gültigen Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden. Für neu zu errichtende Gebäude sind zwei Hauptanforderungen zu beachten. Zum einen ist der Transmissionswärmeverlust über die Gebäudehülle zu beschränken. Zum anderen ist der Jahres-Primärenergiebedarf zu begrenzen. Nachzuweisen ist, dass der Jahres-Primärenergiebedarf eines realen Gebäudes höchstens 75 % vom Jahres-Primärenergiebedarf des zugehörigen Referenzgebäudes beträgt. Dieses entspricht hinsichtlich Geometrie, Gebäudenutzfläche bzw. Nettogrundfläche, Ausrichtung und Nutzung dem realen Vorbild und erfüllt die in Anlage 1 Tabelle 1 (Wohngebäude) bzw. Anlage 2 Tabelle 1 (Nichtwohngebäude) angegebenen technischen Referenzausführungen [16]. Mit in Kraft treten der aktuell in Deutschland gültigen Anforderungen zum 01.01.2016 wurde es versäumt, neue Referenzgebäude zu veröffentlichen, welche die Anforderung an den Jahres-Primärenergiebedarf zu 100 % erfüllen.

Auf Grund dieser nicht vorhandenen 2016er Referenzgebäude wird als Ausgangspunkt für Variantenuntersuchungen das Wohn-Referenzgebäude und das Nichtwohn-Referenzgebäude entsprechend der EnEV 2014 herangezogen. Des Weiteren wird auf Basis dieser Referenzgebäude die Dämmqualität der Gebäudehülle, Wärmeerzeuger und Lüftungsanlagen variiert, wobei nur Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen zu betrachten sind, mit deren Hilfe die Anforderungen der derzeit gültigen EnEV 2016 und des EEWärmeG erfüllt werden können [29].

Zum einen werden einzelne energetisch relevante Gebäudekomponenten variiert und zum anderen Energieeffizienzmaßnahmen zu sinnvollen und praxisüblichen Maßnahmenkombinationen zusammengefasst.

Zum aktuellen Zeitpunkt erfolgt in Deutschland bei Neubauten die Deckung des Energiebedarfs für Heizung und Warmwasser in der Regel mit Hilfe von Brennwertkesseln, Biomassekesseln, Solaranlagen, Wärmepumpen, Nah-/Fernwärme und/oder Blockheizkraftwerken. Die Auswahl der zu bewertenden Energieeffizienzmaßnahmen hat technologisch neutral zu erfolgen, so dass keine technische Lösung gegenüber anderen Technologien bevorzugt wird. Nah- und Fernwärmenetze sind jedoch nicht Deutschlandweit vorhanden. Demnach ist der Einsatz von Nah- und Fernwärme im Gegensatz zu den vorgenannten Wärmeerzeugern nicht als Energieeffizienzmaßnahme zu untersuchen. Die Art der Heizwärmeübergabe sollte entsprechend praxisüblichen Lösungen abhängig von den Wärmeerzeugern gewählt werden. Als Lüftungsanlagen kommen derzeit in Neubauvorhaben häufig (Zu- und) Abluftanlagen zum Einsatz. Auf Grund dieser unterschiedlichen Systeme sollte auch die Art der Lüftungsanlage sowie ggf. der Wärmerückgewinnungsgrad und die spezifische Ventilator Leistung variiert werden.

Bei der Berechnung von Wohn-Referenzgebäuden nach DIN V 18599 ist entsprechend 12. Auslegungstaffel zur EnEV [35] ein nutzungsbedingter Mindestaußenluftwechsel von  $0,55 \text{ h}^{-1}$  anzusetzen. Für nachzuweisende reale Wohngebäude ist hingegen gemäß DIN V 18599-10 [15] ein Luftwechsel von  $0,45 \text{ h}^{-1}$  zu berücksichtigen. Im Rahmen der Kostenoptimalitätsberechnungen wird für die Wohn-Modellgebäude ein Mindestaußenluftwechsel von  $0,55 \text{ h}^{-1}$  angesetzt. Aussagen zur Erfüllung der Anforderungen der EnEV 2016 von Varianten basieren hingegen auf den öffentlich-rechtlichen Randbedingungen mit einem Luftwechsel von  $0,45 \text{ h}^{-1}$ .

## 2.3 Berechnung des Primärenergiebedarfs

Gemäß der aktuell gültigen EnEV 2016 ist der Jahres-Primärenergiebedarf eines Wohngebäudes mit Hilfe der Normenreihe DIN V 18599 [15] oder mittels der DIN V 4108-6 [37] in Kombination mit der DIN V 4701-10 [38] zu berechnen. Für Nichtwohngebäude steht nur die Normenreihe DIN V 18599 zur Auswahl. Um ein einheitliches Berechnungsverfahren sowohl für Wohn- als auch für Nichtwohngebäude nutzen zu können, ist die Anwendung der Normenreihe DIN V 18599 zur Bestimmung des Primärenergiebedarfs der Modellgebäude sinnvoll.

Die Europäische Gebäuderichtlinie [2] und die zugehörige Delegierte Verordnung (EU) Nr.244/2012 [29] sowie die Leitlinien zur Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 [30] fordern bei der Ermittlung des jährlichen Gesamtenergiebedarfs an Primärenergie die Heizung, die Kühlung, die Lüftung, die Warmwasserbereitung und die Beleuchtung einzubeziehen. Die EnEV 2016 [16] mit den zugehörigen Berechnungsverfahren sieht für Wohngebäude jedoch abweichend zu den Europäischen Vorgaben nicht die Bilanzierung der Beleuchtung vor. Es wird daher als sinnvoll angesehen, bei der zukünftigen Weiterentwicklung der EnEV 2016 und den zugehörigen Berechnungsverfahren auch den Jahres-Primärenergiebedarf resultierend aus der Beleuchtung mit zu berücksichtigen. In diesem Forschungsprojekt wurde EnEV-konform gerechnet, und daher für Wohngebäude der Energiebedarf für Beleuchtung nicht bilanziert.

## 2.4 Ermittlung der Gesamtkosten

Die Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012 fordert von den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union die Berechnung kostenoptimaler Energieeffizienz-niveaus aus mikroökonomischer oder makroökonomischer Perspektive. Bei der mikroökonomischen Perspektive handelt es sich um eine rein finanzielle – und somit privatwirtschaftliche – Perspektive, wobei Steuern anzurechnen sind. Im Rahmen der makroökonomischen Perspektive werden hingegen die gesamtgesellschaftlichen Kosten und Nutzen von Investitionen in die Energieeffizienz von Gebäuden berücksichtigt. Demnach bezieht diese volkswirtschaftliche Perspektive auch Treibhausgasemissionskosten mit ein. Steuern sind hingegen nicht anzusetzen. Den Europäischen Ländern steht es frei, ob der nationale Niedrigstenergiegebäudestandard aus den mikroökonomischen oder makroökonomischen Kostenoptimalitätsberechnungen abgeleitet wird [29]. Die bisherigen Novellierungen der EnEV basierten auf einer mikroökonomischen Betrachtungsweise [39]. Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchung wird daher als Weiterentwicklung der EnEV der nationale Niedrigstenergiegebäudestandard auf Grundlage von mikroökonomischen Untersuchungen definiert.

Im Rahmen der mikroökonomischen Perspektive sind die Kostenkategorien Anfangsinvestitionskosten, Austauschkosten, laufende Kosten, Energiekosten, Restwerte am Ende des Berechnungszeitraums und ggf. Entsorgungskosten zu berücksichtigen, wobei Gebäude in einzelne Gebäudekomponenten zu unterteilen sind. Vernachlässigt werden können Kosten, welche für alle zu berechnenden Varianten identisch sind, sowie Kosten für Gebäudekomponenten, welche keinen Einfluss auf die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden haben [29, 30].

In der hier beschriebenen Untersuchung werden nur Kosten eingerechnet, die einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz von Gebäuden haben. Pauschale Kosten pro Quadratmeter Grundfläche werden dagegen nicht angesetzt. Es werden folgende Kostenkategorien bei der Ermittlung der Gesamtkosten berücksichtigt:

- Anfangsinvestitionskosten für die Dämmung der Gebäudehülle,
- Anfangsinvestitionskosten für die technische Gebäudeausrüstung,
- Energiekosten,
- Instandhaltungskosten für die Dämmung der Gebäudehülle,
- Instandhaltungskosten für die technische Gebäudeausrüstung,
- Austauschkosten für die Dämmung der Gebäudehülle,
- Austauschkosten für die technische Gebäudeausrüstung,
- Restwert der Dämmung der Gebäudehülle und
- Restwert der technischen Gebäudeausrüstung.

Auf Grund der mikroökonomischen Betrachtungsweise ist bei Wohngebäuden die Deutsche Mehrwertsteuer von aktuell 19 % einzubeziehen. Staatliche Förderungen werden entsprechend [27] hingegen nicht berücksichtigt.

In den Leitlinien zur Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 [30] ist eine Ungenauigkeit enthalten. In der dort gezeigten Abbildung 4 - entsprechend Abbildung 3 in dieser Veröffentlichung -, welche die „Berechnung des Restwerts einer Gebäudekomponente mit einer kürzeren Lebensdauer als der Berechnungszeitraum“ [30] aufzeigt, wird dargestellt, dass lediglich der Restwert einer zu ersetzenden Gebäudekomponente am Ende des Untersuchungszeitraums auf den Anfangszeitpunkt abzuzinsen ist. In Wirklichkeit sind jedoch entsprechend Abbildung 10 jegliche Kosten, die während des Berechnungszeitraums berücksichtigt werden, mit Hilfe von Abzinsungsfaktoren auf den Beginn des Untersuchungszeitraums abzuzinsen.

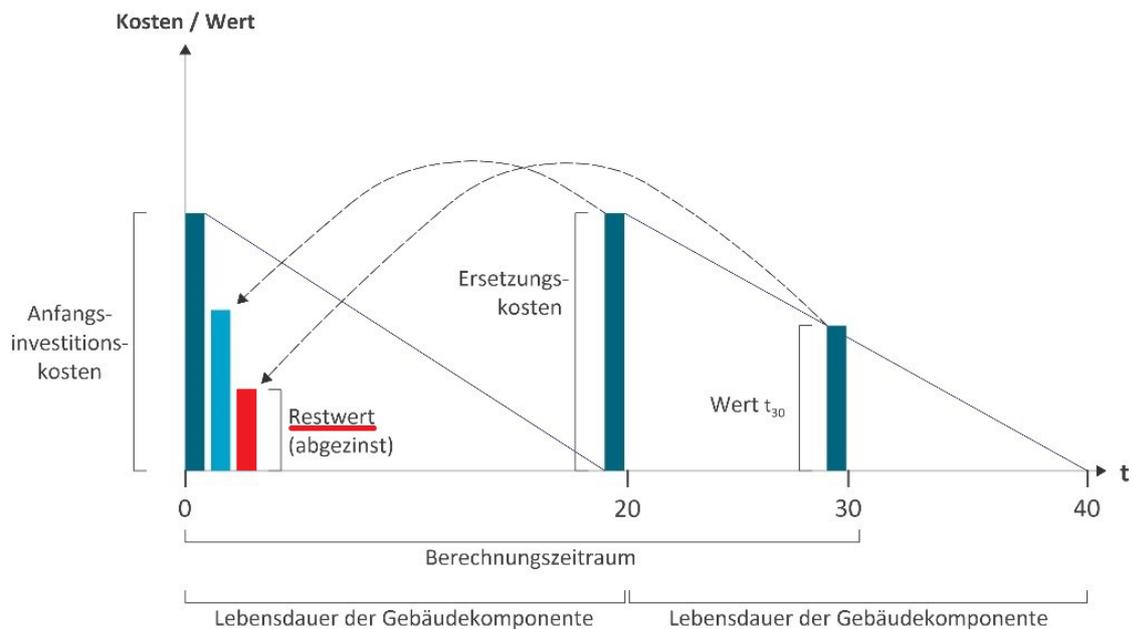


Abbildung 10 Berechnung des Restwerts (roter Balken) einer Gebäudekomponente mit einer kürzeren Lebensdauer als der Berechnungszeitraum, welche im Berechnungszeitraum ausgetauscht wird und am Ende des Berechnungszeitraums einen Restwert besitzt, nach [30]

## 2.5 Festlegung der Randbedingungen

Als Randbedingungen für die Berechnung der Energieeffizienz und des kostenoptimalen Energieeffizienzniveaus von Modellgebäuden müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden.

Bei der Bestimmung des kostenoptimalen Spektrums für die Beispielgebäude werden die Einflussfaktoren Betrachtungszeitraum, Kalkulationszinssatz, Inflationsrate, Energiepreise, Energiepreisentwicklung, Primärenergiefaktoren, Investitionskosten, Instandhaltungskosten und Lebensdauer in die Berechnung einbezogen.

Hinsichtlich des Betrachtungszeitraums werden entsprechend der Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 [29] 30 Jahre für Wohngebäude und 20 Jahre für Nichtwohngebäude angesetzt.

Die Beispielgebäude werden aus mikroökonomischer Perspektive untersucht. Auf Grund der gewählten mikroökonomischen Perspektive sind CO<sub>2</sub>-Kosten bei der Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums nicht zu berücksichtigen [29].

Unterschiedliche Annahmen für eine intelligente Haustechniksteuerung wurden hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den mittleren Primärenergiebedarf untersucht. Das Ansetzen der unterschiedlichen Gebäudeautomationsklassen A-D führt zu Unterschieden im Primärenergiebedarf von einigen Prozent. Als Randbedingung wurde die Automationsklasse C entsprechend DIN V 18599 [15] angesetzt.

Allen Modellgebäuden gemein sind die Annahmen über Lebensdauer, Instandhaltungskosten, Energiepreisentwicklung, Primärenergiefaktoren, Kalkulationszinssatz und Investitionskosten für Bauteile der wärmeübertragenden Hüllflächen. Daher werden diese zunächst vorgestellt.

Die anzusetzenden Randbedingungen für Investitionskosten für Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) unterscheiden sich teilweise für die drei Kategorien Einfamilienhaus/Doppelhaushälfte, Mehrfamilienhaus und Nichtwohngebäude. Diese werden anschließend für jede Kategorie einzeln vorgestellt.

Die Festlegung der Lebensdauer und der Instandhaltungskosten von Bauteilen der wärmeübertragenden Hüllflächen und von TGA-Komponenten erfolgt auf Grundlage vom „Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte“ [40], der DIN EN 15459 [41], der E DIN EN 15459 [42], der VDI 2067 Blatt 1 [43] der „Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung „Cost-Optimal-Level“ – Modellrechnungen“ [34] und dem Bericht „EnEV 2017 – Vorbereitende Untersuchungen“ [44, 44]. In Tabelle 1 sind die zugehörigen Randbedingungen hinterlegt.

*Tabelle 1 Lebensdauer und jährliche Instandhaltungskosten*

Bauteil	Lebensdauer [a]	Instandhaltungskosten pro Jahr (% der Anfangsinvestition)
Bodenplatte	40	0,0%
Decke nach unten gegen unbeheizt	40	0,0%
Außenwände gegen Außenluft	40	0,0%
Decke nach oben gegen unbeheizt	40	0,0%
Flachdächer	40	0,0%
Steildächer	40	0,0%
Fenster	30	0,5%
Dachflächenfenster	30	0,5%
Außentüren	30	0,5%
Erdgas-Brennwertkessel	20	2,0%
Erdgas-Hausanschluss	80	0,0%
Heizöl-Brennwertkessel	20	2,0%
Heizöltank	30	0,5%
Holzpelletkessel	15	2,0%
Holzpelletlager	20	0,5%
Luft-Wasser-Wärmepumpe	18	2,5%

Sole-Wasser-Wärmepumpe	20	2,5%
Erdsonden für Sole-Wasser-Wärmepumpe	50	1,5%
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	20	2,5%
Brunnen für Wasser-Wasser-Wärmepumpe	50	1,5%
Solaranlage zur Warmwasserunterstützung	20	0,5%
Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung	20	0,5%
indirekt beheizter Warmwasserspeicher	20	1,0%
bivalenter Solarspeicher	20	1,0%
Pufferspeicher	20	1,0%
Durchlauferhitzer	12	2,0%
Abgasanlage	50	3,0%
Heizkörper + Rohrleitungen	35	1,5%
Fußbodenheizung + Rohrleitungen	50	2,0%
zentrale Abluftanlage	15	4,8%
Zu- und Abluftanlage	15	5,3%
Lüftungskanäle	30	2,0%

Bei der Berechnung der Instandhaltungskosten und der Austauschkosten wird eine jährliche Inflationsrate in Höhe von 2,5 % festgelegt, auf Basis der vom Statistischen Bundesamt ausgewerteten Preisentwicklungen im Bausektor im Jahr 2016 gegenüber dem Jahr 2015 [45].

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden die Energiepreise entsprechend Tabelle 2 angesetzt. Die Werte wurden mit Hilfe der Quellen „Eurostat“ [46], „Zahlen und Fakten Energiedaten“ [47] „Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung „Cost-Optimal-Level“ – Modellrechnungen“ [34], „Daten zur Energiepreisentwicklung“ [48] und „Entwicklung des Pelletpreises in Deutschland“ [49] recherchiert.

Tabelle 2 Energiepreise

Energieträger	Energiepreise	
	Wohngebäude (inkl. MwSt.)	Nichtwohngebäude (ohne MwSt.)
Heizöl	0,059 €/kWh	0,050 €/kWh
Erdgas	0,064 €/kWh	0,054 €/kWh
Holzpellets	0,049 €/kWh	0,038 €/kWh
allgemeiner Strommix	0,298 €/kWh	0,250 €/kWh

Die Annahmen hinsichtlich der zukünftigen Preisentwicklung für Energieträger sind in Tabelle 3 aufgeführt, wobei die Werte für Heizöl, Erdgas und Strom auf der Studie „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“ [50] basieren. Für Holzpellets war es nicht möglich, fundierte Preisentwicklungsprognosen zu recherchieren. Da sich Holzpelletpreise in den letzten 10 Jahren sehr ähnlich den Erdgaspreisen entwickelt haben [51], wird angenommen, dass auch zukünftig dieser Trend besteht und eine gleiche prozentuale Zunahme angenommen.

Tabelle 3 Energiepreisentwicklung

Energieträger	Energiepreisentwicklung			
	2017 – 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2047
Heizöl	+ 1,6 % pro Jahr	+ 1,8 % pro Jahr	+ 1,2 % pro Jahr	+ 0,8 % pro Jahr
Erdgas	+ 1,4 % pro Jahr	+ 1,1 % pro Jahr	+ 1,0 % pro Jahr	+ 0,2 % pro Jahr
Holzpellets	+ 1,4 % pro Jahr	+ 1,1 % pro Jahr	+ 1,0 % pro Jahr	+ 0,2 % pro Jahr
Strom	+ 1,4 % pro Jahr	- 0,3 % pro Jahr	- 0,3 % pro Jahr	- 0,3 % pro Jahr

Bei der Berechnung des Primärenergiebedarfs während des Untersuchungszeitraums von 30 Jahren bei Wohngebäuden bzw. 20 Jahren bei Nichtwohngebäuden [29] muss beachtet werden, dass die Primärenergiefaktoren bestimmter Energieträger in Zukunft voraussichtlich sinken werden [52]. Insbesondere für den Strom-Primärenergiefaktor ist auf Grund des steigenden Anteils von Elektrizität aus erneuerbaren Energien eine erhebliche Reduktion zu erwarten. Demnach ist bei gleichbleibender Qualität der Gebäudeenergieeffizienz in Zukunft ein geringerer Primärenergiebedarf zu erwarten. Es ist somit sinnvoll, während des Berechnungszeitraums einen mittleren Jahres-Primärenergiebedarf für die zu untersuchenden Varianten zu ermitteln und diese Ergebnisse für die Festlegung des nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards heranzuziehen. Deshalb werden zur Bestimmung des mittleren Jahres-Primärenergiebedarfs die zukünftigen Primärenergiefaktoren der Energieträger auf Grundlage vom „IBP-Bericht WB 170/2013“ [52] abgeschätzt und in den Berechnungen angesetzt. In Tabelle 4 sind die Rechercheergebnisse bezüglich der möglichen Entwicklung der Primärenergiefaktoren von Energieträgern zusammengetragen. Die Zahlen basieren auf der aktuell gültigen EnEV 2016 sowie dem „IBP-Bericht WB 170/2013“ [52].

Tabelle 4 Primärenergiefaktor-Entwicklung

Energieträger	Primärenergiefaktoren			
	2017 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2047
Heizöl	1,10	1,10	1,09	1,07
Erdgas	1,10	1,10	1,09	1,07
Holzpellets	0,20	0,20	0,20	0,20
allgemeiner Strommix	1,80	1,60	1,40	1,00

Bei der Festlegung des zu berücksichtigenden Abzinsungssatzes wurde der Ansatz gewählt, dass sich dieser zusammensetzt aus einem risikofreien Zinssatz und einer Risikoprämie. 30-jährige Bundesanlei-

hen gelten als risikofrei und rentieren aktuell mit ca. 1 % [53]. Als sinnvolle Risikoprämie werden momentan ca. 2 % erachtet. Somit bildet ein Abzinsungssatz in Höhe von 3 % die Ausgangslage für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen.

Die Investitionskosten für die Bauteile der wärmeübertragenden Hüllflächen sind in Tabelle 5 gezeigt. Die Kosten in Euro ergeben sich aus der Zahlenwertgleichung in Spalte 2, in dem für x der Zahlenwert aus Spalte 3 eingesetzt wird. Diese wurden nach [44], [54], [55] recherchiert und wurden mit Hilfe von „Preisindizes für die Bauwirtschaft“ [56] aktualisiert auf den Stand 2016.

Tabelle 5 Investitionskosten für Bauteile der wärmeübertragenden Hüllflächen. Die Kosten in Euro ergeben sich aus der Zahlenwertgleichung in Spalte 2, in dem für x der Zahlenwert aus Spalte 3 eingesetzt wird.

Bauteil	Formel zur Berechnung der Brutto-Kosten pro m <sup>2</sup> Bauteilfläche	in Abhängigkeit von
Bodenplatte	$2163.9x^4 - 4395.9x^3 + 3321.1x^2 - 1153.4x + 285.9$	U-Wert
Decke nach unten gegen unbeheizt	$2163.9x^4 - 4395.9x^3 + 3321.1x^2 - 1153.4x + 285.9$	U-Wert
Außenwände gegen Außenluft	$3847x^4 - 7164.2x^3 + 4891x^2 - 1488.1x + 345.37$	U-Wert
Vorhangfassaden gegen Außenluft	$-1034.9x^4 + 4174x^3 - 6007.4x^2 + 3300.9x + 371.82$	U-Wert
Decke nach oben gegen unbeheizt	$1429.8x^4 - 3176.1x^3 + 2638.7x^2 - 987.92x + 295.66$	U-Wert
Flachdächer	$4177.5x^4 - 7382x^3 + 4905.8x^2 - 1488.1x + 375.83$	U-Wert
Steildächer	$3284.3x^4 - 6570.5x^3 + 4853.9x^2 - 1625x + 345.85$	U-Wert
Fenster / Außentüren	$-850.83x^3 + 3556.4x^2 - 4907.6x + 2539.9$	U-Wert
Dachflächenfenster	$808.7x^2 - 2631.6x + 2645.4$	U-Wert
verbesserte Wärmebrücken	$259.33x + 2438.15$	Anzahl WE <sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> WE entspricht Wohneinheiten

<sup>2</sup> Ansatz für Nichtwohngebäude: Anzahl WE =  $A_{NGF}/50$

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass alle in diesem Kapitel aufgelisteten Investitionskosten Brutto-Kosten sind. Im Rahmen der Berechnung der Nichtwohngebäude sind jedoch entsprechend den europäischen Vorgaben Netto-Kosten zu berücksichtigen. Demnach wurde in den Ergebnissen für Nichtwohngebäude, welche in Kap. 3 gezeigt werden, die derzeit gültige Mehrwertsteuer von 19 % rausgerechnet.

Bezüglich der Investitionskosten für die TGA müssen die drei Kategorien Einfamilienhaus/Doppelhaus-hälfte, Mehrfamilienhaus und Nichtwohngebäude getrennt betrachtet werden. Daher werden die Investitionskosten jeder Kategorie im Folgenden in einer separaten Tabelle dargestellt. Die Werte aus Tabelle 6 - Tabelle 8 basieren auf [44, 57, 58], dem „Bericht über die Berechnung des „Kostenoptimalen Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz““ [27] und wurden mit aktuellen Kostenangaben von Herstellern und mit Hilfe von „Preisindizes für die Bauwirtschaft“ [56] auf den Stand 2016 gebracht.

In Tabelle 6 sind die Kostenformeln für die TGA-Komponenten für Einfamilienhaus und Doppelhaus-hälfte aufgelistet, in Tabelle 7 entsprechend für das Mehrfamilienhaus und in Tabelle 8 für die Nichtwohngebäude.

Die Formeln zur Berechnung der Investitionskosten für Gebäudehülle und TGA sind in Anhang A zusätzlich in grafischer Darstellung hinterlegt.

Table 6 Investitionskosten für TGA-Komponenten: Einfamilienhaus und Doppelhaushälfte. Die Kosten in Euro ergeben sich aus der Zahlenwertgleichung in Spalte 2, in dem für x der Zahlenwert aus Spalte 3 eingesetzt wird.

TGA-Komponente EFH / DHH	Formel zur Berechnung der Brutto-Kosten	In Abhängigkeit von
<b>Wärmeerzeuger</b>		
Gas-Brennwertkessel	$26.971x + 3630.7$	Leistung [kW]
Heizöl-Brennwertkessel	$34.523x + 4647.3$	Leistung [kW]
Holzpelletkessel	$92.292x + 17791$	Leistung [kW]
Luft-Wasser-Wärmepumpe	$-17.089x^2 + 1509.2x + 1413$	Leistung [kW]
Sole-Wasser-Wärmepumpe	$679.8x + 7966.9$	Leistung [kW]
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	$-8.5447x^2 + 1094.5x + 4689.9$	Leistung [kW]
Solaranlage zur Warmwasserunterstützung	$677.24x + 1659$	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]
Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung	$687.39x + 1683.9$	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]
<b>Zusatzkosten zu den Wärmeerzeugern</b>		
Gas Hausanschluss	$2074.672x$	je Anschluss [Stk]
Heizöltank	$1.025x$	Tankvolumen [l]
Pelletlager	$197.05x$	Leistung [kW]
Abgasanlage	3319,00	je Gebäude
Erdsonde für Sole-Wasser-Wärmepumpe	$1146x + 933.6$	Leistung [kW]
Brunnen für Wasser-Wasser-Wärmepumpe	$1089x + 886.9$	Leistung [kW]
indirekt beheizter Warmwasserspeicher	$30.115x + 1202.6$	Leistung [kW]
bivalenter Speicher	$30.115x + 1352.7$	Leistung [kW]
Pufferspeicher	$2.0418x + 1290.4$	Volumen [l]
<b>Lüftungsanlagen</b>		
Abluftanlage	3112,01	je Gebäude
Kanäle	778,00	je Gebäude
Zu- und Abluftanlage mit WRG < 80% inkl. Kanäle	$46.966x + 414.93$	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]
Zu- und Abluftanlage mit WRG > 80% inkl. Kanäle	$58.708x + 518.67$	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]
<b>Wärmeabgabe</b>		

Heizkörper	$106.8x + 5549.1$	Leistung [kW]
Fußbodenheizung	$62.28x$	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]

Tabella 7 Investitionskosten für TGA-Komponenten: Mehrfamilienhaus. Die Kosten in Euro ergeben sich aus der Zahlenwertgleichung in Spalte 2, in dem für x der Zahlenwert aus Spalte 3 eingesetzt wird.

TGA-Komponente MFH	Formel zur Berechnung der Brutto-Kosten	in Abhängigkeit von
<b>Wärmeerzeuger</b>		
Gas-Brennwertkessel	$594.18x^{0.6813}$	Leistung [kW]
Heizöl-Brennwertkessel	$760.55x^{0.6813}$	Leistung [kW]
Holzpelletkessel	$2584.3x^{0.7508}$	Leistung [kW]
Luft-Wasser-Wärmepumpe	Nicht praxisgerecht für hohe kW-Zahlen	
Sole-Wasser-Wärmepumpe	$1824.6x^{0.7873}$	Leistung [kW]
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	$1331.9x^{0.8646}$	Leistung [kW]
Solaranlage zur Warmwasserunterstützung	$677.24x + 1659$	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]
Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung	$687.39x + 1683.9$	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]
<b>Zusatzkosten zu den Wärmeerzeugern</b>		
Gas Hausanschluss	$2074.672x$	je Anschluss [Stk]
Heizöltank	$1.025x$	Tankvolumen [l]
Pelletlager	$197.05x$	Leistung [kW]
Abgasanlage	$4149,34$	je Gebäude
Erdsonde für Sole-Wasser-Wärmepumpe	$875.1x + 13559$	Leistung [kW]
Brunnen für Wasser-Wasser-Wärmepumpe	$831.34x + 12881$	Leistung [kW]
indirekt beheizter Warmwasserspeicher	$1.2705x + 1459.5$	Volumen [l]
bivalenter Speicher	$1.331x + 1529$	Volumen [l]
Pufferspeicher	$1.21x + 1390$	Volumen [l]
<b>Lüftungsanlagen</b>		
Abluftanlage inkl. Kanäle	$2074.7x + 518.67$	Wohneinheit
Zu- und Abluftanlage mit WRG < 80% inkl. Kanäle	$46.68x + 466.8$	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]
Zu- und Abluftanlage mit WRG > 80%	$51.867x + 518.67$	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]
<b>Wärmeabgabe</b>		

Heizkörper	$138.96x + 94$	Leistung [kW]
Fußbodenheizung	$62.28x$	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]

Tabelle 8 Investitionskosten für TGA-Komponenten: Nichtwohngebäude. Die Kosten in Euro ergeben sich aus der Zahlenwertgleichung in Spalte 2, in dem für x der Zahlenwert aus Spalte 3 eingesetzt wird.

TGA-Komponente NWG	Formel zur Berechnung der Brutto-Kosten	in Abhängigkeit von
<b>Wärmeerzeuger</b>		
Gas-Brennwertkessel	$594.18x^{0.6813}$	Leistung [kW]
Heizöl-Brennwertkessel	$760.55x^{0.6813}$	Leistung [kW]
Holzpelletkessel	$2584.3x^{0.7508}$	Leistung [kW]
Luft-Wasser-Wärmepumpe	Nicht praxisgerecht für hohe kW-Zahlen	
Sole-Wasser-Wärmepumpe	$1824.6x^{0.7873}$	Leistung [kW]
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	$1331.9x^{0.8646}$	Leistung [kW]
Solaranlage zur Warmwasserunterstützung	$677.24x + 1659$	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]
Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung	$687.39x + 1683.9$	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]
elektrischer Durchlauferhitzer	$200x$	Anzahl [Stk]
<b>Zusatzkosten zu den Wärmeerzeugern</b>		
Gas Hausanschluss	$2074.672x$	je Anschluss [Stk]
Heizöltank	$1.025x$	Tankvolumen [l]
Pelletlager	$197.05x$	Leistung [kW]
Abgasanlage	$4149,34$	je Gebäude
Erdsonde für Sole-Wasser-Wärmepumpe	$875.1x + 13559$	Leistung [kW]
Brunnen für Wasser-Wasser-Wärmepumpe	$831.34x + 12881$	Leistung [kW]
indirekt beheizter Warmwasserspeicher	$1.2705x + 1459.5$	Volumen [l]
bivalenter Speicher	$1.331x + 1529$	Volumen [l]
Pufferspeicher	$1.21x + 1390$	Volumen [l]
<b>Lüftungsanlagen</b>		
Abluftanlage inkl. Kanäle	$6.841x$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]
Zu- und Abluftanlage mit WRG 60% inkl. Kanäle	$28.711x$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]

Zu- und Abluftanlage mit WRG 60% und verbesserter SFP <sup>1</sup> inkl. Kanäle	35.888x	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]
Zu- und Abluftanlage mit WRG 75% inkl. Kanäle	29.456x	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]
Zu- und Abluftanlage mit WRG 75% und verbesserter SFP <sup>1</sup> inkl. Kanäle	36.82x	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]
Wärmeabgabe		
Heizkörper (Büro)	130.99x + 44512	Leistung [kW]
Heizkörper (Hotel)	145.45x + 49408	Leistung [kW]
Fußbodenheizung	62.28x	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]

<sup>1</sup> SFP entspricht Specific Fan Power = spezifische Ventilator Leistung

## 2.6 Durchführung einer Sensitivitätsanalyse

Der nationale Niedrigstenergiegebäudestandard ist auf Grundlage von Wirtschaftlichkeitsberechnungen über einen Zeitraum von 30 Jahren für Wohngebäude bzw. 20 Jahren für Nichtwohngebäude festzulegen [29]. Es ist jedoch schwierig, die zukünftige Entwicklung der Einflussfaktoren genau vorauszusagen. Deshalb, sowie zur Überprüfung von wichtigen kostenbezogenen Eingangsdaten, fordert die Europäische Union die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse. Damit wird überprüft, ob Aussagen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen bestehen bleiben, wenn sich getroffene Annahmen nicht bewahrheiten. Variiert werden muss zum einen der Abzinsungssatz, wobei mindestens zwei Szenarios anzunehmen sind. Zum anderen ist die Energiepreisentwicklung von Energieträgern zu variieren [29]. „Im Anschluss an die Sensitivitätsanalyse [sollen] die Mitgliedstaaten [der Europäischen Union] für jede Berechnungsart den geeignetsten Zinssatz festlegen. Dieser ist für die Kostenoptimalitätsberechnung zu verwenden“ [30]. Abweichend zu den Europäischen Vorgaben wird von den Autoren empfohlen eine Sensitivitätsanalyse erst nach der Bestimmung des kostenoptimalen Energieeffizienznieaus für die einzelnen Modellgebäude auf Grundlage der Ausgangsannahmen durchzuführen. Es wird somit ermöglicht, die Auswirkungen veränderter Einflussfaktoren in den Diagrammen zur Ermittlung des kostenoptimalen Bereichs/Spektrums optisch zu erfassen. Außerdem wird empfohlen zusätzlich die Anfangsinvestitions- und die Austauschkosten einer Sensitivitätsanalyse zu unterziehen.

In diesem Bericht wurden Sensitivitätsanalysen zu den Parametern Kalkulationszinssatz, Energiepreisentwicklung und Inflationsrate durchgeführt. Für den Kalkulationszinssatz wurde anstelle des ursprünglich angenommenen Wertes von 3,0 % ein niedrigerer Zinssatz von 1,0 % angenommen. Diese Werte wurden gewählt, um eine gewisse realistische Bandbreite an Zinssätzen darzustellen.

Für die Energiepreisentwicklung wurden im Vergleich zu Tabelle 3 deutlich höhere Werte angenommen, siehe Tabelle 9. Es wird davon ausgegangen, dass die Möglichkeit besteht, dass die konventionellen Energieträger Heizöl und Erdgas z. B. aufgrund von drastischerer Verknappung aufgrund von politischen Gegebenheiten einer deutlich höheren Energiepreissteigerung unterliegen werden. Aufgrund fehlender Daten wurde die Entwicklung für Holzpellets an den Erdgaspreis gekoppelt. Auch für Strom wurde hier das Szenario durchgespielt, dass dieser sich nicht wie erwartet weiterhin verbilligt sondern kontinuierlich leicht teurer wird.

Für die Inflationsrate wurde anstelle der ursprünglich angenommenen 2,5 % eine niedrigere Rate von 0,5 % angenommen. Diese Werte wurden gewählt, um eine gewisse realistische Bandbreite an Inflationsraten zu erhalten.

Tabelle 9

Energiepreisentwicklung – erhöhte Werte

Energieträger	Energiepreisentwicklung			
	2017 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2047
Heizöl	+ 2,8 % pro Jahr	+ 2,8 % pro Jahr	+ 2,8 % pro Jahr	+ 2,8 % pro Jahr
Erdgas	+ 2,8 % pro Jahr	+ 2,8 % pro Jahr	+ 2,8 % pro Jahr	+ 2,8 % pro Jahr
Holzpellets	+ 2,8 % pro Jahr	+ 2,8 % pro Jahr	+ 2,8 % pro Jahr	+ 2,8 % pro Jahr
Strom	+ 2,2 % pro Jahr	+ 0,6 % pro Jahr	+ 0,1 % pro Jahr	+ 0,1 % pro Jahr

## 2.7 Bestimmung des kostenoptimalen Energieeffizienzniveaus mit Hilfe von Modellgebäuden

Entsprechend Abbildung 11 sind für jedes Modellgebäude die wärmeübertragenden Umfassungsflächen sowie die Anlagentechnik gemäß der Referenzgebäudeausführung nach EnEV 2014 mit Hilfe einer geeigneten Software zu erfassen. Es wurde das Programm ZUB Helena Ultra (Version 7.50) eingesetzt, welches das Gütesiegel der 18599 Gütegemeinschaft e.V. trägt und somit als validierte Software zur KfW-Effizienzhausberechnung nach DIN V 18599 eingesetzt werden darf [59]. Mit Hilfe des Programms ist gemäß der Normenreihe DIN V 18599 der Jahres-Primärenergiebedarf und der Jahres-Endenergiebedarf zu berechnen. Auf Grundlage der festgelegten Ausgangsrandbedingungen und dem Jahres-Endenergiebedarf aus der EnEV-Berechnung sind die Gesamtkosten während des Betrachtungszeitraums sowie der mittlere Jahres-Primärenergiebedarf für die Ausgangsvariante „Referenzgebäudeausführung nach EnEV 2014“ zu bestimmen. Dabei wurde eine mittelschwere Bauweise entsprechend DIN V 18599-2 (entsprechend  $90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$ ) angesetzt. Im Anschluss sind für jedes Modellgebäude sowohl die Dämmqualität als auch die TGA zu variieren. Für jede zu untersuchende Variante erfolgt die Ermittlung der Gesamtkosten während des Betrachtungszeitraums und des mittleren Jahres-Primärenergiebedarfs. Alle auf diesem Weg berechneten Variantenergebnisse sind für jedes Modellgebäude in ein Diagramm einzutragen, welches in Abbildung 12 beispielhaft abgebildet ist, um den kostenoptimalen Bereich ermitteln zu können.

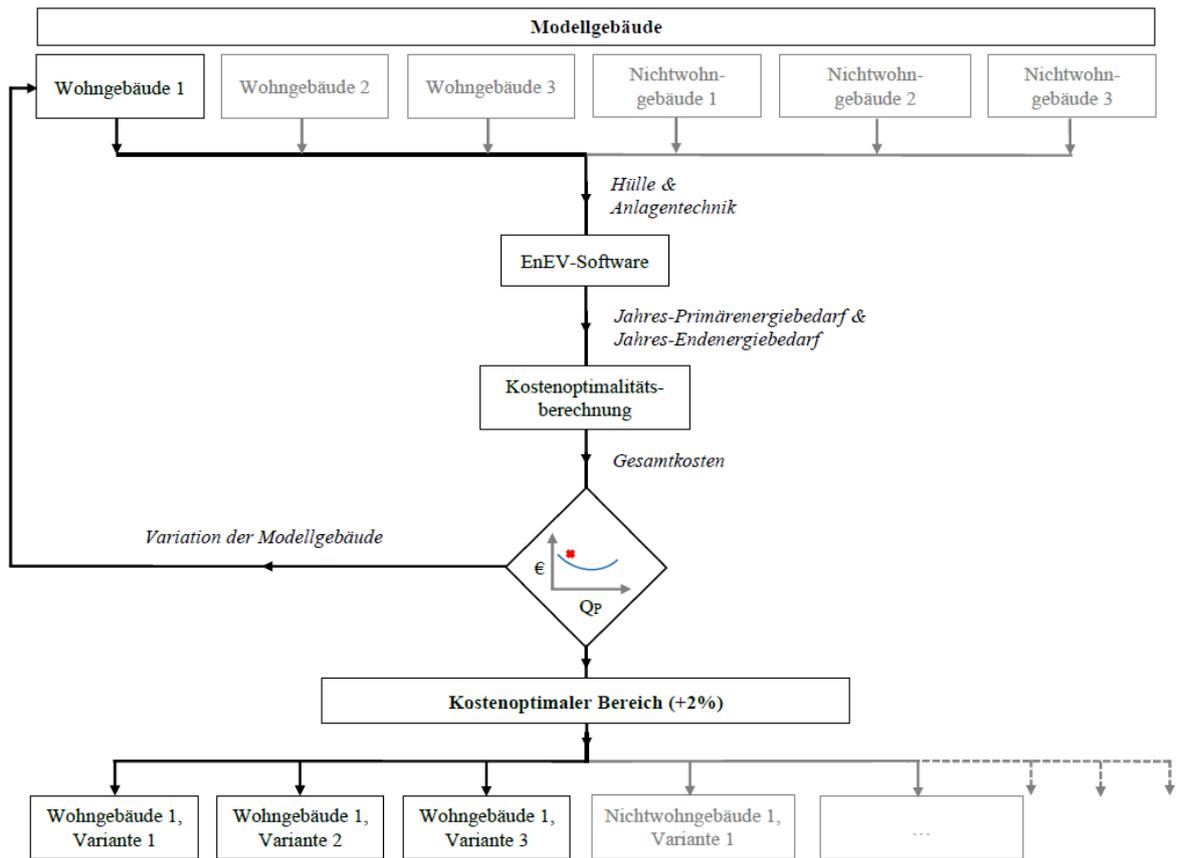


Abbildung 11 Schema zur Bestimmung des kostenoptimalen Spektrums

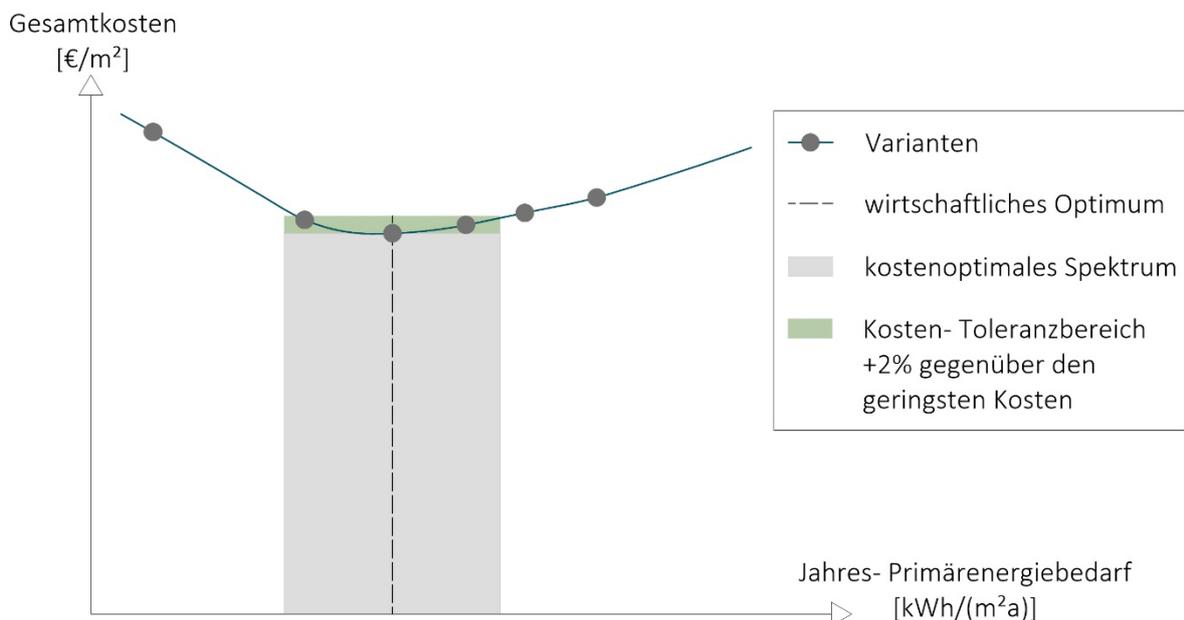


Abbildung 12 Diagramm zur Ermittlung des kostenoptimalen Spektrums

Die „Leitlinien zur Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012“ [30] geben vor, dass die Variante mit den niedrigsten Gesamtkosten dem kostenoptimalen Niveau der Mindestanforderungen an die Ge-

samtenergieeffizienz entspricht. Das kostenoptimale Spektrum setzt sich zusammen aus dem mittleren Jahres-Primärenergiebedarf der Maßnahmenkombinationen, welche die gleichen oder sehr ähnliche Kosten aufweisen wie die Variante mit den niedrigsten Gesamtkosten. Die Bundesregierung erlaubt eine Abweichung von den Gesamtkosten um + 2 % [27]. In Abbildung 12 ist das wirtschaftliche Optimum für ein Modellgebäude mit der gestrichelten Linie markiert. Somit befinden sich alle Varianten, welche in den grün markierten Bereich fallen, im kostenoptimalen Bereich und stehen zur Auswahl zur Festlegung des nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards.

## **2.8 Festlegung des nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards**

Auf Grundlage der Diagramme zur Ermittlung des kostenoptimalen Bereichs für die einzelnen Modellgebäude erfolgt die Festlegung des nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards.

Dabei ist zu beachten, dass der Primärenergiebedarf des nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards entsprechend den europäischen Vorgaben maximal 15 % unter dem des kostenoptimalen Ergebnisses liegen darf. Bei der Auswertung sind nur Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen zu berücksichtigen, mit deren Hilfe die derzeitigen nationalen Anforderungen der EnEV 2016 erfüllt werden können [29].

### 3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes vorgestellt. Zunächst werden für die Modellgebäude die jeweiligen betrachteten Varianten vorgestellt, danach für jedes Modellgebäude die Kostenoptimalitätsberechnung und die Sensitivitätsanalyse präsentiert. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet. Darauf aufbauend werden die Referenzgebäude für den neu definierten Niedrigstenergiegebäudestandard vorgestellt. Die Ergebnisse zu einer kritischen Betrachtung der Berechnungsmethode, einer möglichen Anpassung des Energieausweises und einer möglichen Anrechnung von Energieeinsparmaßnahmen werden präsentiert. Der Einsatz von Gebäudesimulation für den Nachweis des Niedrigstenergiestandards wird diskutiert und über die Maßnahmen zur Demonstration der Praxistauglichkeit berichtet.

#### 3.1 Betrachtete Varianten Wohngebäude (für Modellgebäude 1-3)

Tabelle 10 listet die in diesem Projekt betrachteten Varianten für Wohngebäude auf. Die Varianten sind in Anhang B genauer erläutert.

Tabelle 10 Varianten Wohngebäude

Variante
Variante 1: Referenzgebäude entsprechend EnEV 2014
Variante 2: U-Werte Gebäudehülle 10 % verbessert
Variante 3: U-Werte Gebäudehülle 20 % verbessert
Variante 4: U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert
Variante 5: U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert
Variante 6: U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert
Variante 7: verbesserte Wärmebrücken
Variante 8: Gas-Brennwertkessel
Variante 9: Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung
Variante 10: Luft-Wasser-Wärmepumpe*
Variante 11: Sole-Wasser-Wärmepumpe
Variante 12: Wasser-Wasser-Wärmepumpe
Variante 13: Holzpelletkessel
Variante 14: Zu- und Abluftanlage mit 70 % Wärmebereitstellungsgrad
Variante 15: Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad
Variante 16: Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 8 % verbessert
Variante 17: Effizienzhaus 70 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert*
Variante 18: Effizienzhaus 70 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert

Variante 19: Effizienzhaus 55 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)
Variante 20: Effizienzhaus 55 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)
Variante 21: Effizienzhaus 55 mit Sole-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)
Variante 22: Effizienzhaus 55 mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)
Variante 23: Effizienzhaus 55 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)*
Variante 24: Effizienzhaus 55 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 35 % verbessert*
Variante 25: Effizienzhaus 40 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 52 % verbessert

\*nur für EFH & DHH

Alle Varianten basieren auf den zu den Modellgebäuden zugehörigen Referenzgebäuden entsprechend EnEV 2014 (Variante 1). Zum einen wurde die Dämmqualität der wärmeübertragenden Umfassungsflächen (Variante 2 bis 6) sowie der Wärmebrückenkorrekturfaktor (Variante 7) variiert. Zum anderen wurden unterschiedliche praxisübliche Wärmeerzeuger (Variante 8 bis 13) sowie verschiedene Lüftungsanlagen (Variante 14 und 15) angesetzt. Auf den Ansatz von Fern- bzw. Nahwärmeversorgung wurde verzichtet, weil diese Möglichkeit nicht flächendeckend in Deutschland existiert und weil die zertifizierten Primärenergiefaktoren und die Energiepreise von Versorgern stark variieren können. Die Variante 16 bildet durch Kombination von verbessertem Dämmstandard und optimierter Anlagentechnik eine Möglichkeit ab, wie alle untersuchten Modellgebäude (Wohngebäude) knapp die Anforderungen der aktuell gültigen EnEV 2016 und des EEWärmeG erfüllen können. Im Rahmen der Varianten 17 bis 25 wurde ebenfalls sowohl der energetische Standard der Gebäudehülle als auch die technische Gebäudeausrüstung variiert. Die Angaben zum Effizienzhausstandard basieren auf den Vorgaben der KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) [60] und sind in der nachfolgenden Tabelle 11 zusammengefasst. Für die Varianten 19 bis 23 wurden die Referenzwerte entsprechend eines alternativen Nachweises eines KfW Effizienzhaus 55 angesetzt. Für die übrigen Effizienzhaus-Varianten wurden sinnvolle Annahmen gewählt, um die Anforderungen gemäß Tabelle 11 zu erfüllen.

Für das Mehrfamilienhaus wurde im Vergleich zu den übrigen Wohn-Modellgebäuden darauf verzichtet die Varianten mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe zu untersuchen, da es in der Praxis nicht üblich ist große Mehrfamilienhäuser auf diese Weise mit Wärme zu versorgen.

Tabelle 11 Vorgaben der KfW

KfW-Effizienzhaus	40	55	70
$Q_P$ in % $Q_{P,REF}^1$	40	55	70
$H'_T$ in % $H'_{T,REF}$	55	70	85

<sup>1</sup> ohne 25 prozentige Verschärfung entsprechend EnEV 2016 Anlage 1, Tabelle 1, Zeile 1.0

Die vorhandenen Varianten, die eine Wärmepumpe beinhalten, erfüllen das EEWärmeG nach §5 Abs.4 nur unter der Voraussetzung, dass Luft/Wasser- und Luft/Luft-Wärmepumpen eine Jahresarbeitszahl von 3,3 und alle anderen Wärmepumpen eine Jahresarbeitszahl von 3,8 bereitstellen.

Weiterhin müssen die Wärmepumpen über einen Wärmemengen- und Stromzähler verfügen, deren Messwerte die Berechnung der Jahresarbeitszahlen ermöglichen. Ausgenommen von dieser Regelung sind Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen, wenn die Vorlauftemperatur der Heizungsanlage bis zu 35 Grad Celsius beträgt.

Da es in der Software ZUB Helena Ultra keine exakte Angabe zur Jahresarbeitszahl und zum Vorhandensein von Wärmemengen- und Stromzählern gibt, muss zur Erfüllung des EEWärmeG davon ausgegangen werden, dass die notwendigen Jahresarbeitszahlen der verwendeten Wärmepumpen erreicht werden und dass die notwendigen Wärmemengen- und Stromzähler vorhanden sind.

## **3.2 Modellgebäude 1: Einfamilienhaus klein**

Erste Ergebnisse für dieses Modellgebäude waren bereits vorab veröffentlicht worden [32]. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen wurden in der hier vorgestellten weiterentwickelten Berechnung insbesondere die Investitionskosten der TGA überarbeitet, um sie realitätsnah zu bestimmen.

### **3.2.1 Kostenoptimalitätsberechnung**

In Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Berechnung der Gesamtkosten für energetische Maßnahmen in Abhängigkeit vom mittleren Jahres-Primärenergiebedarf für alle Varianten des Modellgebäudes Einfamilienhaus dargestellt. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet. Als Ausgangsvariante ist Variante 1, das Referenzgebäude nach EnEV 2014, dargestellt. Diese Variante erfüllt die verschärften Anforderungen nach EnEV 2016 nicht und darf deshalb bei der Festlegung des kostenoptimalen Bereichs nicht berücksichtigt werden. Ansonsten sind nur Varianten gezeigt, welche die EnEV 2016 erfüllen. In Tabelle 12 sind die zugehörigen Werte für die Gesamtkosten und den mittleren Jahres-Primärenergiebedarf aufgelistet.

Variante 5 (U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert) ist die Variante mit den geringsten Kosten, gefolgt von Variante 16 (Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 8 % verbessert) und Variante 18 (Effizienzhaus 70 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert).

Generell ist der zu erwartende Trend zu sehen, dass sich bei der Anwendung von Maßnahmen, welche zu höherer Energieeffizienz führen, auch die Gesamtkosten erhöhen. Für diese sowie für alle weiteren Kostenoptimalitätsberechnungen wird nicht der in Abbildung 12 gezeigte Zusammenhang gefunden. Die energieeffizienteste Variante 25 (Effizienzhaus 40 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 52 % verbessert) ist zugleich auch die teuerste.

Wie in Kapitel 2.7 erläutert erlaubt die Bundesregierung eine Abweichung von den Gesamtkosten um + 2 % [27], um einen kostenoptimalen Bereich festzulegen. Hierfür müssen zu den in Abbildung 13 gezeigten Gesamtkosten für energetische Maßnahmen am Gebäude (Hülle und TGA) und den Energiekosten die Grundkosten für den Neubau unter Berücksichtigung der nach der Betrachtungsdauer noch vorhandenen Restwerte hinzuaddiert werden.

Für das Modellgebäude Einfamilienhaus liegen die Grundkosten bei 561,64 €. Diese Grundkosten ergeben sich durch die Investitionskosten für die Neuerrichtung eines Gebäudes (1286,46 Euro/m<sup>2</sup>) [44] abzüglich der Erstellungskosten Hülle (430 Euro/m<sup>2</sup>) sowie Erstinstantiation der TGA (184 Euro/m<sup>2</sup>) zu 672,46 €. Da für diese Grundkosten eine Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt wird und der Betrachtungszeitraum 30 Jahre beträgt, muss die Abzinsung und der Restwert berücksichtigt werden und man erhält für die Grundkosten den Wert von 561,64 €. Damit wird die 2 % Abweichung von der kostengünstigsten Variante folgendermaßen festgelegt:  $(561,64 \text{ € /m}^2 + 933 \text{ € /m}^2) \cdot 0,02 = 29,89 \text{ €}$ . In Abbildung 13 ist also der kostenoptimale Bereich  $933 \text{ € /m}^2 + 29,89 \text{ € /m}^2 = 962,89 \text{ € /m}^2$ . Dieser Bereich ist durch die beiden gestrichelten Linien eingegrenzt. Damit kämen neben Variante 5 sowohl Variante 16

als auch Variante 18 als kostenoptimale Variante in Frage. Es handelt sich um Varianten mit stark verbesserter Gebäudehülle (Variante 5) und bei Varianten 16 und 18 moderat verbesserter Gebäudehülle und verbesserter TGA. Alle anderen Varianten erfüllen die Vorgaben nicht.

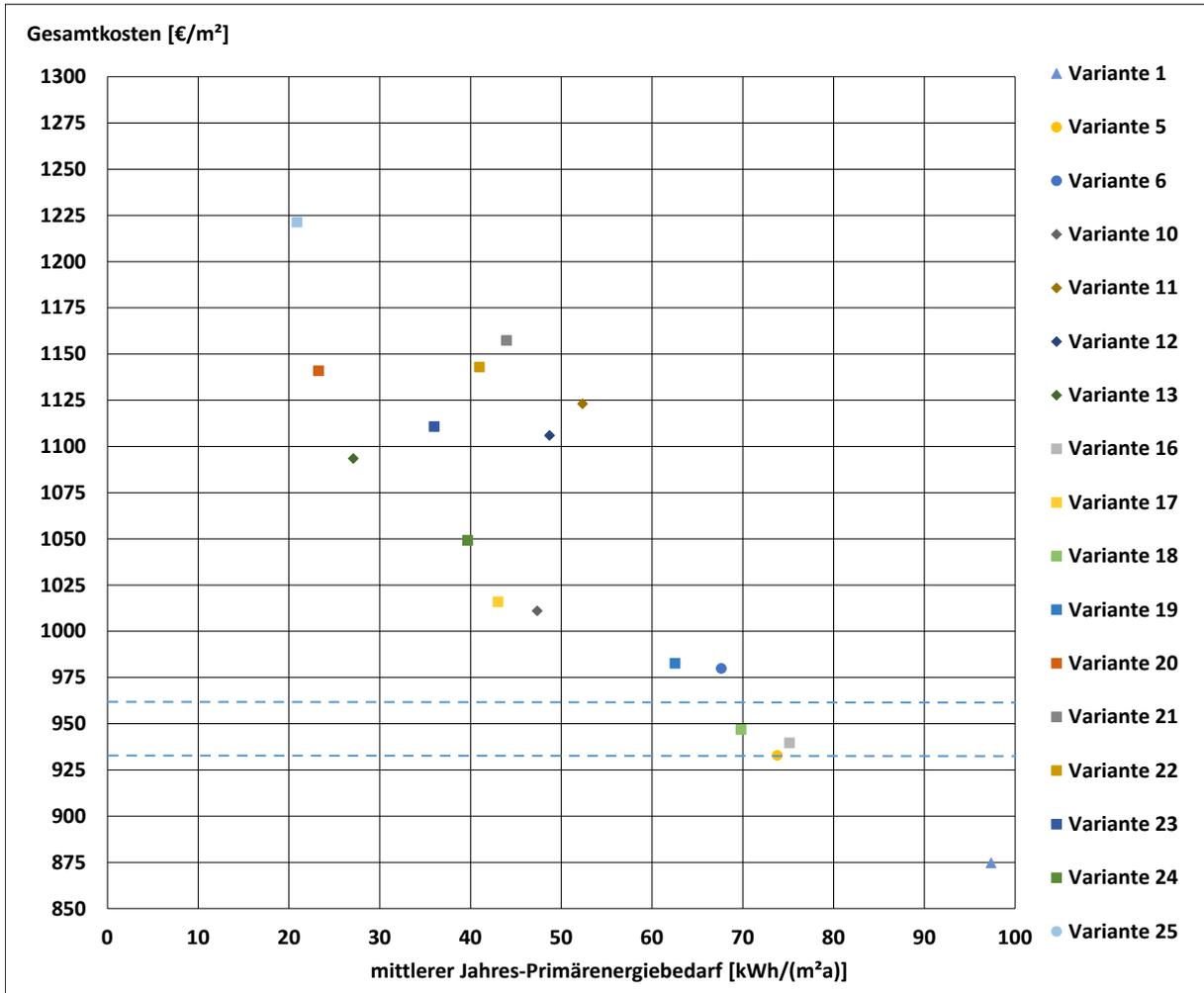


Abbildung 13 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Einfamilienhaus. Der kostenoptimale Bereich (2 %) ist durch die gestrichelten Linien begrenzt. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Tabelle 12 Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf und Gesamtkosten für energetische Maßnahmen für das Modellgebäude Einfamilienhaus

Variante	Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m²a]	Gesamtkosten [€/m²]
Variante 1	97	875
Variante 5	74	933
Variante 6	68	980
Variante 10	47	1011
Variante 11	52	1123
Variante 12	49	1106

Variante 13	27	1093
Variante 16	75	940
Variante 17	43	1016
Variante 18	70	947
Variante 19	63	983
Variante 20	23	1141
Variante 21	44	1157
Variante 22	41	1143
Variante 23	36	1111
Variante 24	40	1049
Variante 25	21	1221

### 3.2.2 Sensitivitätsanalyse

Bevor Schlussfolgerungen aus der Kostenoptimalitätsberechnung abgeleitet werden, wird zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Entsprechend den Europäischen Vorgaben werden sowohl die Energiepreisentwicklung der Energieträger, die Inflationsrate als auch der Kalkulationszinssatz variiert (siehe Kap. 2.6). Für die geänderte Energiepreisentwicklung und Inflationsrate liegen dieselben Grundkosten wie oben beschrieben zugrunde.

Energiepreisentwicklung: Für die Energiepreisentwicklung wurden im Vergleich zu Tabelle 3 deutlich höhere Werte angenommen, siehe Tabelle 9.

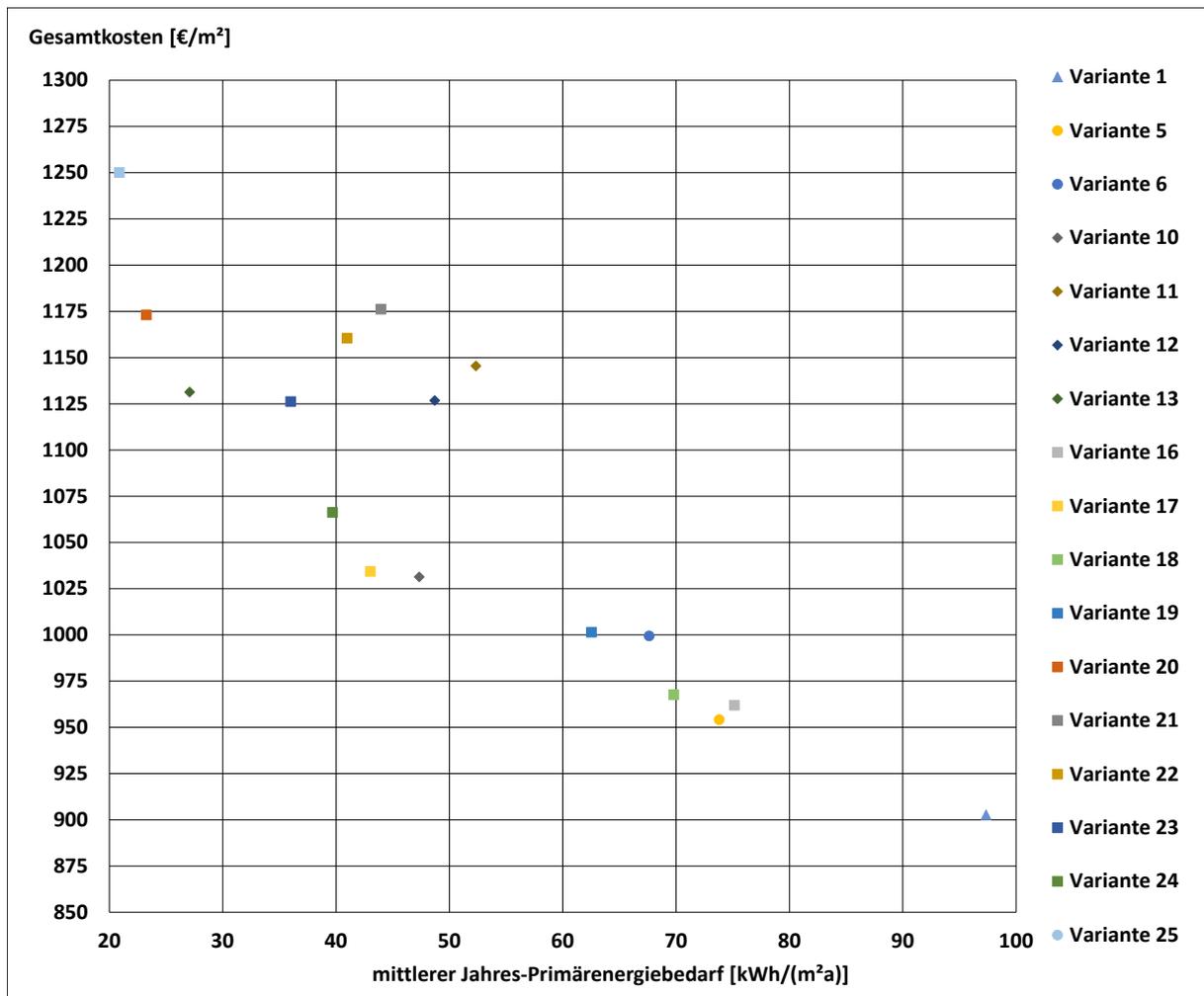


Abbildung 14 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Einfamilienhaus: hohe Energiepreisentwicklung. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Inflationsrate: Für die Inflationsrate wurde anstelle der ursprünglich angenommenen 2,5 % eine niedrigere Rate von 0,5 % angenommen.

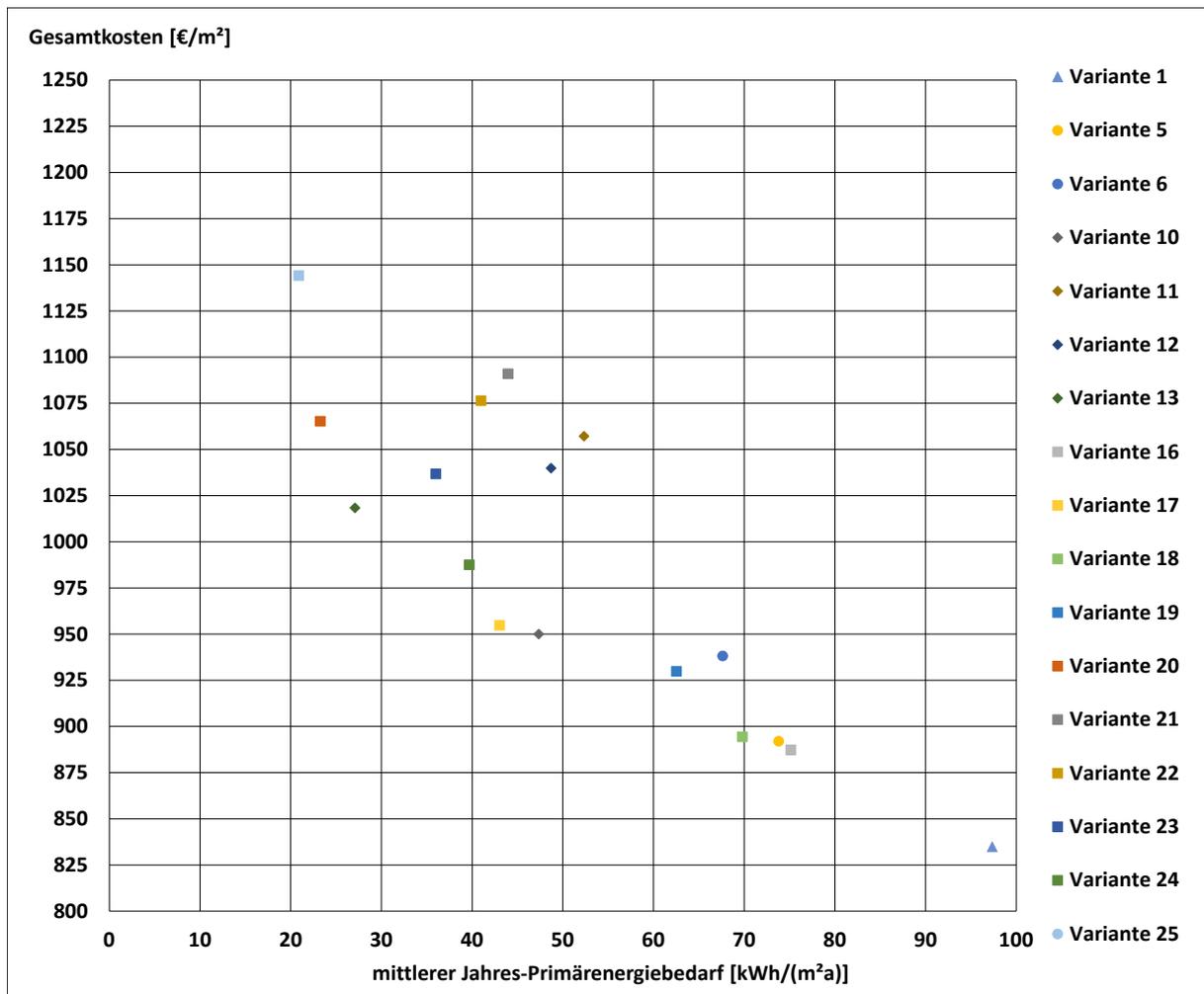


Abbildung 15 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Einfamilienhaus: niedrige Inflationsrate. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Kalkulationszinssatz: Für den Kalkulationszinssatz wurde anstelle des ursprünglich angenommenen Wertes von 3,0 % ein niedrigerer Zinssatz von 1,0 % angenommen.

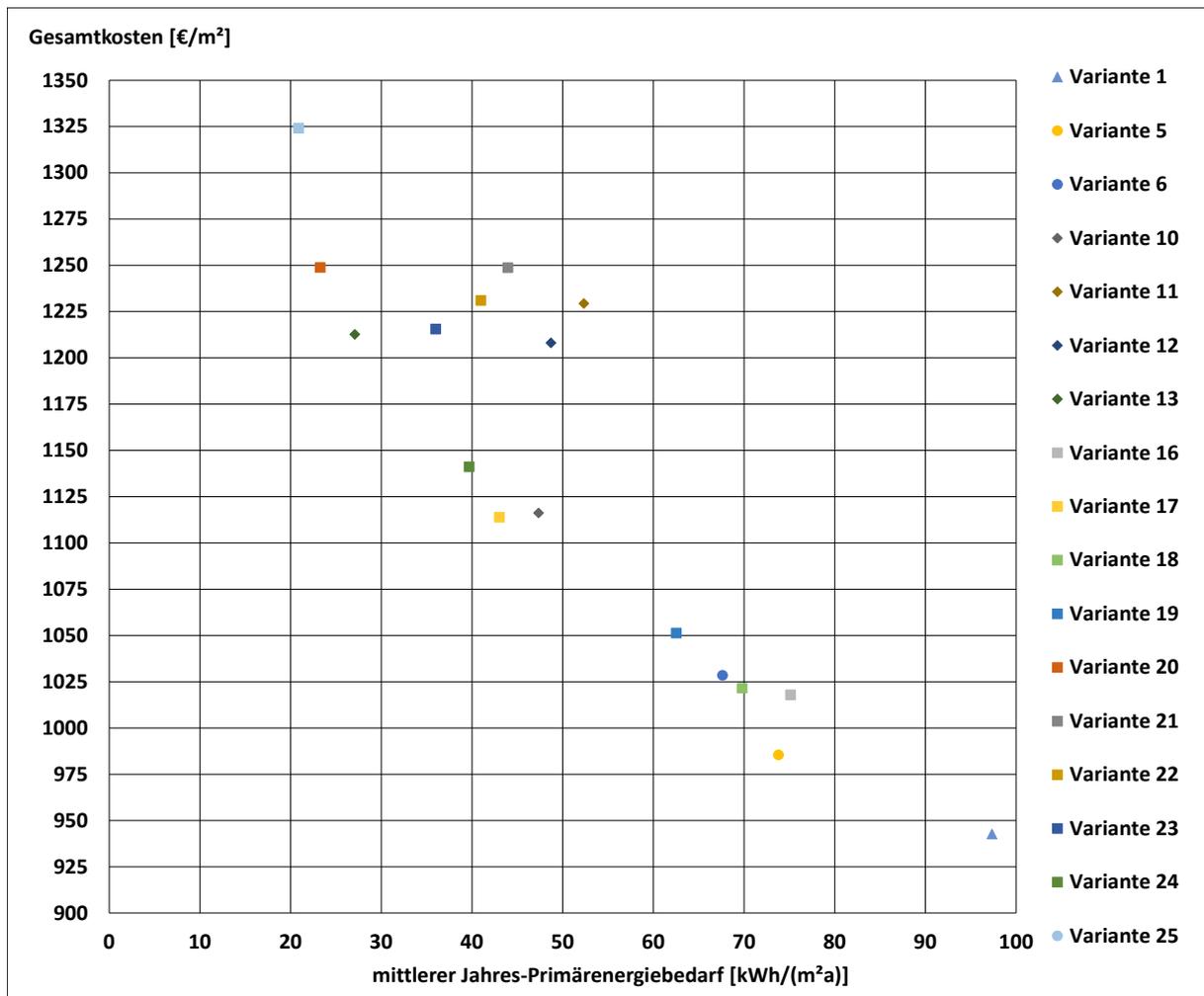


Abbildung 16 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Einfamilienhaus: niedriger Kalkulationszinssatz. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Wie in Abbildung 14 bis Abbildung 16 ersichtlich können aus der Sensitivitätsanalyse folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es ergeben sich quantitative Änderungen bzgl. des mittleren Jahres-Primärenergiebedarf und der Gesamtkosten der untersuchten Varianten.
- Bzgl. der Anordnung der Varianten hinsichtlich ihres mittleren Jahresprimärenergiebedarfs und der zugehörigen Gesamtkosten entstehen durch die geänderten Annahmen leichte Verschiebungen.
- Die Gruppe der 3 kostenoptimalen Varianten, die Varianten 5, 16 und 18, ändert sich im Rahmen der Sensitivitätsanalyse nicht.

Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse somit, dass die vorgestellten Ergebnisse robust gegen eine Variation der Ausgangsannahmen sind. Daher können die Varianten 5, 16 und 18 als kostenoptimale Varianten für das Modellgebäude Einfamilienhaus angesehen werden.

### 3.3 Modellgebäude 2: Doppelhaushälfte

#### 3.3.1 Kostenoptimalitätsberechnung

In Abbildung 17 sind die Ergebnisse der Berechnung der Gesamtkosten in Abhängigkeit von mittleren Jahres-Primärenergiebedarf für alle Varianten des Modellgebäudes Doppelhaushälfte dargestellt. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet. Als Ausgangsvariante ist 40

wieder Variante 1, das Referenzgebäude nach EnEV 2014, dargestellt, welche allerdings die verschärften Anforderungen nach EnEV 2016 nicht erfüllt und daher bei der Festlegung des kostenoptimalen Bereichs nicht berücksichtigt werden darf. Ansonsten sind nur Varianten gezeigt, welche die EnEV 2016 erfüllen. In Tabelle 13 sind die Werte für die Gesamtkosten und den mittleren Jahres-Primärenergiebedarf aufgelistet.

Wiederum ist Variante 5 (U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert) die Variante mit den geringsten Kosten, gefolgt von Variante 16 (Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 8 % verbessert) und Variante 18 (Effizienzhaus 70 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert). Variante 6 (U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert) folgt dicht auf.

Es ist auch für das Modellgebäude Doppelhaushälfte zu erkennen, dass sich bei der Anwendung von Maßnahmen, welche zu höherer Energieeffizienz führen, die Gesamtkosten erhöhen. Die energieeffizienteste Variante 25 (Effizienzhaus 40 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 52 % verbessert) ist zugleich auch hier wieder die teuerste.

Um die erlaubte Abweichung von 2 % von der kostengünstigsten Variante zu berechnen, müssen zu den in Abbildung 17 gezeigten Gesamtkosten für energetische Maßnahmen am Gebäude (Hülle und TGA) und den Energiekosten die Grundkosten für den Neubau unter Berücksichtigung der nach der Betrachtungsdauer noch vorhandenen Restwerte hinzuaddiert werden.

Für das Modellgebäude Doppelhaushälfte liegen die Grundkosten bei 491,49 €. Diese Grundkosten ergeben sich durch die Investitionskosten für die Neuerrichtung eines Gebäudes (1092,47 Euro/m<sup>2</sup>) [44] abzüglich der Erstellungskosten Hülle (337 Euro/m<sup>2</sup>) sowie Ersteinstallation der TGA (167 Euro/m<sup>2</sup>) zu 588,47 €. Da für diese Grundkosten eine Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt wird und der Betrachtungszeitraum 30 Jahre beträgt, muss die Abzinsung und der Restwert berücksichtigt werden und man erhält für die Grundkosten den Wert 491,49 €. Damit wird die 2 % Abweichung von der kostengünstigsten Variante folgendermaßen festgelegt:  $(491,49 \text{ € /m}^2 + 787 \text{ € /m}^2) \cdot 0,02 = 25,57 \text{ €}$ . In Abbildung 17 ist also der kostenoptimale Bereich  $787 \text{ € /m}^2 + 25,57 \text{ € /m}^2 = 812,56 \text{ € /m}^2$ . Dieser Bereich ist durch die beiden gestrichelten Linien eingegrenzt. Damit kämen neben Variante 5 sowohl Variante 16 als auch Variante 18 als kostenoptimale Variante in Frage, also entweder eine stark verbesserte Gebäudehülle oder eine Kombination aus moderat verbesserter Gebäudehülle und verbesserter TGA. Alle anderen Varianten erfüllen die Vorgaben nicht.

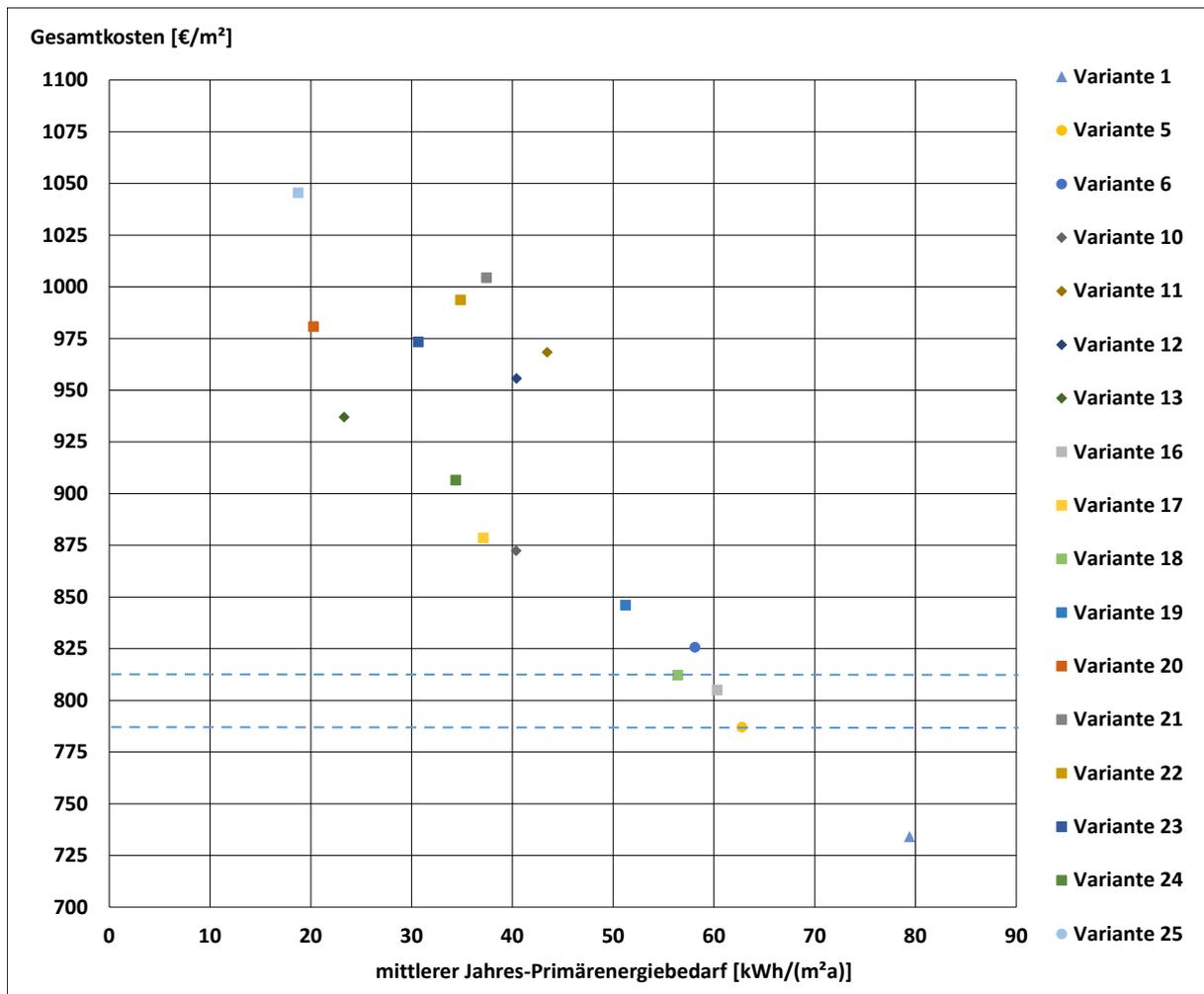


Abbildung 17 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Doppelhaushälfte. Der kostenoptimale Bereich (2 %) ist durch die gestrichelten Linien begrenzt. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Tabelle 13 Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf und Gesamtkosten für energetische Maßnahmen für das Modellgebäude Doppelhaushälfte

Variante	Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m²a]	Gesamtkosten [€/m²]
Variante 1	79	734
Variante 5	63	787
Variante 6	58	826
Variante 10	40	872
Variante 11	43	968
Variante 12	40	956
Variante 13	23	937
Variante 16	60	805
Variante 17	37	879

Variante 18	56	812
Variante 19	51	846
Variante 20	20	981
Variante 21	37	1004
Variante 22	35	994
Variante 23	31	973
Variante 24	34	906
Variante 25	19	1046

### 3.3.2 Sensitivitätsanalyse

Bevor Schlussfolgerungen aus der Kostenoptimalitätsberechnung abgeleitet werden, wird zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Entsprechend den Europäischen Vorgaben werden sowohl die Energiepreisentwicklung der Energieträger, die Inflationsrate als auch der Kalkulationszinssatz variiert (siehe Kap. 2.6). Für die geänderte Energiepreisentwicklung und Inflationsrate liegen dieselben Grundkosten wie oben beschrieben zugrunde.

Energiepreisentwicklung: Für die Energiepreisentwicklung wurden im Vergleich zu Tabelle 3 deutlich höhere Werte angenommen, siehe Tabelle 9.

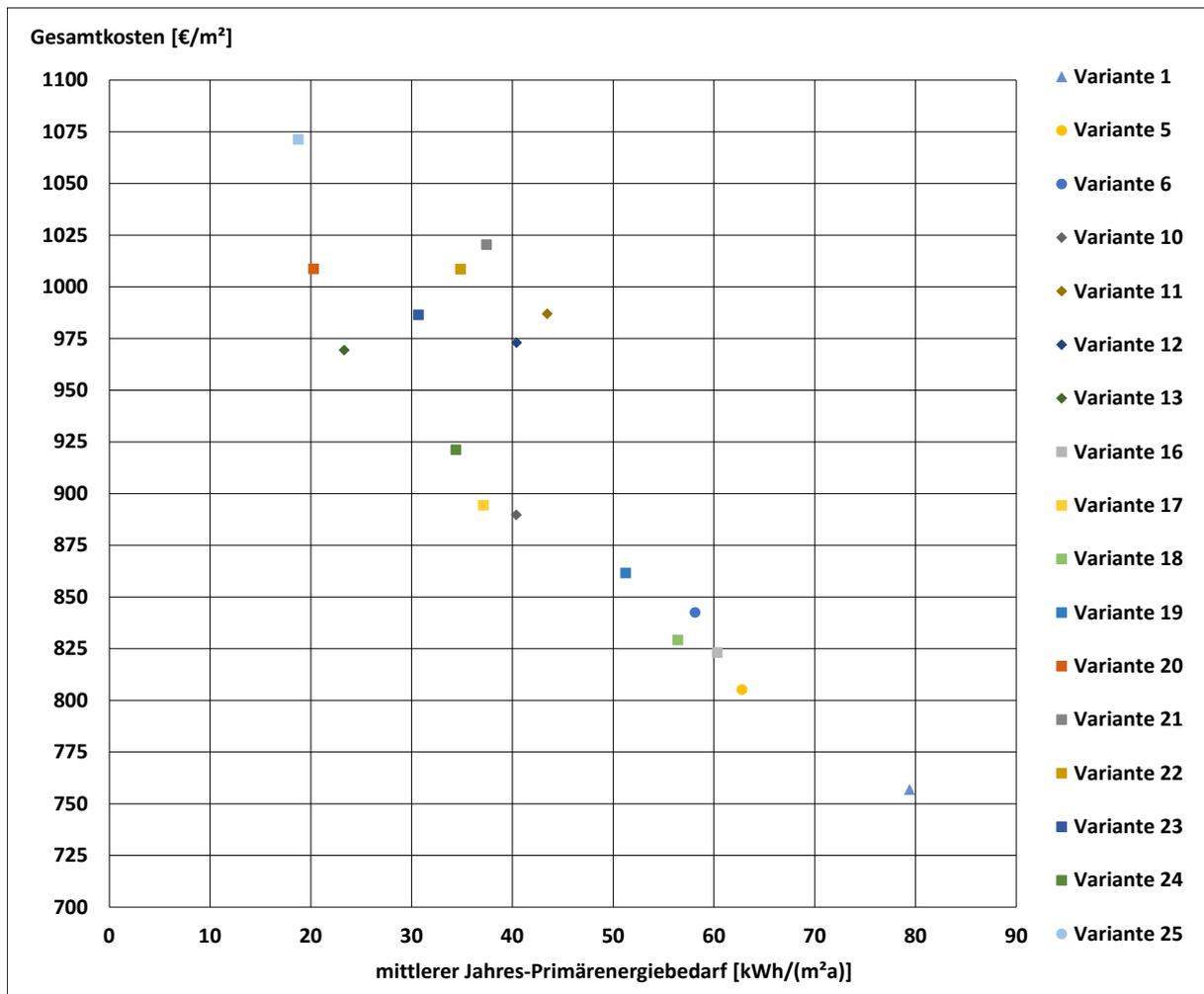


Abbildung 18 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Doppelhaushälfte: hohe Energiepreisentwicklung. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Inflationsrate: Für die Inflationsrate wurde anstelle der ursprünglich angenommenen 2,5 % eine niedrigere Rate von 0,5 % angenommen.

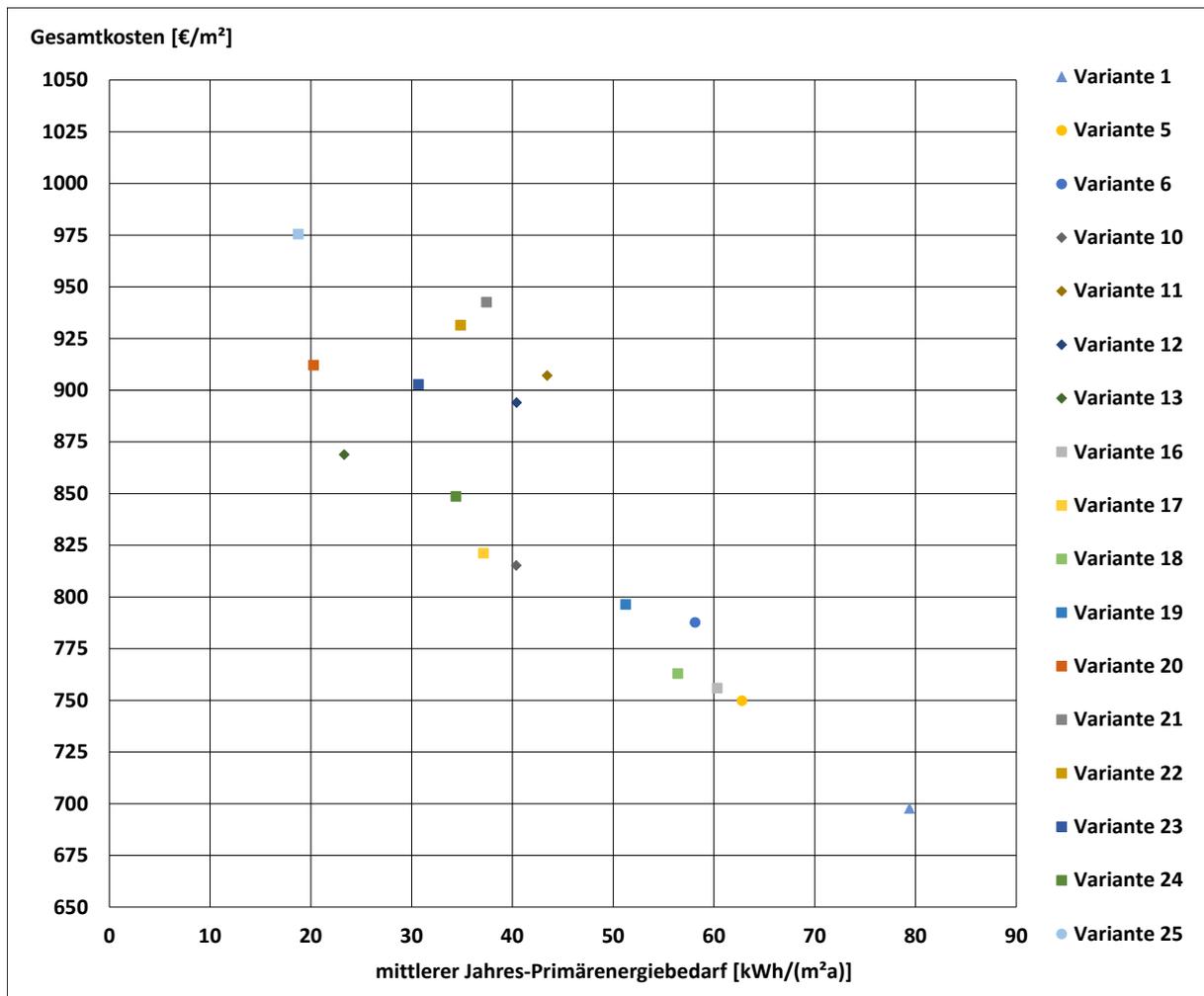


Abbildung 19 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Doppelhaushälfte: niedrige Inflationsrate. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Kalkulationszinssatz: Für den Kalkulationszinssatz wurde anstelle des ursprünglich angenommenen Wertes von 3,0 % ein niedrigerer Zinssatz von 1,0 % angenommen.

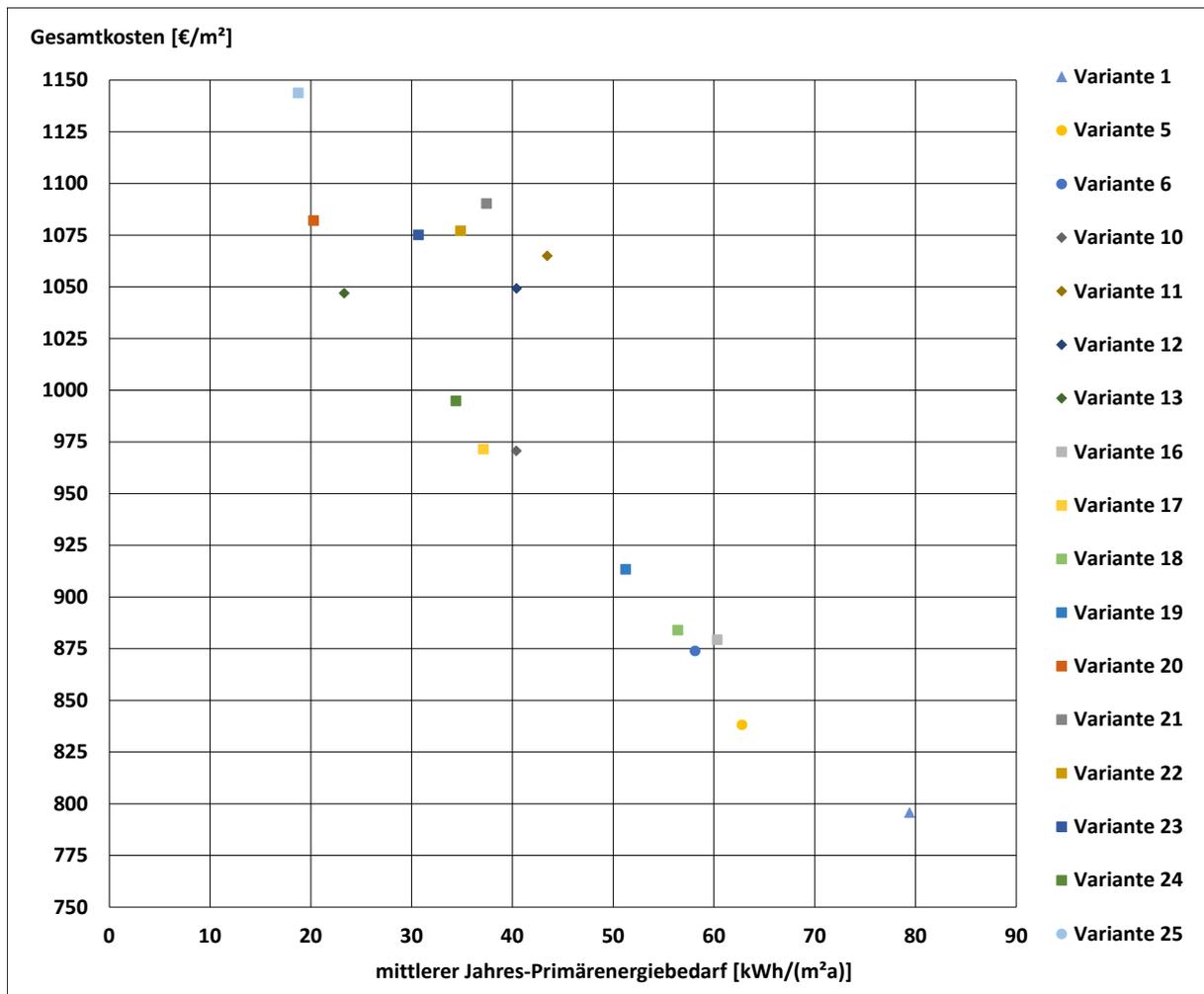


Abbildung 20 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Doppelhaushälfte: niedriger Kalkulationszinssatz. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Wie in Abbildung 18 bis Abbildung 20 ersichtlich können aus der Sensitivitätsanalyse folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es ergeben sich quantitative Änderungen bzgl. des mittleren Jahres-Primärenergiebedarf und der Gesamtkosten der untersuchten Varianten.
- Bzgl. der Anordnung der Varianten hinsichtlich ihres mittleren Jahresprimärenergiebedarfs und der zugehörigen Gesamtkosten entstehen durch die geänderten Annahmen leichte Verschiebungen.
- Die Gruppe der 4 kostenoptimalen Varianten, die Varianten 5, 6, 16 und 18, ändert sich im Rahmen der Sensitivitätsanalyse nicht.

Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse somit, dass die vorgestellten Ergebnisse robust gegen eine Variation der Ausgangsannahmen sind. Daher können die Varianten 5, 16 und 18 als kostenoptimale Varianten für das Modellgebäude Doppelhaushälfte angesehen werden.

### 3.4 Modellgebäude 3: Mehrfamilienhaus groß

Auch für dieses Modellgebäude wurden erste Ergebnisse bereits veröffentlicht [31]. Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf einer weiterentwickelten Berechnung bzgl. der Investitionskosten der TGA.

### 3.4.1 Kostenoptimalitätsberechnung

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der Gesamtkosten in Abhängigkeit von mittleren Jahres-Primärenergiebedarf für alle Varianten des Modellgebäudes Mehrfamilienhaus. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet. Als Ausgangsvariante ist wieder Variante 1, das Referenzgebäude nach EnEV 2014, dargestellt, die jedoch die EnEV 2016 nicht erfüllt. Ansonsten sind wiederum nur Varianten gezeigt, welche die EnEV 2016 erfüllen. In Tabelle 14 sind die Werte für die Gesamtkosten und den mittleren Jahres-Primärenergiebedarf aufgelistet.

Für dieses Modellgebäude ist Variante 16 (Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 8 % verbessert) die kostengünstigste Variante. Variante 15 (Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad) und Variante 18 (Effizienzhaus 70 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert) sind fast gleichauf. Variante 5 (U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert), Variante 19 (Effizienzhaus 55 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)) und Variante 13 (Holzpelletkessel) folgen dahinter.

Es ist auch für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus zu erkennen, dass sich bei der Anwendung von Maßnahmen, welche zu höherer Energieeffizienz führen, im Allgemeinen die Gesamtkosten erhöhen. Allerdings gibt es für dieses Modellgebäude neben Variante 25 (Effizienzhaus 40 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 52 % verbessert) eine genauso energieeffiziente Variante 20 (Effizienzhaus 55 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken), welche deutlich günstiger ausfällt.

Für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus liegen die Grundkosten bei 726,09 €. Diese Grundkosten ergeben sich durch die Investitionskosten für die Neuerrichtung eines Gebäudes (1184,36 Euro/m<sup>2</sup>) [44] abzüglich der Erstellungskosten Hülle (240 Euro/m<sup>2</sup>) sowie Erstinstallation der TGA (75 Euro/m<sup>2</sup>) zu 869,36 €. Da für diese Grundkosten eine Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt wird und der Betrachtungszeitraum 30 Jahre beträgt, muss die Abzinsung und der Restwert berücksichtigt werden und man erhält für die Grundkosten den Wert von 726,09 €. Damit wird die 2 % Abweichung von der kostengünstigsten Variante folgendermaßen festgelegt:  $(726,09 \text{ € /m}^2 + 479 \text{ € /m}^2) \cdot 0,02 = 24,10 \text{ €}$ . In Abbildung 13 ist also der kostenoptimale Bereich  $479 \text{ € /m}^2 + 24,10 \text{ € /m}^2 = 503,10 \text{ € /m}^2$ . Dieser Bereich ist durch die beiden gestrichelten Linien eingegrenzt. Damit kommen für dieses Modellgebäude die Varianten 16, 15, 18, 5, 19 und 13 als kostenoptimale Lösung in Frage. Es handelt sich also um eine Mischung aus Möglichkeiten, entweder eine stark verbesserte Gebäudehülle (5), verbesserte TGA (15, 13) oder eine Kombination aus moderat verbesserter Gebäudehülle und verbesserter TGA (16, 18, 19).

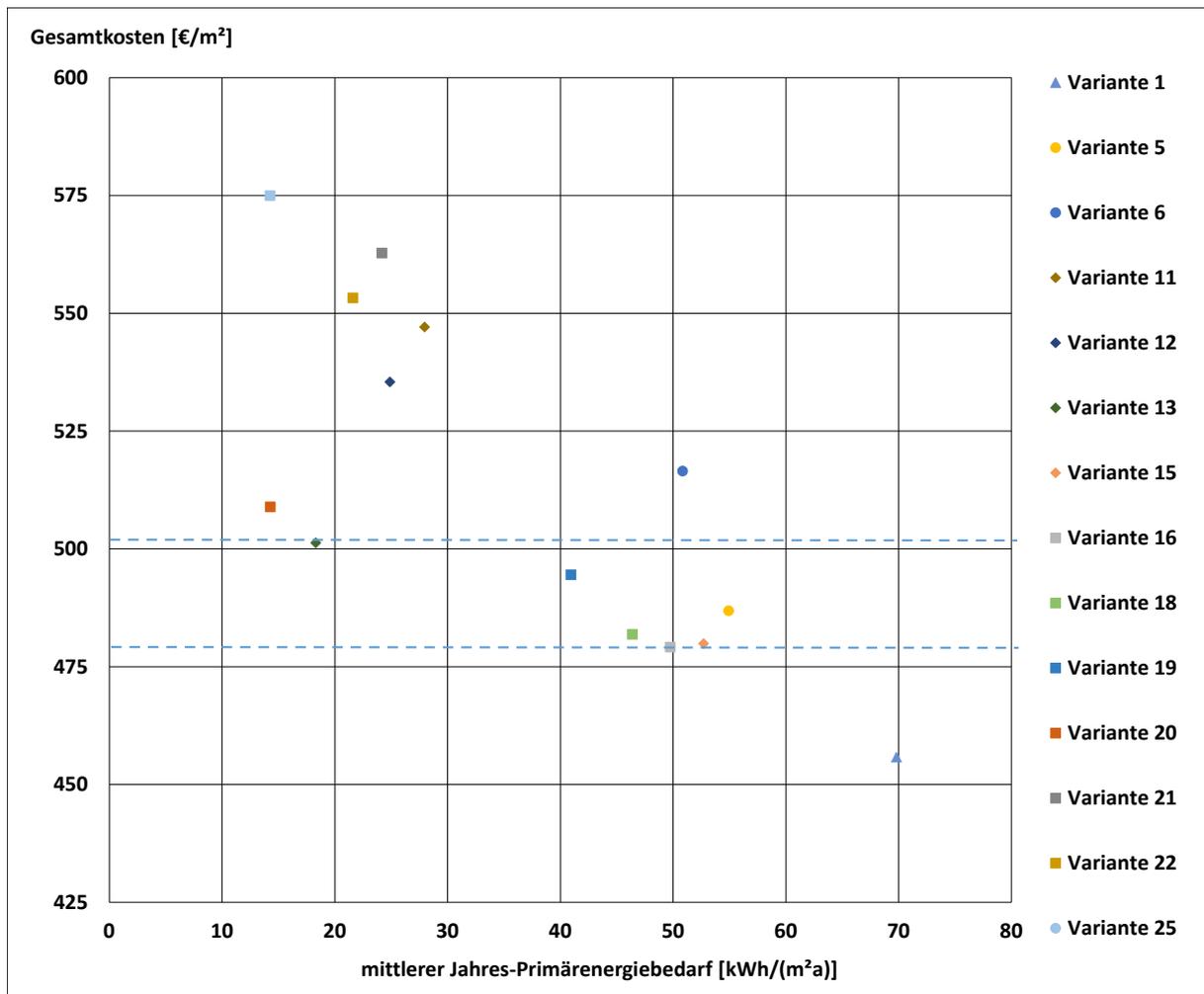


Abbildung 21 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus. Der kostenoptimale Bereich (2 %) ist durch die gestrichelten Linien begrenzt. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Tabelle 14 Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf und Gesamtkosten für energetische Maßnahmen für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus

Variante	Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m²a]	Gesamtkosten [€/m²]
Variante 1	70	456
Variante 5	55	487
Variante 6	51	517
Variante 11	28	547
Variante 12	25	535
Variante 13	18	501
Variante 15	53	480
Variante 16	50	479
Variante 18	46	482

Variante 19	41	494
Variante 20	14	509
Variante 21	24	563
Variante 22	22	553
Variante 25	14	575

### 3.4.2 Sensitivitätsanalyse

Bevor Schlussfolgerungen aus der Kostenoptimalitätsberechnung abgeleitet werden, wird zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Entsprechend den Europäischen Vorgaben werden sowohl die Energiepreisentwicklung der Energieträger, die Inflationsrate als auch der Kalkulationszinssatz variiert (siehe Kap. 2.6). Für die geänderte Energiepreisentwicklung und Inflationsrate liegen dieselben Grundkosten wie oben beschrieben zugrunde.

Energiepreisentwicklung: Für die Energiepreisentwicklung wurden im Vergleich zu Tabelle 3 deutlich höhere Werte angenommen, siehe Tabelle 9.

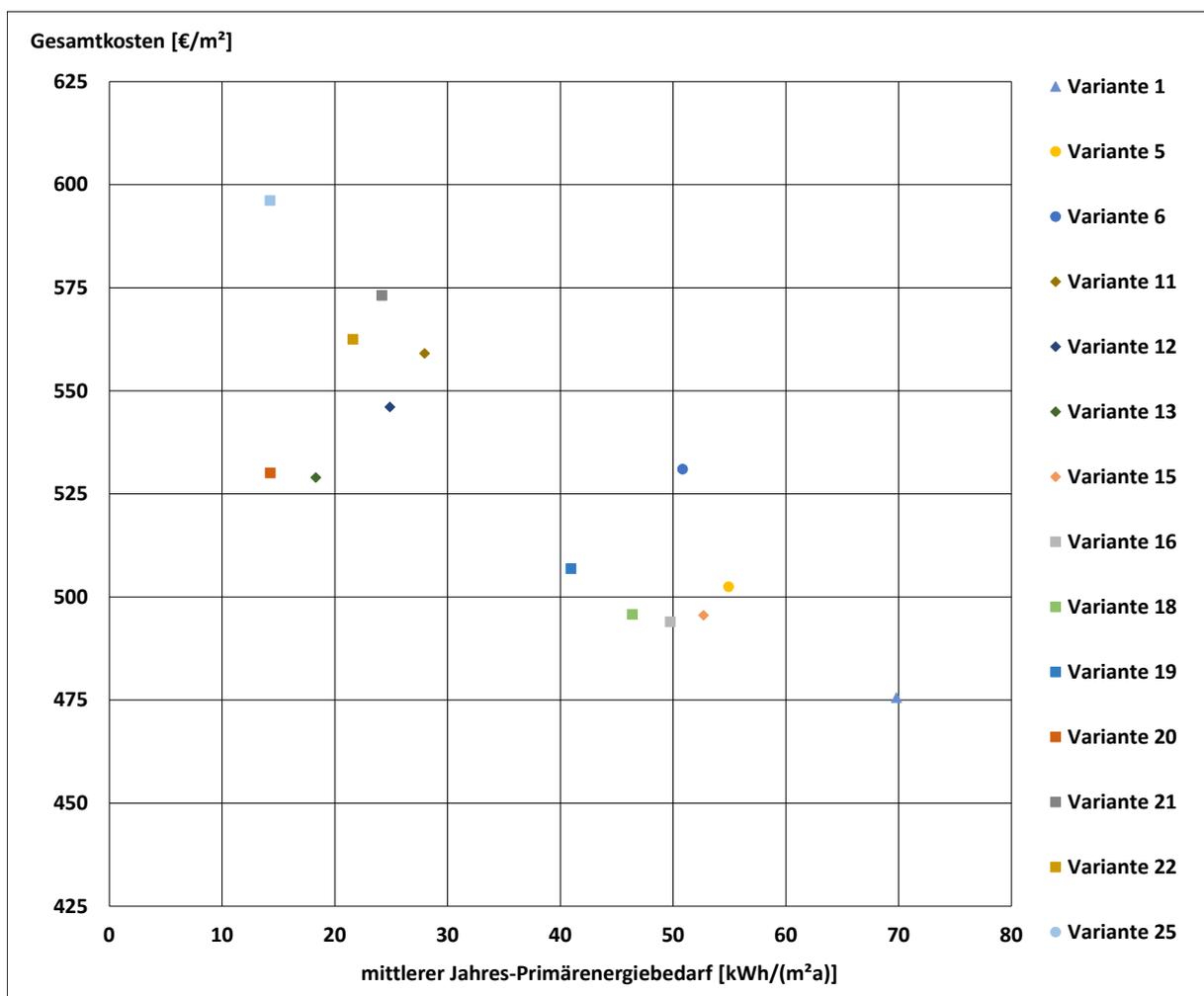


Abbildung 22 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus: hohe Energiepreisentwicklung. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Inflationsrate: Für die Inflationsrate wurde anstelle der ursprünglich angenommenen 2,5 % eine niedrigere Rate von 0,5 % angenommen.

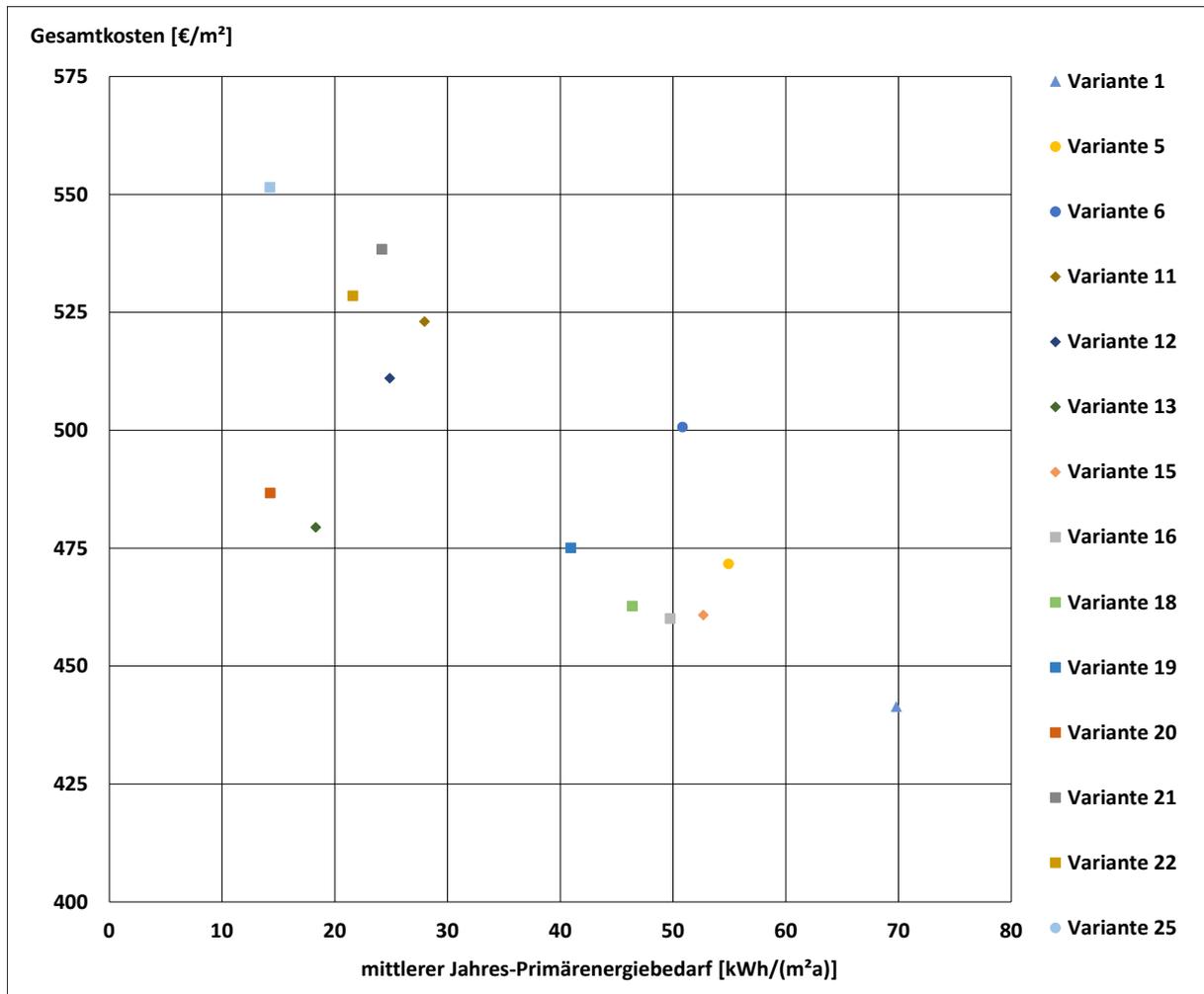


Abbildung 23 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus: niedrige Inflationsrate. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Kalkulationszinssatz: Für den Kalkulationszinssatz wurde anstelle des ursprünglich angenommenen Wertes von 3,0 % ein niedrigerer Zinssatz von 1,0 % angenommen.

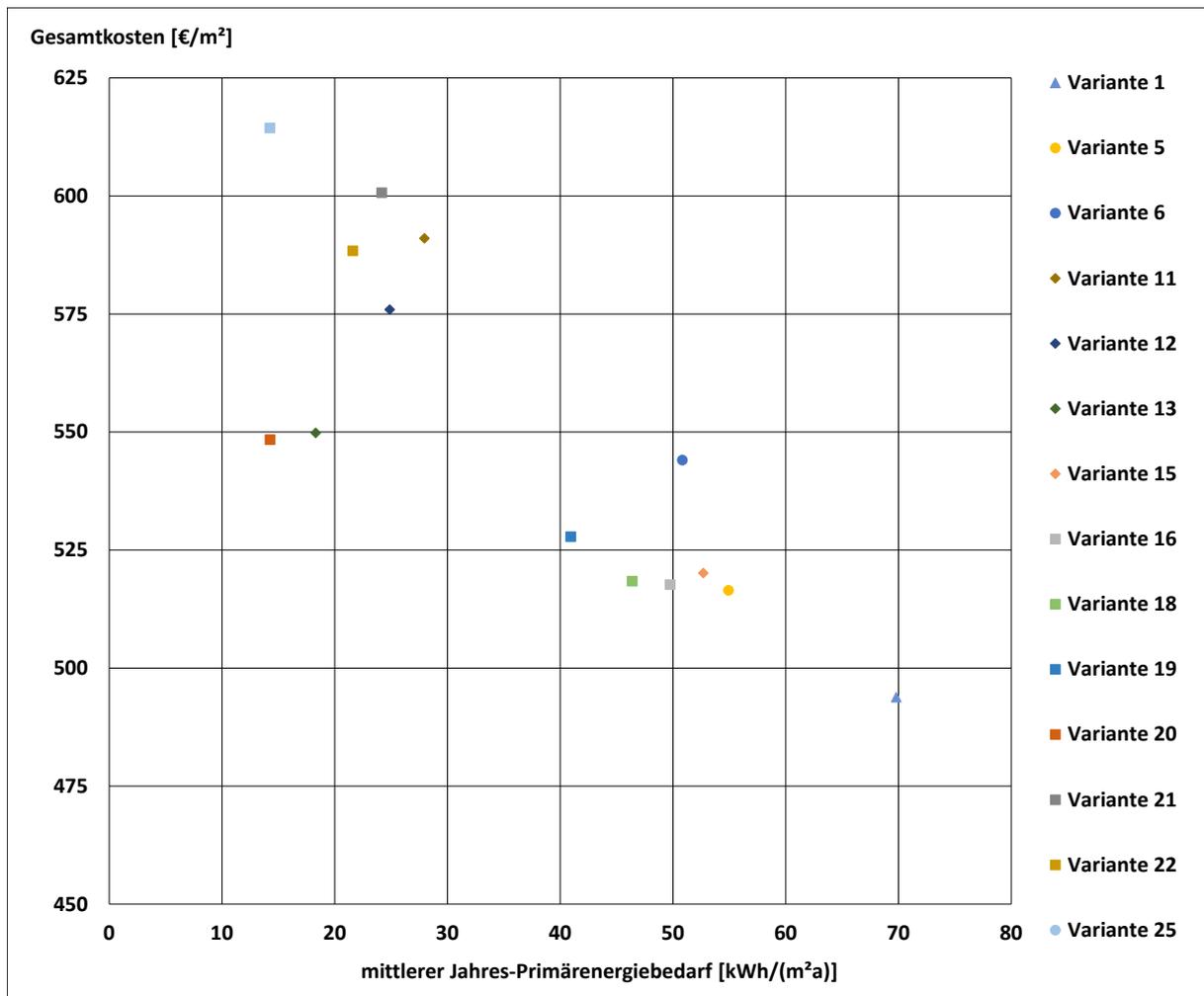


Abbildung 24 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus: niedriger Kalkulationszinssatz. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Wie in Abbildung 22 - Abbildung 24 zu erkennen ist, lässt die Sensitivitätsanalyse folgende Schlussfolgerungen zu:

- Es ergeben sich quantitative Änderungen bzgl. des mittleren Jahres-Primärenergiebedarf und der Gesamtkosten der untersuchten Varianten.
- Bzgl. der Anordnung der Varianten hinsichtlich ihres mittleren Jahresprimärenergiebedarfs und der zugehörigen Gesamtkosten entstehen durch die geänderten Annahmen leichte Verschiebungen.
- Die Gruppe der 5 kostenoptimalen Varianten, die Varianten 5, 15, 16, 18 und 19, ändert sich im Rahmen der Sensitivitätsanalyse nicht.

Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse somit, dass die vorgestellten Ergebnisse robust gegen eine Variation der Ausgangsannahmen sind. Es handelt sich also um eine Vielzahl von Möglichkeiten als kostenoptimale Variante für das Modellgebäude Mehrfamilienhaus, entweder eine stark verbesserte Gebäudehülle (5), verbesserte TGA (15) oder eine Kombination aus moderat verbesserter Gebäudehülle und verbesserter TGA (16, 18, 19).

### 3.5 Betrachtete Varianten Büro (Modellgebäude 4)

Tabelle 15 listet die in diesem Projekt betrachteten Varianten für das Modellgebäude Büro auf. Die Varianten sind in Anhang B genauer erläutert.

Variante
Variante 1: Referenzgebäude entsprechend EnEV 2014
Variante 2: U-Werte Gebäudehülle 10 % verbessert
Variante 3: U-Werte Gebäudehülle 20 % verbessert
Variante 4: U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert
Variante 5: U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert
Variante 6: U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert
Variante 7: verbesserte Wärmebrücken
Variante 8: Gas-Brennwertkessel
Variante 10: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel
Variante 11: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel
Variante 12: Holzpelletkessel
Variante 13: verbesserte Rückwärmezahl
Variante 14: verbesserter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung
Variante 15: Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert
Variante 16: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert
Variante 17: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert
Variante 19: Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken
Variante 20: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken
Variante 21: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken
Variante 22: Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert
Variante 23: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert
Variante 24: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert
Variante 25: Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + verbesserter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung + U-Werte Gebäudehülle 45 % verbessert

Variante 26: verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

### 3.6 Modellgebäude 4: Büro

#### 3.6.1 Kostenoptimalitätsberechnung

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der Berechnung der Gesamtkosten in Abhängigkeit von mittleren Jahres-Primärenergiebedarf für alle Varianten des Modellgebäudes Büro dargestellt. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet. Als Ausgangsvariante ist Variante 1, das Referenzgebäude nach EnEV 2014, dargestellt. Wie bereits oben ausgeführt erfüllt Variante 1 die verschärften Anforderungen nach EnEV 2016 nicht und darf deshalb bei der Festlegung des kostenoptimalen Bereichs nicht berücksichtigt werden. Ansonsten sind nur Varianten gezeigt, welche die EnEV 2016 erfüllen. In Tabelle 16 sind die Werte für die Gesamtkosten und den mittleren Jahres-Primärenergiebedarf aufgelistet.

Variante 26 (verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken) ist die Variante mit den geringsten Kosten, gefolgt von Variante 15 (Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert) Variante 12 (Holzpelletkessel), Variante 19 (Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken) und Variante 22 (Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert).

Die energieeffizienteste Variante 25 (Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + verbesserter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung + U-Werte Gebäudehülle 45 % verbessert) ist zugleich auch die teuerste.

Für das Modellgebäude Büro liegen die Grundkosten bei 870,66 €. Diese Grundkosten ergeben sich durch die Investitionskosten für die Neuerrichtung eines Gebäudes (1807,17 Euro/m<sup>2</sup>) [44] abzüglich der Erstellungskosten Hülle (322 Euro/m<sup>2</sup>) sowie Erstinstallation der TGA (181 Euro/m<sup>2</sup>) zu 1304,17 €. Da für diese Grundkosten eine Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt wird und der Betrachtungszeitraum 30 Jahre beträgt, muss die Abzinsung und der Restwert berücksichtigt werden und man erhält für die Grundkosten den Wert von 870,66 €. Damit wird die 2 % Abweichung von der kostenoptimalen Variante folgendermaßen festgelegt:  $(870,66 \text{ € /m}^2 + 744 \text{ €/m}^2) \cdot 0,02 = 32,29 \text{ €}$ . In Abbildung 13 ist also der kostenoptimale Bereich  $744 \text{ €/m}^2 + 32,29 \text{ €/m}^2 = 776,29 \text{ €/m}^2$ . Dieser Bereich ist durch die beiden gestrichelten Linien eingegrenzt. Damit kämen neben Variante 26 auch die Varianten 15, 12 und 19 als kostenoptimale Variante in Frage, also entweder eine Verbesserung der TGA oder eine Kombination verbesserter TGA und verbesserter Gebäudehülle, ggf. mit zusätzlich verbesserter Ausführung. Alle anderen Varianten erfüllen die Vorgaben nicht.

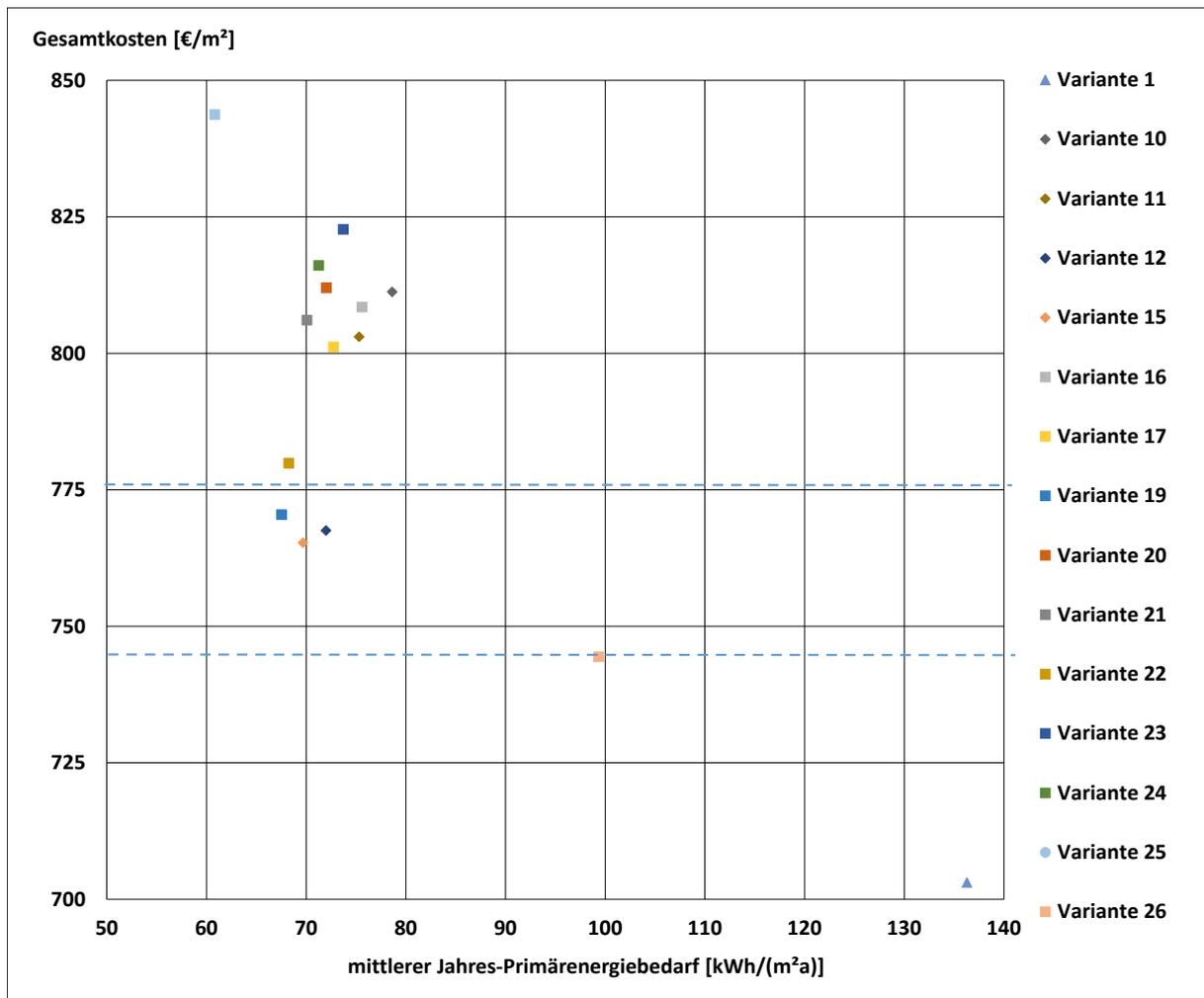


Abbildung 25 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Büro. Der kostenoptimale Bereich (2 %) ist durch die gestrichelten Linien begrenzt. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Tabelle 16 Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf und Gesamtkosten für energetische Maßnahmen für das Modellgebäude Büro

Variante	Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m²a]	Gesamtkosten [€/m²]
Variante 1	136	703
Variante 10	79	811
Variante 11	75	803
Variante 12	72	768
Variante 15	70	765
Variante 16	76	808
Variante 17	73	801
Variante 19	68	770
Variante 20	72	812

Variante 21	70	806
Variante 22	68	780
Variante 23	74	823
Variante 24	71	816
Variante 25	61	844
Variante 26	99	744

### 3.6.2 Sensitivitätsanalyse

Bevor Schlussfolgerungen aus der Kostenoptimalitätsberechnung abgeleitet werden, wird zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Entsprechend den Europäischen Vorgaben werden sowohl die Energiepreisentwicklung der Energieträger, die Inflationsrate als auch der Kalkulationszinssatz variiert (siehe Kap. 2.6). Für die geänderte Energiepreisentwicklung und Inflationsrate liegen dieselben Grundkosten wie oben beschrieben zugrunde.

Energiepreisentwicklung: Für die Energiepreisentwicklung wurden im Vergleich zu Tabelle 3 deutlich höhere Werte angenommen, siehe Tabelle 9.

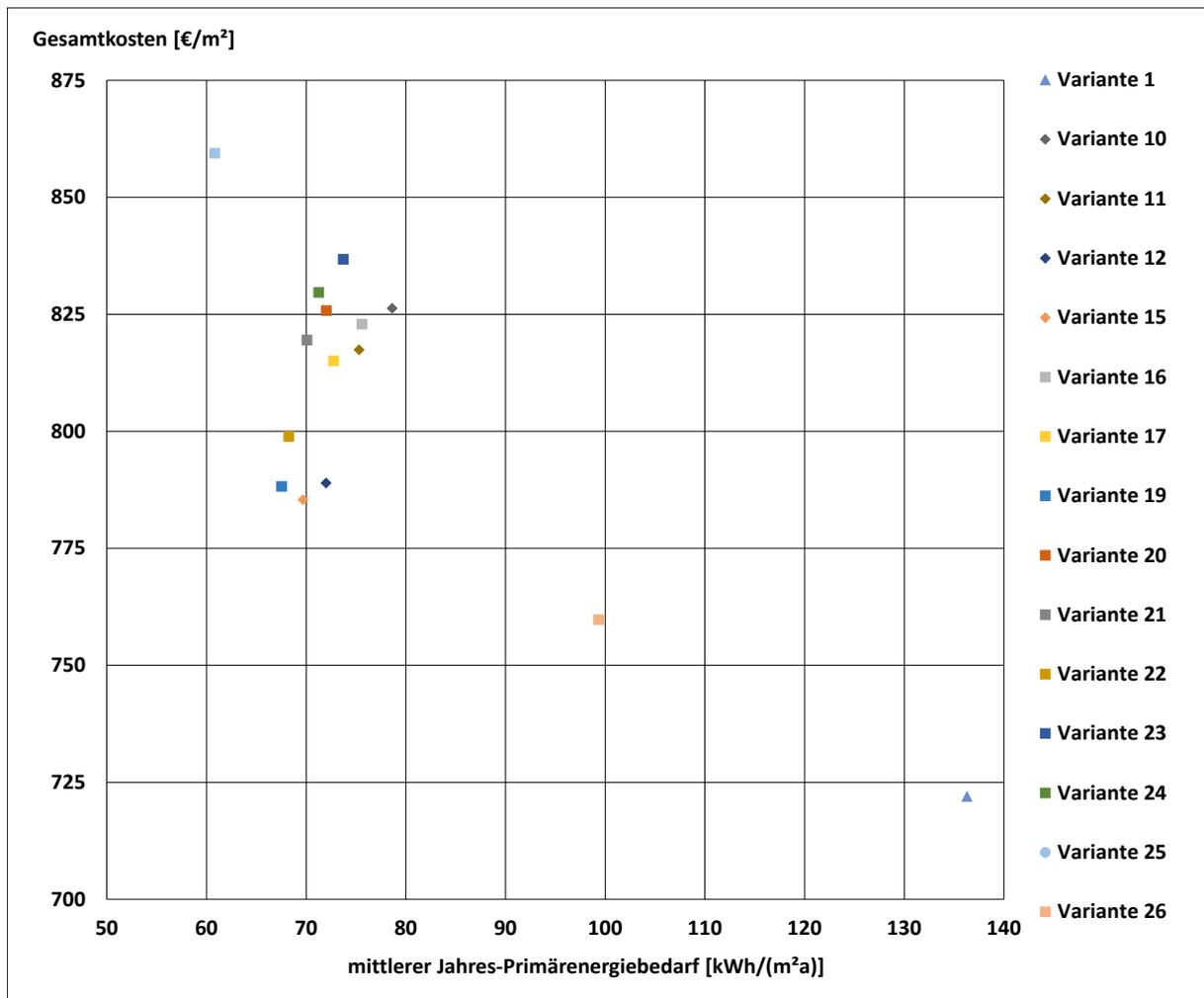


Abbildung 26 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Büro: hohe Energiepreisentwicklung. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Inflationsrate: Für die Inflationsrate wurde anstelle der ursprünglich angenommenen 2,5 % eine niedrigere Rate von 0,5 % angenommen.

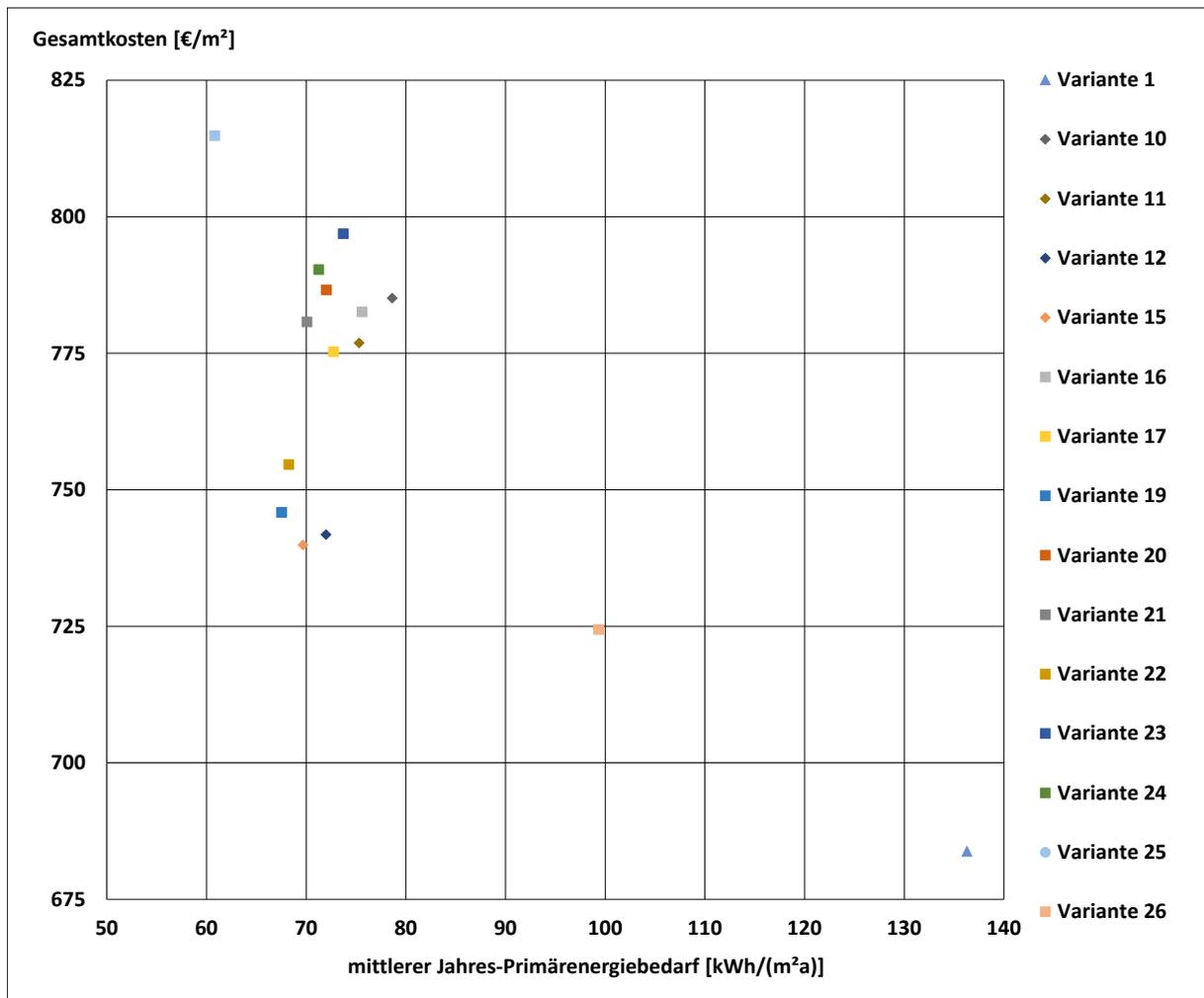


Abbildung 27 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Büro: niedrige Inflationsrate. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Kalkulationszinssatz: Für den Kalkulationszinssatz wurde anstelle des ursprünglich angenommenen Wertes von 3,0 % ein niedrigerer Zinssatz von 1,0 % angenommen.

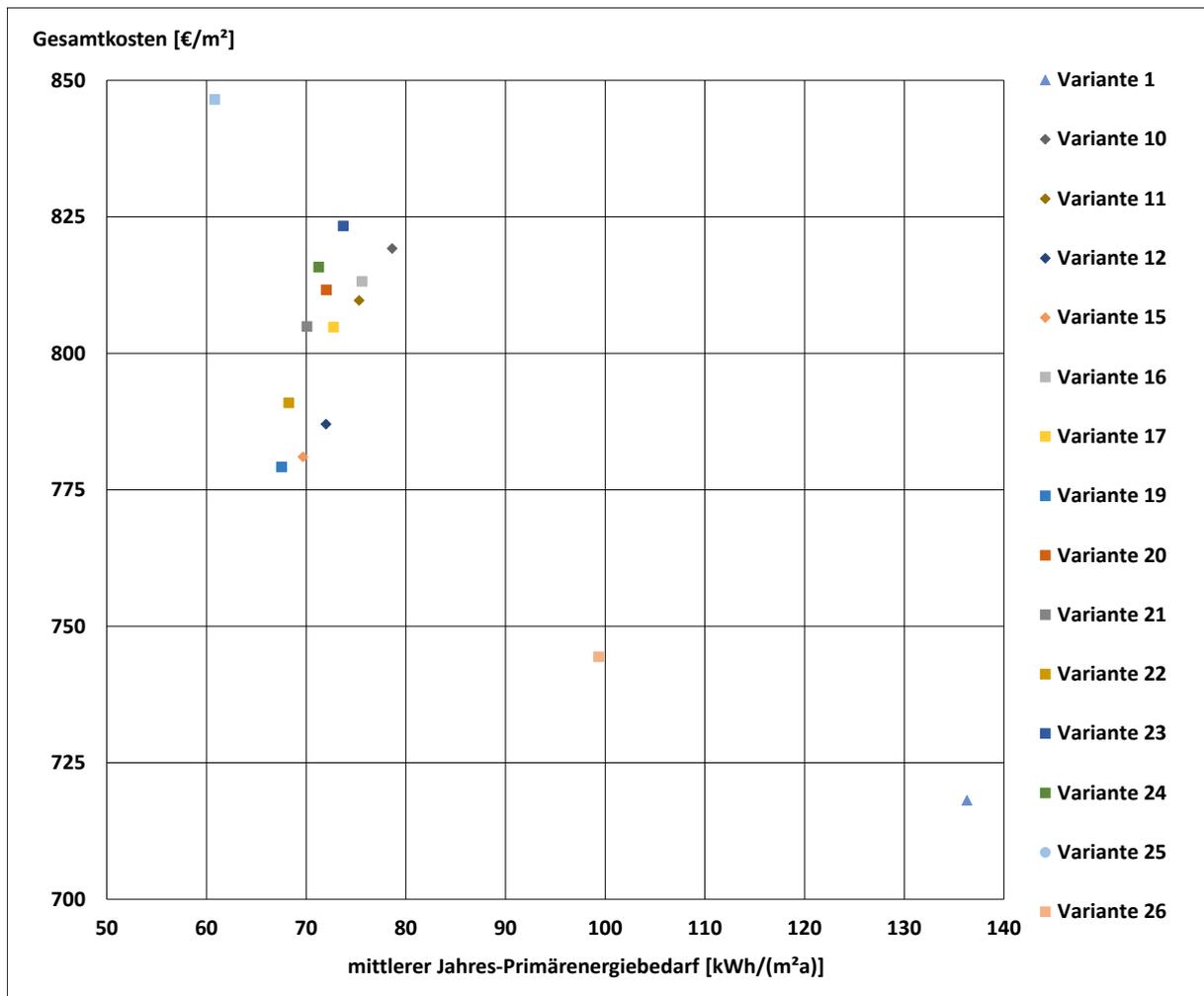


Abbildung 28 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Büro: niedriger Kalkulationszinssatz. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Aus der Sensitivitätsanalyse (siehe Abbildung 26 - Abbildung 28) können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es ergeben sich quantitative Änderungen bzgl. des mittleren Jahres-Primärenergiebedarf und der Gesamtkosten der untersuchten Varianten.
- Bzgl. der Anordnung der Varianten hinsichtlich ihres mittleren Jahresprimärenergiebedarfs und der zugehörigen Gesamtkosten entstehen durch die geänderten Annahmen leichte Verschiebungen.
- Die Gruppe der 4 kostenoptimalen Varianten, die Varianten 12, 15, 19 und 26, ändert sich im Rahmen der Sensitivitätsanalyse nicht.

Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse somit, dass die vorgestellten Ergebnisse robust gegen eine Variation der Ausgangsannahmen sind. Daher können die Varianten 12, 15, 19 und 26 als kostenoptimale Varianten für das Modellgebäude Büro angesehen werden. Die kostenoptimale Variante weist also entweder eine Verbesserung der TGA (12) oder eine Kombination verbesserter TGA und verbesserter Gebäudehülle (15), ggf. mit zusätzlich verbesserter Ausführung (19, 26) auf.

### 3.7 Betrachtete Varianten Hotel (Modellgebäude 5)

Tabelle 17 listet die in diesem Projekt betrachteten Varianten für das Modellgebäude Hotel auf. Die Varianten sind in Anhang B genauer erläutert.

Variante
Variante 1: Referenzgebäude entsprechend EnEV 2014
Variante 2: U-Werte Gebäudehülle 10 % verbessert
Variante 3: U-Werte Gebäudehülle 20 % verbessert
Variante 4: U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert
Variante 5: U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert
Variante 6: U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert
Variante 7: verbesserte Wärmebrücken
Variante 8: Gas-Brennwertkessel
Variante 9: Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung
Variante 10: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel
Variante 11: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel
Variante 12: Holzpelletkessel
Variante 13: verbesserte Rückwärmezahl
Variante 14: verbesserter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung
Variante 15: Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert
Variante 16: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert
Variante 17: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert
Variante 18: Brennwertkessel + Solar (für Warmwasser) + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken
Variante 19: Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken
Variante 20: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken
Variante 21: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken
Variante 22: Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert
Variante 23: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert
Variante 24: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

Variante 25: Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + verbesserter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung + U-Werte Gebäudehülle 45 % verbessert

Variante 26: Brennwertkessel + Solar (für Heizung und Warmwasser) + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

### 3.8 Modellgebäude 5: Hotel klein

#### 3.8.1 Kostenoptimalitätsberechnung

In Abbildung 29 sind die Ergebnisse der Berechnung der Gesamtkosten in Abhängigkeit von mittleren Jahres-Primärenergiebedarf für alle Varianten des Modellgebäudes Hotel dargestellt. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet. Als Ausgangsvariante ist Variante 1, das Referenzgebäude nach EnEV 2014, dargestellt. Wie bereits oben ausgeführt erfüllt Variante 1 die verschärften Anforderungen nach EnEV 2016 nicht und darf deshalb bei der Festlegung des kostenoptimalen Bereichs nicht berücksichtigt werden. Ansonsten sind nur Varianten gezeigt, welche die EnEV 2016 erfüllen. In Tabelle 18 sind die Werte für die Gesamtkosten und den mittleren Jahres-Primärenergiebedarf aufgelistet.

Variante 26 (Brennwertkessel + Solar (für Heizung und Warmwasser) + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken) ist die Variante mit den geringsten Kosten, gefolgt von Variante 12 (Holzpelletkessel), Variante 15 (Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert), Variante 22 (Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert) und Variante 19 (Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken).

Für das Modellgebäude Hotel liegen die Grundkosten bei 1338 €. Diese Grundkosten ergeben sich durch die Investitionskosten für die Neuerrichtung eines Gebäudes (2440,19 Euro/m<sup>2</sup>) [44] abzüglich der Erstellungskosten Hülle (207 Euro/m<sup>2</sup>) sowie Erstinstallation der TGA (229 Euro/m<sup>2</sup>) zu 2004,19 €. Da für diese Grundkosten eine Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt wird und der Betrachtungszeitraum 30 Jahre beträgt, muss die Abzinsung und der Restwert berücksichtigt werden und man erhält für die Grundkosten den Wert von 1338 €. Damit wird die 2 % Abweichung von der kostenoptimalen Variante folgendermaßen festgelegt:  $(1338 \text{ € /m}^2 + 765 \text{ € /m}^2) \cdot 0,02 = 42,60 \text{ €}$ . In Abbildung 13 ist also der kostenoptimale Bereich  $765 \text{ € /m}^2 + 42,60 \text{ € /m}^2 = 807,06 \text{ € /m}^2$ . Dieser Bereich ist durch die beiden gestrichelten Linien eingegrenzt. Damit kommt für dieses Modellgebäude nur die Variante 26, mit verbesserter TGA und Ausführung sowie einer deutlichen Verbesserung der Gebäudehülle, als kostenoptimale Lösung in Frage. Die Varianten 12 und 15 liegen knapp außerhalb des kostenoptimalen Bereichs.

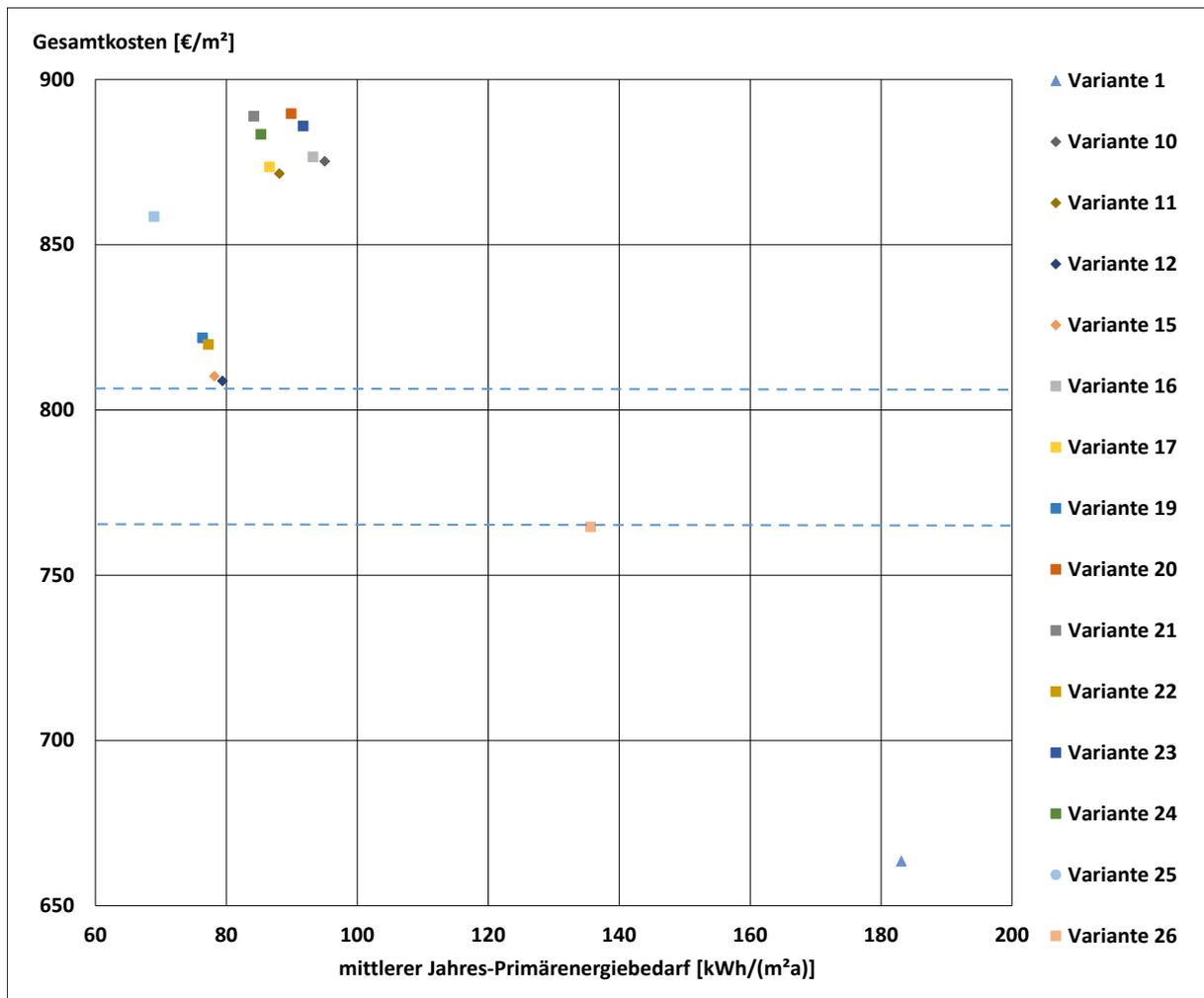


Abbildung 29 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Hotel. Der kostenoptimale Bereich (2 %) ist durch die gestrichelten Linien begrenzt. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Tabelle 18 Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf und Gesamtkosten für energetische Maßnahmen für das Modellgebäude Hotel

Variante	Mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/m²a]	Gesamtkosten [€/m²]
Variante 1	183	663
Variante 10	95	875
Variante 11	88	872
Variante 12	79	809
Variante 15	78	810
Variante 16	93	877
Variante 17	87	874
Variante 19	76	822
Variante 20	90	890
Variante 21	84	889
Variante 22	77	820
Variante 23	92	886
Variante 24	85	883
Variante 25	69	859

### 3.8.2 Sensitivitätsanalyse

Bevor Schlussfolgerungen aus der Kostenoptimalitätsberechnung abgeleitet werden, wird zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Entsprechend den Europäischen Vorgaben werden sowohl die Energiepreisentwicklung der Energieträger, die Inflationsrate als auch der Kalkulationszinssatz variiert (siehe Kap. 2.6). Für die geänderte Energiepreisentwicklung und Inflationsrate liegen dieselben Grundkosten wie oben beschrieben zugrunde.

Energiepreisentwicklung: Für die Energiepreisentwicklung wurden im Vergleich zu Tabelle 3 deutlich höhere Werte angenommen, siehe Tabelle 9.

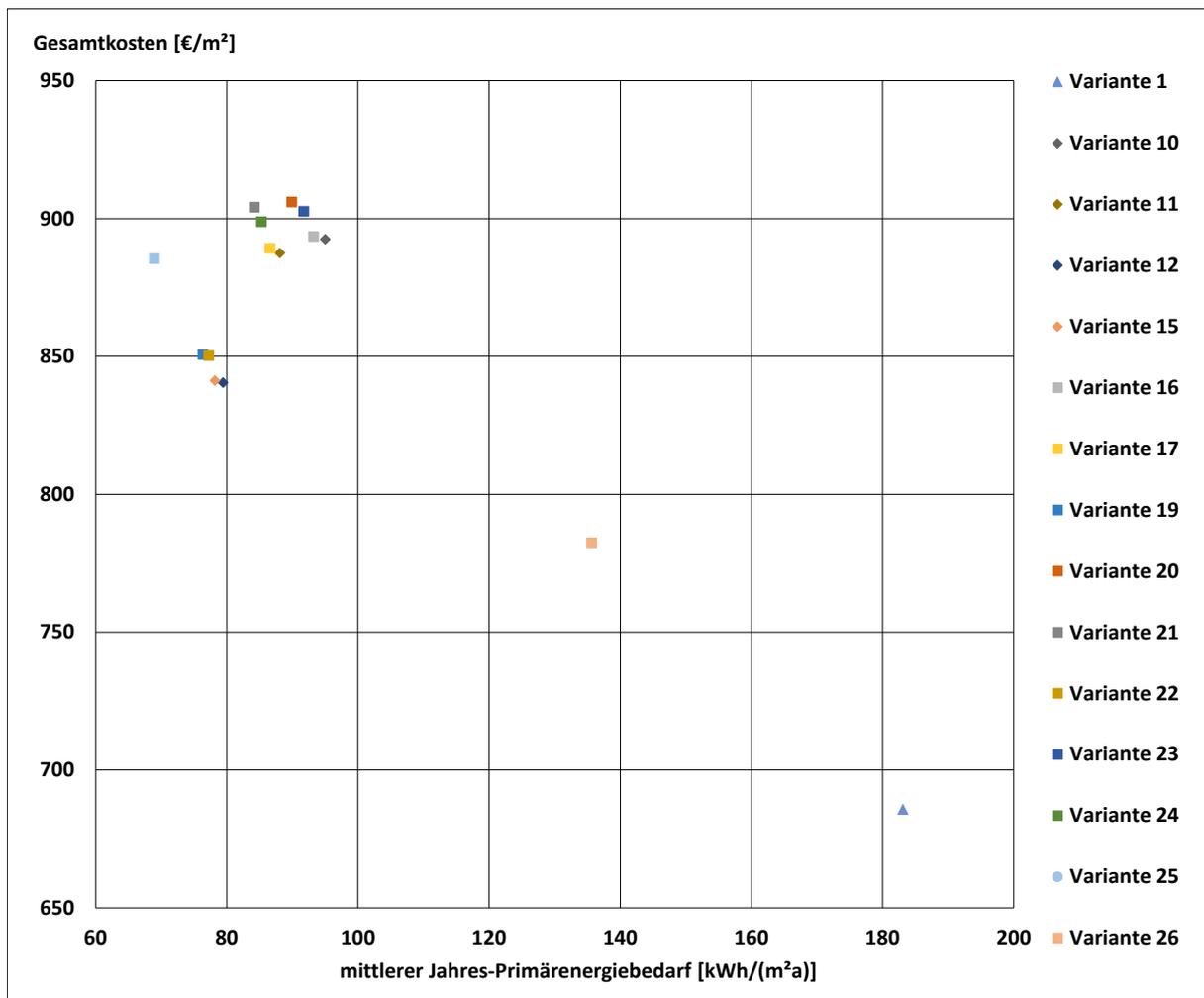


Abbildung 30 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Hotel: hohe Energiepreisentwicklung. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Inflationsrate: Für die Inflationsrate wurde anstelle der ursprünglich angenommenen 2,5 % eine niedrigere Rate von 0,5 % angenommen.

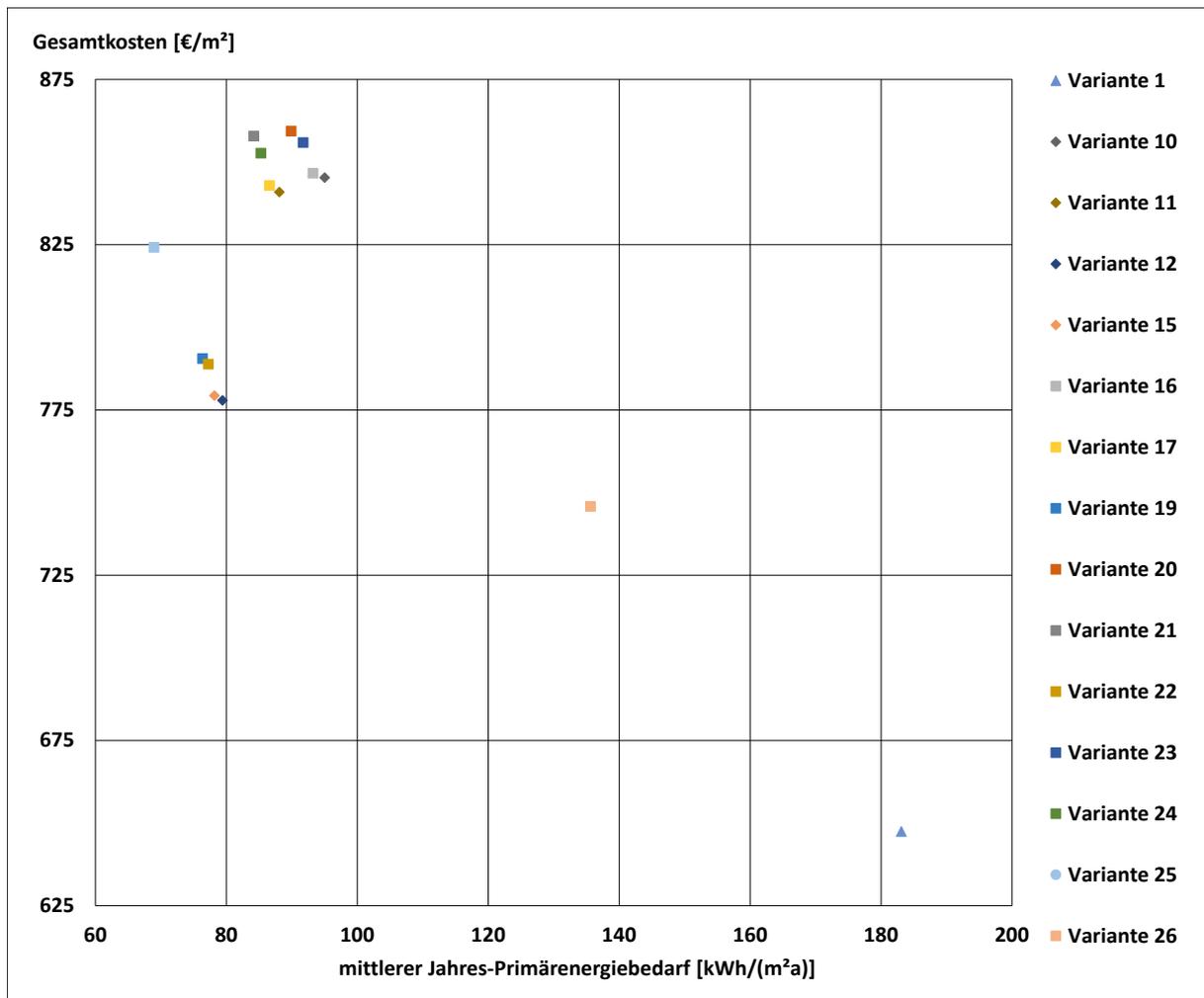


Abbildung 31 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Hotel: niedrige Inflationsrate. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Kalkulationszinssatz: Für den Kalkulationszinssatz wurde anstelle des ursprünglich angenommenen Wertes von 3,0 % ein niedrigerer Zinssatz von 1,0 % angenommen.

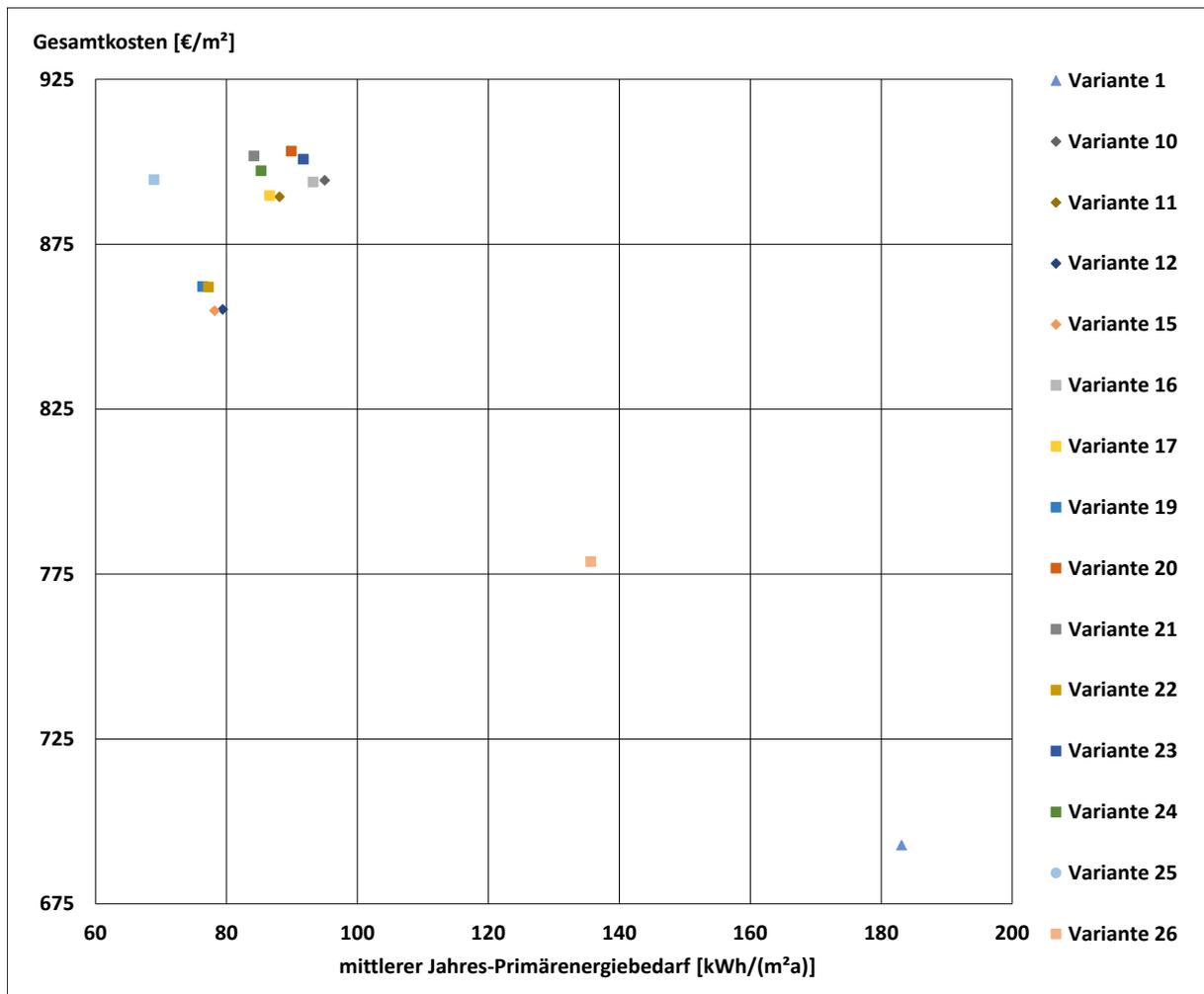


Abbildung 32 Kostenoptimalitätsberechnung für das Modellgebäude Hotel: niedriger Kalkulationszinssatz. Die Gesamtkosten werden entsprechend Gleichung (2) und Kap. 2.4 berechnet.

Aus der in Abbildung 30 - Abbildung 32 dargestellten Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es ergeben sich quantitative Änderungen bzgl. des mittleren Jahres-Primärenergiebedarf und der Gesamtkosten der untersuchten Varianten.
- Bzgl. der Anordnung der Varianten hinsichtlich ihres mittleren Jahresprimärenergiebedarfs und der zugehörigen Gesamtkosten entstehen durch die geänderten Annahmen leichte Verschiebungen.
- Die Variante 26 ist eindeutig die kostenoptimale Variante.

Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse somit, dass die vorgestellten Ergebnisse robust gegen eine Variation der Ausgangsannahmen sind. Daher kann nur Varianten 26 als kostenoptimale Variante für das Modellgebäude Hotel angesehen werden. Die kostenoptimale Variante weist also eine verbesserte TGA bei gleichzeitig deutlich verbesserter Gebäudehülle und verbesserter Ausführung auf.

### 3.9 Referenzgebäude Niedrigstenergiegebäudestandard

Für die verschärften Anforderungen nach EnEV 2016 gibt es keine entsprechenden Referenzgebäude. In einer zukünftigen Überarbeitung der EnEV wird empfohlen, Referenzgebäude entsprechend den dann geltenden Anforderungen neu festzulegen. Für die Anpassung der deutschen Vorgaben an den von der EU geforderten Niedrigstenergiegebäudestandard werden im Folgenden Vorschläge für entsprechende Referenzgebäude für die betrachteten Wohn- und Nichtwohngebäude gemacht.

### 3.9.1 Wohngebäude

Aus den Berechnungen in Kap. 3.2, 3.3 und 3.4 ergibt sich die Empfehlung, für Wohngebäude Variante 16 als zukünftiges Referenzgebäude zu verwenden. Während sich weitere Varianten im kostenoptimalen Spektrum befinden, ist für Variante 16 der zusätzliche Vorteil gegeben, dass eine hohe Akzeptanz durch Baupraktiker und Gesellschaft besteht.

Variante 16 hat im Vergleich zu dem Referenzgebäude nach EnEV 2014 eine verbesserte Gebäudehülle:

- U-Wert Bodenplatte bzw. Kellerdecke: 0,322 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- U-Wert Außenwände: 0,258 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- U-Wert Fenster: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- U-Wert Tür: 1,656 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- U-Wert Dach: 0,184 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- U-Wert Dachflächenfenster: 1,290 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- U-Wert oberste Geschossdecke: 0,184 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

Des Weiteren wurde bei dieser Variante eine Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad anstatt einer zentralen Abluftanlage, wie es beim Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 der Fall ist, angesetzt.

### 3.9.2 Nichtwohngebäude

Bei den beiden betrachteten Nichtwohngebäuden, Büro und Hotel, ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse. Für das Büro fallen 4 Varianten in den kostenoptimalen Bereich, beim Hotel ist nur Variante 26 kostenoptimal. Um für Büro und Hotel vergleichbare Varianten als Referenzgebäude zu erhalten, empfehlen wir, für beide jeweils Variante 26 als Referenzgebäude zu verwenden.

#### Büro

Variante 26 des Modellgebäudes Büro hat im Vergleich zum Referenzgebäude EnEV 2014 eine verbesserte Gebäudehülle, verbesserte Wärmebrücken und energieeffizientere Anlagentechnik, wie nachfolgend angegeben:

- U-Wert Bodenplatte: 0,210 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- U-Werte Außenwände: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- U-Wert Fenster: 0,780 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- U-Wert Vorhangfassade: 0,840 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- U-Wert Dach: 0,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- Rückwärmzahl von 0,75 anstatt 0,60
- mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

#### Hotel

Variante 26 des Modelgebäudes Hotel hat im Gegensatz zum Referenzgebäude EnEV 2014 einen Brennwertkessel, eine zusätzliche Solaranlage (für Heizung und Warmwasser), eine verbesserte Gebäudehülle und verbesserte Wärmebrücken, wie nachfolgend angegeben:

- U-Wert Bodenplatte: 0,175 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- U-Wert Außenwände: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- U-Wert Fenster: 0,650 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)

- g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- U-Wert Türen: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- U-Wert Dach: 0,100 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung anstatt nur zur Warmwasserunterstützung
- Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- zusätzlich Pufferspeicher
- Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

### 3.10 Berechnungsmethode / Gebäudesimulation

#### Berechnungsmethode

In diesem Projekt wurde der Jahres-Primärenergiebedarf der Modellgebäude mit Hilfe der Normenreihe DIN V 18599 [15] berechnet.

#### Gebäudesimulation

Um die Ergebnisse, die sich mit dem stationären Berechnungsverfahren nach DIN V 18599 ergeben, mit Berechnungen einer Gebäudesimulation zu vergleichen, wurde eine Analyse mit TRNSYS [61] durchgeführt. In der thermischen Gebäudesimulationssoftware TRNSYS [61] wurde für das Modellgebäude Einfamilienhaus klein zunächst das Referenzgebäude nach EnEV 2014 erstellt. Für dieses Modell wurde dann Varianten erstellt, welche für die Außenbauteile verbesserte U-Werte aufweisen, entsprechend der in Tabelle 10 gelisteten Varianten 2-6: verbesserte U-Werte um 10 %, 20 %, 30 %, 40 % und 50 %.

Zur Erstellung des Modells in TRNSYS wurden kleinere materialbezogene und geometrische Anpassungen vorgenommen. Des Weiteren wurden Annahmen zum inneren Ausbau des Modellgebäudes vorgenommen.

Der Vergleich der Berechnungen ist in Tabelle 19 zusammengefasst. Neben den Ergebnissen des jeweilig errechneten Jahres-Nutzenergiebedarfs für das Heizen wird auch die prozentuale Abweichung der TRNSYS-Ergebnisse von den ZUB Helena-Ergebnissen für jede Variante aufgezeigt. Man sieht, dass sich Unterschiede in den Ergebnissen von bis zu 30 % ergeben. Der Vergleich der prozentualen Veränderungen zeigt, dass es sich nicht um einen gleichbleibenden Versatz handelt, sondern mit steigender Verbesserung der Gebäudehülle die Differenzen zunehmen.

Da TRNSYS ein vielfach an echten Gebäuden validiertes Programm ist, wird angenommen, dass die sich aus der Gebäudesimulation ergebenden Werte die Realität recht gut abbilden. Dies wird als Hinweis darauf gewertet, dass es systematische Diskrepanzen zwischen EnEV-Berechnungen und Gebäudesimulationen bzw. dem realen Energiebedarf gibt. Eine detaillierte Untersuchung hierzu in einem gesonderten Forschungsprojekt wird als sehr sinnvoll angesehen.

Tabelle 19 Vergleich Berechnung des Jahres-Nutzenergiebedarfs nach DIN V 18599 und nach TRNSYS

Varianten	ZUB Helena: Jahres-Nutzenergiebedarf Heizen [kWh/m <sup>2</sup> a]	TRNSYS: Jahres-Nutzenergiebedarf Heizen [kWh/m <sup>2</sup> a]	Abweichung TRNSYS von ZUB Helena
Variante 1: Referenzgebäude entsprechend EnEV 2014	8495	8686	+ 2,2 %

Variante 2: U-Werte Gebäudehülle 10 % verbessert	7797	8200	+ 5,2 %
Variante 3: U-Werte Gebäudehülle 20 % verbessert	6897	7947	+ 15,2 %
Variante 4: U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert	6560	7550	+ 15,1 %
Variante 5: U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert	5775	7162	+ 24,0 %
Variante 6: U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert	5034	6542	+ 30,0 %

### 3.11 Bonussystem / Anrechnung aktiver und passiver Energieeinsparmaßnahmen

Es sind unterschiedliche Kriterien für ein Bonussystem zur Berücksichtigung von Energieeinsparmaßnahmen denkbar. Beispielsweise ist die Berücksichtigung einer optimierten Gebäudeausrichtung zur verbesserten Nutzung von solaren Gewinne ein Ansatz, der im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht wurde.

Die derzeit gültige EnEV 2016 mit der zugehörigen Berechnungsnormenreihe DIN V 18599 [15] sieht vor, dass für alle Bauteile der wärmeübertragenden Umfassungsflächen die Himmelsrichtungen zu berücksichtigen sind. Weiterhin sind für die Außenbauteile der Grad der Verschattung zu definieren. Auf die Hauptanforderungen der EnEV 2016 – Jahres-Primärenergiebedarf und spezifischer Transmissionswärmeverlust (Wohngebäude) bzw. mittlere Wärmedurchgangskoeffizienten (Nichtwohngebäude) – haben die beiden Größen jedoch keinen Einfluss, da bei der Ermittlung der einzuhaltenden Grenzwerte für ein Referenzgebäude die gleichen Annahmen zu berücksichtigen sind im Vergleich zum zugehörigen nachzuweisenden Gebäude.

Zur Beurteilung der Zweckmäßigkeit eines Bonussystems zur Berücksichtigung aktiver und passiver Energieeinsparmaßnahmen wurde das Modellgebäude „Mehrfamilienhaus groß mit 40 Wohneinheiten“ entsprechend Abbildung 7 herangezogen. Wie bereits im Kapitel 2.1 beschrieben, wird dieses Wohngebäude hinsichtlich des zukünftig zu erwartenden Neubaubestandes in Deutschland als ausreichend repräsentativ angesehen.

Im angesetzten Ausgangszustand weist das Gebäude nach Norden 6 m<sup>2</sup>, nach Osten 240 m<sup>2</sup>, nach Süden 6 m<sup>2</sup> und nach Westen 270 m<sup>2</sup> Fensterfläche auf. Bei einem berücksichtigten typischen Verschattungsfaktor  $F_s$  von 0,9 beträgt der gemäß Normenreihe DIN V 18599 berechnete mittlere Jahres-Primärenergiebedarf 49,7 kWh/(m<sup>2</sup>a), sofern das Mehrfamilienhaus entsprechend der empfohlenen zukünftigen Referenzgebäudevariante 16 ausgeführt wird. Setzt man stattdessen an, dass das Gebäude um 90° in Richtung Osten gedreht wird, ergibt sich ein mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf von 48,6 kWh/(m<sup>2</sup>a). Aus einer Drehung um 180° resultiert ein mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf von 49,7 kWh/(m<sup>2</sup>a). Würde das Mehrfamilienhaus um 270° gedreht gebaut werden, ergibt sich ein mittlerer Jahres-Primärenergiebedarf von 48,1 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die maximale Abweichung des mittleren Jahres-Primärenergiebedarfs zwischen energetisch sinnvollster und suboptimalster Gebäudeausrichtung beträgt 1,6 kWh/(m<sup>2</sup>a). Das entspricht einem Unterschied von 3,2 %.

Am Beispiel des untersuchten Modellgebäudes lässt sich weiterhin nachweisen, dass die Verschattung der Bauteile einen geringen Einfluss auf den rechnerisch ermittelten Jahres-Primärenergiebedarfs hat. Wird mit Hilfe der Normenreihe DIN V 18599 angesetzt, dass das gesamte Gebäude nicht verschattet wird, sinkt der mittlere Jahres-Primärenergiebedarf von ursprünglich 49,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf 49,0 kWh/(m<sup>2</sup>a), was einer Veränderung um 1,4 % entspricht.

Auf Basis der vorgestellten Berechnungsergebnisse wird es als nicht sinnvoll erachtet, mit der zukünftigen Einführung eines nationalen Niedrigstenergiegebäudestandards auch ein Bonussystem zur Berücksichtigung der optimalen Gebäudeausrichtung einzuführen. Der energetische Vorteil ist als gering einzustufen, währenddessen Planer sich mit erheblichem Mehraufwand bei der energetischen Bewertung von Gebäuden auseinandersetzen müssten.

Eine andere Größe, welche gegebenenfalls in ein Bonussystem einfließen könnte, ist die Wärmespeicherfähigkeit der Konstruktion. Dieser Einfluss wird derzeit in dem vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projekt „Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente“ untersucht.

### **3.12 Energieausweis**

Vorgaben zu Ausweisen über die Gesamtenergieeffizienz sind in der Europäischen Gebäuderichtlinie [2] im Artikel 11 geregelt. Zum einen wird gefordert, dass „[der] Ausweis über die Gesamtenergieeffizienz [...] die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Referenzwerte wie Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz enthalten [muss], um den Eigentümern oder Mietern von Gebäuden oder Gebäudeteilen einen Vergleich und eine Beurteilung ihrer Gesamtenergieeffizienz zu ermöglichen“ [2]. Diese Vorgabe wird durch die Deutschen Energieausweise entsprechend EnEV 2016 umgesetzt.

Zum anderen „[muss der] Ausweis über die Gesamtenergieeffizienz [...] Empfehlungen für die kostenoptimale oder kosteneffiziente Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes oder Gebäudeteils enthalten, es sei denn, es gibt kein vernünftiges Potential für derartige Verbesserungen gegenüber den geltenden Anforderungen an die Gesamtenergieeffizienz“ [2]. Diese Forderung wird ebenfalls durch die Deutschen Energieausweise entsprechend EnEV 2016 erfüllt.

Des Weiteren soll der „Ausweis über die Gesamtenergieeffizienz [...] einen Hinweis darauf [enthalten], wo der Eigentümer oder der Mieter genauere Angaben, auch zu der Kosteneffizienz der in dem Ausweis über die Gesamtenergieeffizienz enthaltenen Empfehlungen, erhalten kann. [...] Zudem enthält der Ausweis Informationen über die zur Umsetzung der Empfehlungen zu unternehmenden Schritte [2]. Auch diese Vorgabe wird durch die Deutschen Energieausweise entsprechend EnEV 2016 umgesetzt.

In den Vorbemerkungen zur Europäischen Gebäuderichtlinie sind weitere Empfehlungen zu Energieausweisen enthalten. „Der Ausweis über die Gesamtenergieeffizienz sollte potenziellen Käufern und Mietern von Gebäuden oder Gebäudeteilen zutreffende Informationen über die Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes sowie praktische Hinweise zu deren Verbesserung liefern“ [2]. Diese Vorgabe wird durch die Deutschen Energieausweise entsprechend EnEV 2016 erfüllt.

„Zudem sollte der Ausweis über die Gesamtenergieeffizienz Angaben darüber enthalten, wie sich Heizung und Kühlung auf den Energiebedarf des Gebäudes sowie auf dessen Primärenergieverbrauch und dessen Kohlendioxidemissionen auswirken [2]. Diese Vorgaben werden durch die Deutschen Energieausweise entsprechend EnEV 2016 aktuell nicht umgesetzt und könnte in eine Überarbeitung des Energieausweises mit einfließen.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Energiebedarf von Gebäuden, der für Heizen und Kühlen benötigt wird, beträgt ca. 30% des gesamten Energiebedarfs Deutschlands. In Deutschland und Europa ist es erklärtes Ziel von Politik und Gesellschaft, hier zu einer namhaften Reduktion zu gelangen.

Ein wesentlicher regulativer Schritt auf diesem Weg stellt die EU-Richtlinie 2010/31/EU dar. Die Richtlinie wurde vom Europäischen Parlament und vom Europäischen Rat am 19. Mai 2010 erlassen mit dem Ziel, die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in der Europäischen Union unter Berücksichtigung der jeweiligen äußeren klimatischen und lokalen Bedingungen sowie der Anforderungen an das Innenraumklima und der Kosteneffizienz zu verbessern.

Die EU-Richtlinie fordert unter anderem die Mitgliedstaaten der Europäischen Union dazu auf, einen nationalen Niedrigstenergiegebäudestandard zu definieren und ab 01.01.2019 für öffentliche Neubauten bzw. ab 01.01.2021 für alle sonstigen Neubauten umzusetzen. Im Verordnungstext wird ein Niedrigstenergiegebäude (nearly zero energy building) definiert als ein Gebäude, das eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz aufweist und damit einen fast bei null liegenden oder sehr geringen Energiebedarf besitzt. Dieser verbleibende Energiebedarf soll zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden.

Diese Anforderung wird durch eine weitere Bedingung, eine Kostenoptimalitätsbedingung, relativiert. Diese besagt, dass ein Mitgliedsstaat nicht verpflichtet ist, Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz festzulegen, die über die geschätzte wirtschaftliche Lebensdauer nicht kosteneffizient sind.

Die Grundzüge für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden sind in der Delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 festgehalten.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden für Wohn- und Nichtwohngebäude unterschiedliche Varianten der Gebäudeeffizienz sowohl hinsichtlich ihres mittleren Jahres-Primärenergiebedarfs als auch bzgl. der Gesamtkosten über die Lebensdauer der Gebäude untersucht. Hierfür wurden drei verschiedene Wohngebäudetypen, ein Einfamilienhaus, eine Doppelhaushälfte und ein Mehrfamilienhaus, sowie zwei unterschiedliche Nichtwohngebäude, ein Bürogebäude und ein Hotel, betrachtet.

Es wurden 26 verschiedene Varianten zur Gebäudeeffizienz untersucht, die sich sowohl in der Dämmqualität der Gebäudehülle als auch Art und Energieeffizienz der Anlagentechnik unterscheiden. Der Einsatz von Verfahren zur Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen wurde auf vielfältige Weise berücksichtigt. In die Untersuchung einbezogen wurden nur Varianten, die die derzeit gültige EnEV 2016 erfüllen. Zusätzlich wurde das Referenzgebäude der EnEV 2014 betrachtet.

Es wird vorgeschlagen, für die kommende Anpassung der deutschen Vorgaben an die Anforderungen der EU neue Referenzgebäude festzulegen. Bei allen untersuchten Gebäudetypen und Varianten der Energieeffizienz, die die EnEV 2016 erfüllen, zeigte sich folgender grober Trend: je niedriger der Jahres-Primärenergiebedarf ist, desto höher sind die Gesamtkosten. Für keine der Kostenoptimalitätsberechnungen zeigt sich eine Abhängigkeit, wonach aus einer Steigerung des Jahres-Primärenergiebedarf eine Zunahme der Gesamtkosten folgte. Als Referenzen für Niedrigstenergiegebäude werden daher Effizienzvarianten vorgeschlagen, welche einen ähnlichen Primärenergiebedarf aufweist, wie von der EnEV 2016 vorgeschrieben.

Für Wohngebäude ist die für das Niedrigstenergiegebäude vorgeschlagene Effizienzvariante wie folgt gekennzeichnet: im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2014 wird eine Zu- und Abluftanlage mit einem hohen Wärmebereitstellungsgrad von 90 % sowie eine in den U-Werten um 8 % verbesserte Gebäudehülle 8 % eingesetzt. Sie weist für das untersuchte Einfamilienhaus (Doppelhaushälfte/Mehrfamilienhaus) einen mittleren Jahres-Primärenergiebedarf von 75 (60/50) kWh/m<sup>2</sup>a auf. Für ein Bürogebäude weist die vorgeschlagene Effizienzvariante eine verbesserte Gebäudehülle und verbesserte

Wärmebrücken sowie Optimierungen in der Anlagentechnik auf. Für ein Hotel erweist sich die Variante mit einem Brennwertkessel, einer zusätzlichen Solaranlage (für Heizung und Warmwasser), einer verbesserten Gebäudehülle und verbesserten Wärmebrücken sowie Optimierungen in der Anlagentechnik als kostenoptimal.

Im Zusammenhang mit einer möglichen Überarbeitung der EnEV wird insbesondere auch die Frage der Systemgrenze als zentral angesehen. Untersuchungen an Plusenergiehäusern haben gezeigt, dass diese einen deutlich höheren Energiebedarf für Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung besitzen als für den Betrieb. Auch für Niedrigstenergiegebäude kann angenommen werden, dass der Energiebedarf zur Gebäudeherstellung im Vergleich zum Energiebedarf für den Gebäudebetrieb nicht mehr vernachlässigt werden kann. Vor diesem Hintergrund erscheint es aus wissenschaftlicher Sicht als außerordentlich wichtig, auch den Energieaufwand für die Erstellung des Gebäudes in die Betrachtung einzubeziehen. Wenn wie bisher, dies nicht gemacht wird, besteht die Gefahr der Fehloptimierung, wodurch das Ziel der Reduktion des Energiebedarf Deutschlands nicht optimal verfolgt wird. Diese Fragestellung wird derzeit in dem vom BBSR im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Forschungsprojekt „Weiterentwicklung der EnEV-Nachweisverfahren und -Anforderungen unter Berücksichtigung des Gebäudelebenszyklus“ untersucht.

## 5 Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energiedaten: Gesamtausgabe (Stand: Mai 2017). [http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=18](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=18) (Abruf: 11.07.2017).
- [2] Europäisches Parlament; Europäischer Rat: Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. EU-Gebäuderichtlinie.
- [3] Hauser, G.: Künftige Entwicklung der Gebäude in energetischer Hinsicht. Wärmeschutztag 2014. München, 2014.
- [4] Simon, H.; Spitzner, M. H.: Regenerative Energien und Dämmtechnik. Energiewende im Zusammenspiel. BauPlaner Special 16 (2009), Heft 12, S. 4–6.
- [5] Völker, C.; Beckmann, J.; Kornadt, O.: Ergebnisse einer Großstudie über Nutzeranforderungen an Wohngebäude. Bauphysik 33 (2011), Heft 3, S. 167–176.
- [6] Europäischer Rat: Europa 2020: eine neue europäische Strategie für Beschäftigung und Wachstum, 2010.
- [7] Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung: Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft. Berlin, 2011.
- [8] DIN 4108: Wärmeschutz im Hochbau.
- [9] Deutsche Bundesregierung mit Zustimmung des Bundesrats: Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Brauchwasseranlagen (Heizungsanlagen-Verordnung), 1978.
- [10] WSVO 1977: Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung). (Energie sparen), 1977.
- [11] WSVO 1995: Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung). (Energie sparen), 1994.
- [12] EnEV 2002. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV), 2002.
- [13] EnEV 2007. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), 2007.
- [14] EnEV 2009: Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, 2009.
- [15] DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, 2015.
- [16] EnEV 2014. Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, 2014.
- [17] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Wege zum Effizienzhaus Plus, 2016.
- [18] EnEV 2014: Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung (EnEV), 2014.
- [19] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, 2013.
- [20] DIN EN 13829: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren, 2001.
- [21] Schoch, T.: Wärmebrückenkatalog 4. Auflage. Bauwerk. Beuth, Berlin, 2012.
- [22] Schoch, T.: Wärmebrückenberechnung 2. Auflage. Bauwerk. Beuth, Berlin, 2015.
- [23] DIN EN ISO 10211: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen, 2015.

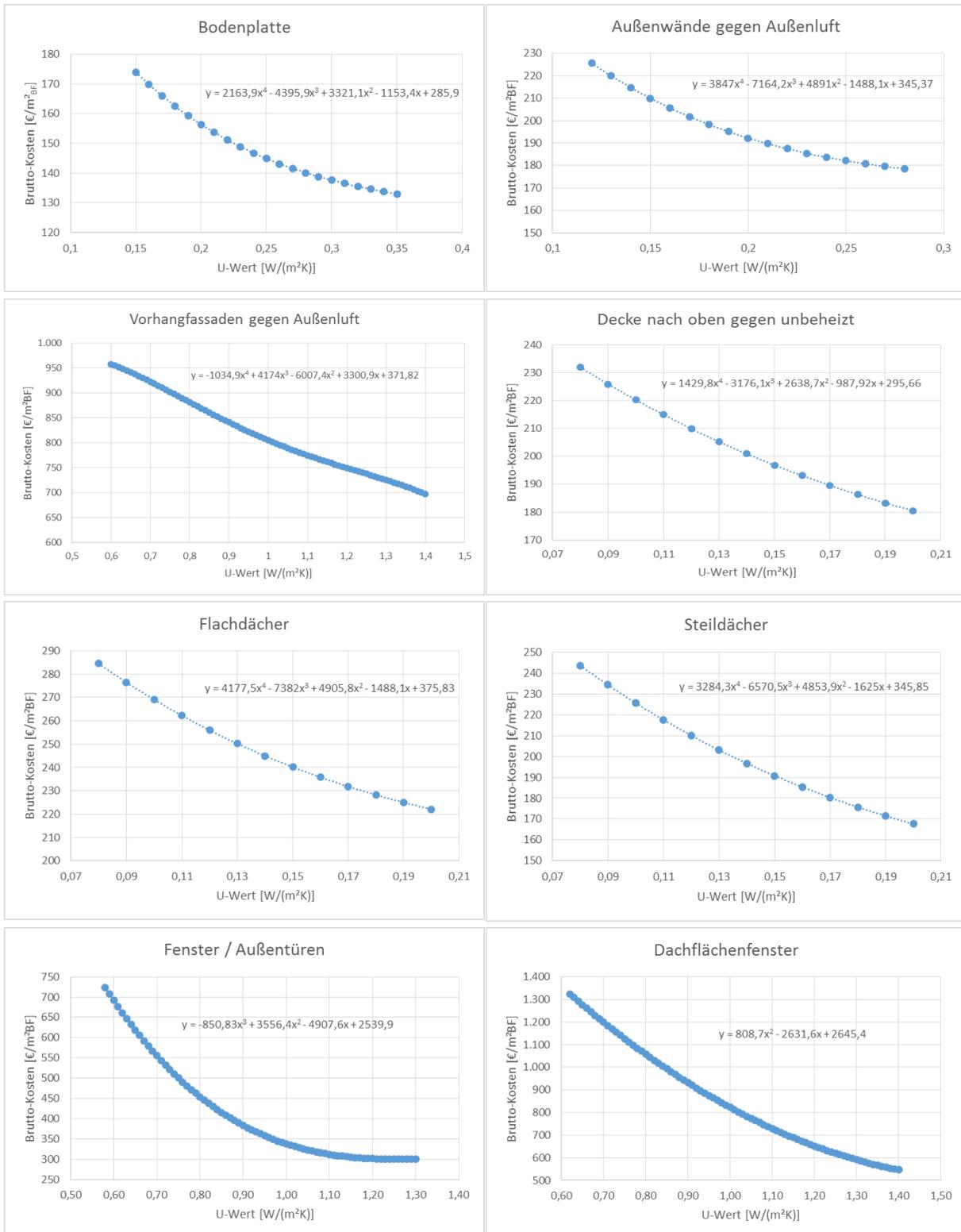
- [24] DIN 4108 Beiblatt 2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele, 2006.
- [25] Deutscher Bundestag: Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich. EEWärmeG, 2009.
- [26] Brinks, P.; Kornadt, O.; Oly, R.: Building Simulation of Nearly-Zero-Energy Buildings for Industrial Applications. In: Symposium 10 years of Xella Research on building materials, Potsdam, Germany, 2014.
- [27] Regierung der Bundesrepublik Deutschland: Bericht über die Berechnung des „Kostenoptimalen Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz“, 2013.
- [28] Buildings Performance Institute Europe: Nearly zero energy buildings definitions across Europe. [http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/128/BPIE\\_factsheet\\_nZEB\\_definitions\\_across\\_Europe.pdf](http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/128/BPIE_factsheet_nZEB_definitions_across_Europe.pdf) (Abruf: 07.09.2017).
- [29] Europäische Kommission: Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012 der Kommission vom 16. Januar 2012.
- [30] Europäische Kommission: Leitlinien zur delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 der Kommission vom 16. Januar 2012 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden durch die Schaffung eines Rahmens für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Gebäudekomponenten.
- [31] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Standard von Niedrigstenergiegebäuden in Deutschland. Zur Veröffentlichung angenommen in: Mauerwerk, 2017.
- [32] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Auswirkungen der Entwicklung zu Niedrigstenergiegebäuden auf die Gebäudehülle. Bauphysik Kalender 2017, Gebäudehülle und Fassaden. Ernst & Sohn (2017), S. 45–73.
- [33] Klauß, S.; Maas, A.: Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit. <https://www.baufachinformation.de/literatur.jsp?bu=2012029015839> (Abruf: 11.09.2017).
- [34] Offermann, M.; Manteuffel, B. von; Hermelink, A.: Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung „Cost-Optimal-Level“ - Modellrechnungen. <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2013/ON262013.html> (Abruf: 11.09.2017).
- [35] Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (Hrsg.): 12. Staffel Auslegungsfragen zur Energieeinsparverordnung (EnEV). Auslegungsfragen zur Energieeinsparverordnung (EnEV), Heft 12, 2010.
- [37] DIN V 4108-6: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, 2003.
- [38] DIN V 4701-10: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. 2003.
- [39] Maas, A.; Erhorn, H.; de Boer, J. et al.: Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Gebäude mit der EnEV 2012. Anforderungsmethodik, Regelwerk und Wirtschaftlichkeit. Online Ressource. <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/ON052012.html>.
- [40] Agethen, U.; Frahm, K.-J.; Renz, K. et al.: Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte. [http://www.triplesan.de/wp-content/uploads/2015/05/lebensdauer\\_von\\_bauteilen.pdf](http://www.triplesan.de/wp-content/uploads/2015/05/lebensdauer_von_bauteilen.pdf) (Abruf: 07.09.2017).
- [41] DIN EN 15459: Energieeffizienz von Gebäuden - Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Energieanlagen in Gebäuden. 2008.

- [42] E DIN EN 15459-1: Energieeffizienz von Gebäuden - Heizungsanlagen und wasserbasierte Kühlanlagen in Gebäuden - Teil 1: Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Energieanlagen in Gebäuden; Deutsche Fassung FprEN 15459-1. 2016.
- [43] VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung.
- [44] Maas, A.; Schlitzberger, S.: EnEV 2017 - Vorbereitende Untersuchungen. [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2017/bbsr-online-16-2017-dl.pdf%3Bjsessionid=09135C13E612B668321720FB8C1846D5.live11291?\\_\\_blob=publication-File&v=2](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2017/bbsr-online-16-2017-dl.pdf%3Bjsessionid=09135C13E612B668321720FB8C1846D5.live11291?__blob=publication-File&v=2) (Abruf: 25.09.2017).
- [45] Statistisches Bundesamt: Baupreise und Baukosten 2016, 2017.
- [46] Statistisches Amt der Europäischen Union. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database> (Abruf: 07.09.2017).
- [47] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Zahlen und Fakten Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe,did=476134.html> (Abruf: 14.09.2016).
- [48] Statistisches Bundesamt: Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2000 bis Juli 2016. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2016.
- [49] Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V.: Entwicklung des Pelletpreises in Deutschland. [http://www.depv.de/de/home/marktdaten/pellets\\_preisentwicklung/](http://www.depv.de/de/home/marktdaten/pellets_preisentwicklung/) (Abruf: 07.09.2017).
- [50] Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C.: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Kurzfassung zum Endbericht, Projekt Nr. 57/12 Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH, Basel, Köln, Osnabrück, 2014.
- [51] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.: Preisentwicklung bei Holzpellets, Heizöl und Erdgas. [www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/graphiken/120-der-pellet-preis-index-grahiken](http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/graphiken/120-der-pellet-preis-index-grahiken) (Abruf: 14.09.2017).
- [52] Hoier, A.; Erhorn, H.: Energetische Gebäudesanierung in Deutschland Studie Teil I: Entwicklung und energetische Bewertung alternativer Sanierungsfahrpläne. IBP-Bericht WB 170/2013. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart, 2013.
- [53] Finanzen.net GmbH: 30j-Bundesanleihen. <http://www.finanzen.net/zinsen/30j-Bundesanleihen> (Abruf: 07.09.2017).
- [54] van Elburg, M.; Sack, N.; Woest, A. et al.: LOT 32 / Ecodesign of Window Products. Task 2 - Market Analysis, 2015.
- [55] Verband Fenster + Fassade; Bundesverband Flachglas e.V.: Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern. Aktualisierung März 2014 der Studie "Im neuen Licht: Energetische Modernisierung von alten Fenstern". Verband Fenster + Fassade; Bundesverband Flachglas e.V., 2014.
- [56] Statistisches Bundesamt: Preisindizes für die Bauwirtschaft. Reihe 4. Wiesbaden, 2016.
- [57] Maas, A.; Erhorn, H.; de Boer, J. et al.: Ergänzungsuntersuchungen zum Wirtschaftlichkeitsgutachten für die Fortschreibung der Energieeinsparverordnung. [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/DL\\_ON302012.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/DL_ON302012.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (Abruf: 20.09.2017).
- [58] Thiel, D.; Ehrlich, M.: Ermittlung von spezifischen Kosten energie-sparender Bauteil-, Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nichtwohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012. [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/DL\\_ON082012.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/DL_ON082012.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (Abruf: 20.09.2017).
- [59] Gütesiegel 18599. <http://www.18599siegel.de/> (Abruf: 19.09.2017).
- [60] KfW. <https://www.kfw.de/kfw.de.html> (Abruf: 24.09.2017).
- [61] TRNSYS. <http://trnsys.de> (Abruf: 09.07.2017).

[62] PHPP. [http://passiv.de/de/04\\_phpp/04\\_phpp.htm](http://passiv.de/de/04_phpp/04_phpp.htm) (Abruf: 21.09.2017).

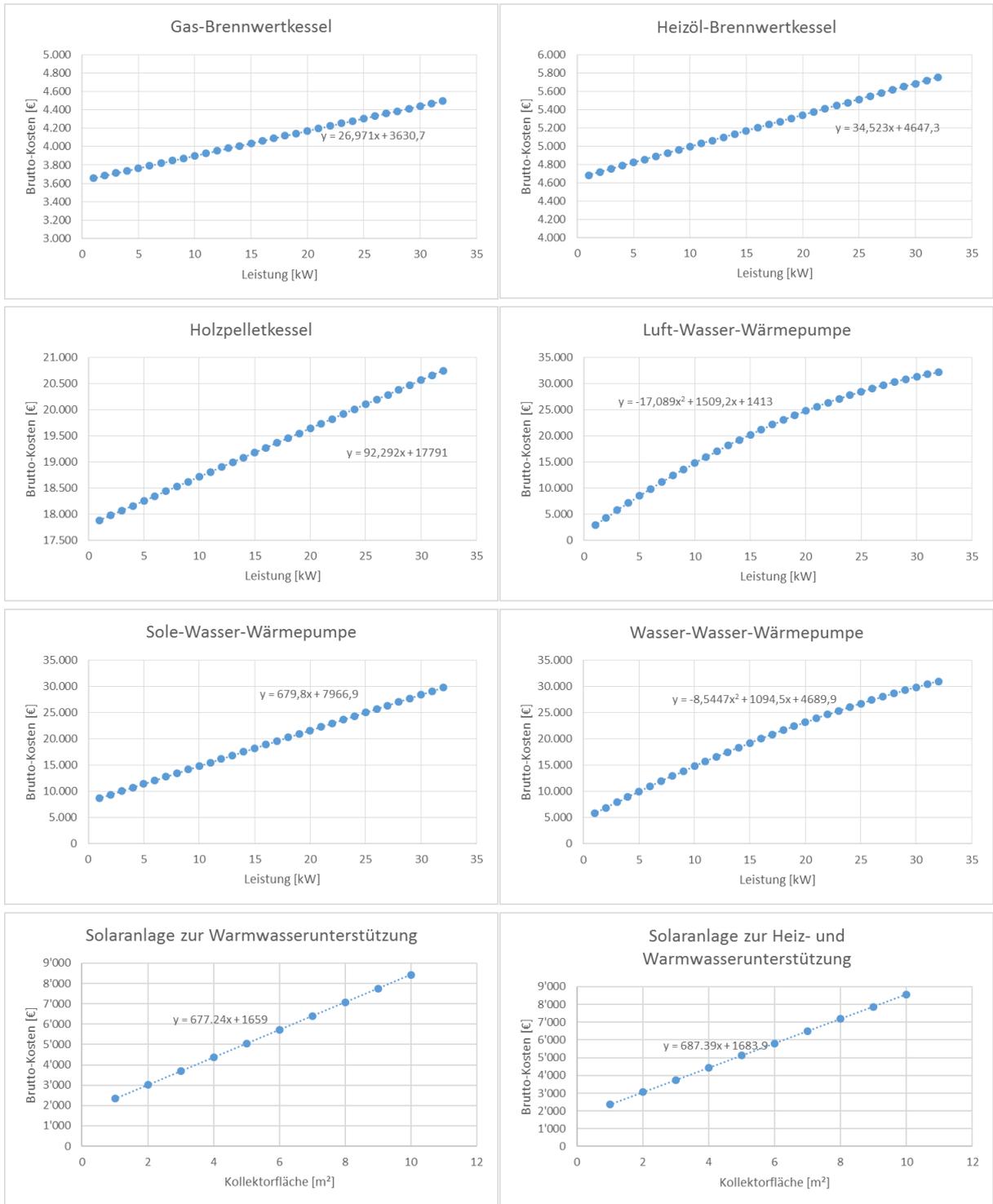
## 6 Anhang A - Investitionskosten

### Alle Modellgebäude: Investitionskosten für Bauteile der wärmeübertragenden Hüllflächen Gebäudehülle

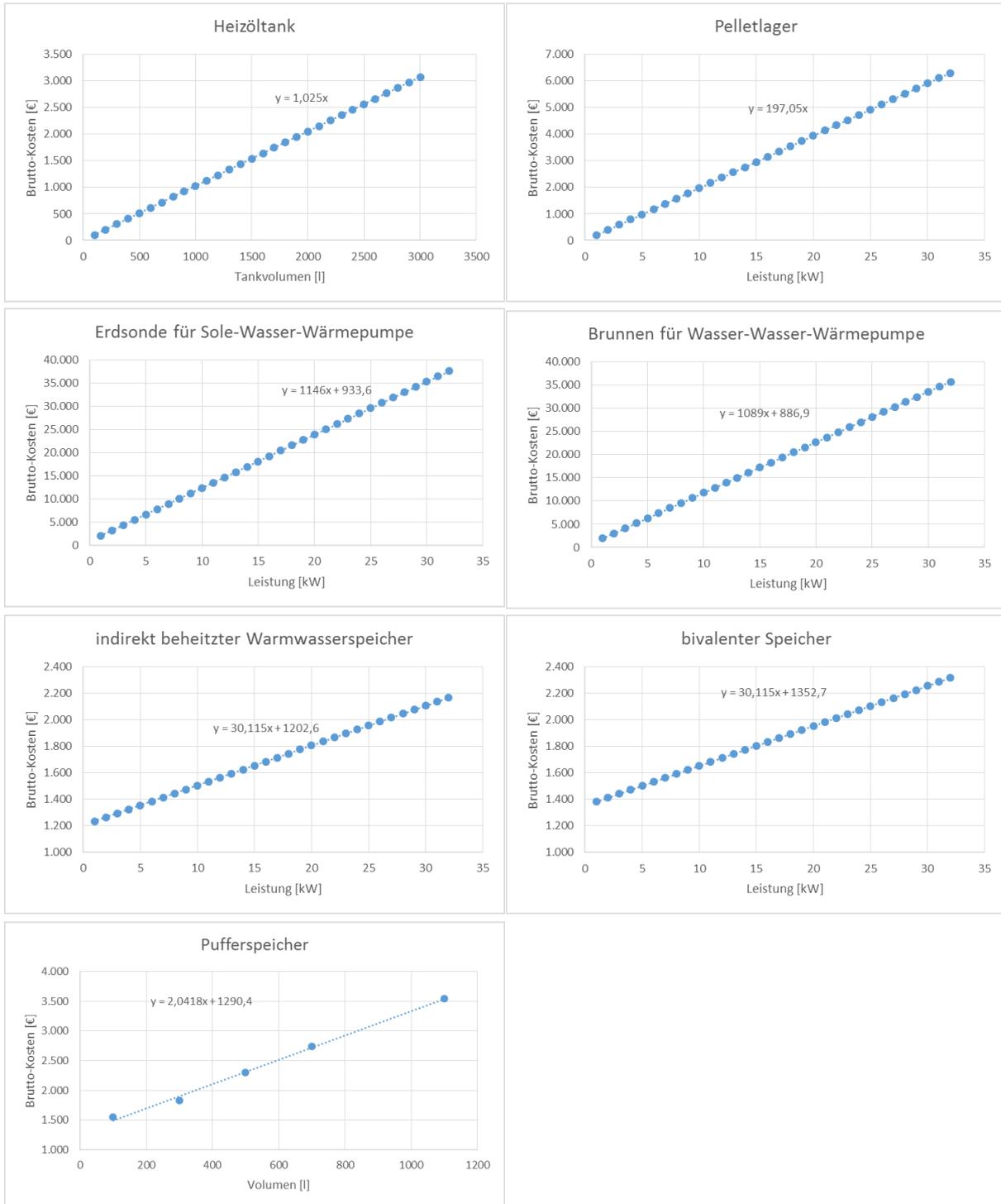


# Einfamilienhaus & Doppelhaushälfte: Investitionskosten für TGA

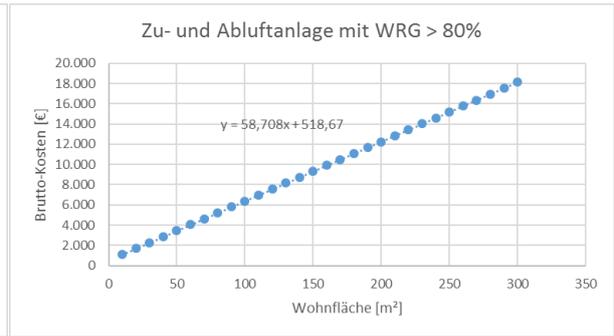
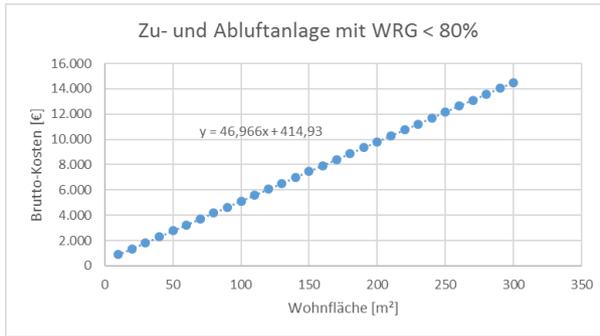
## Wärmeerzeuger



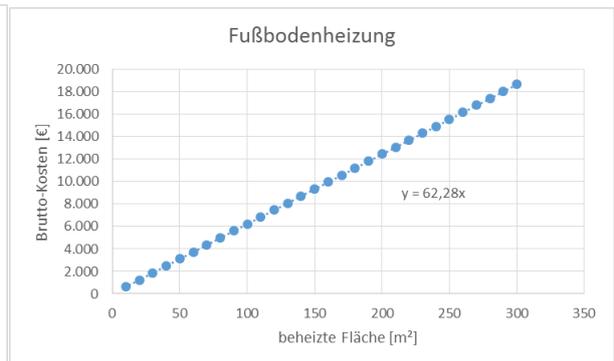
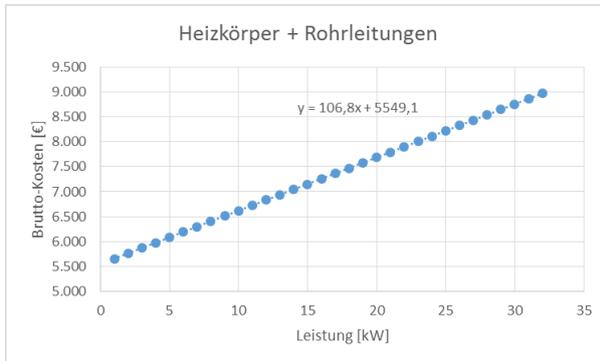
## Zusatzkosten zu den Wärmeerzeugern



## Lüftungsanlagen

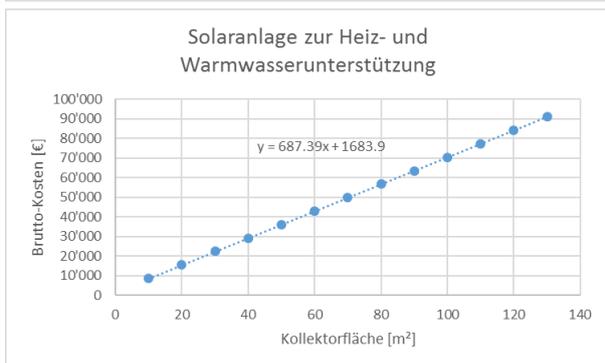
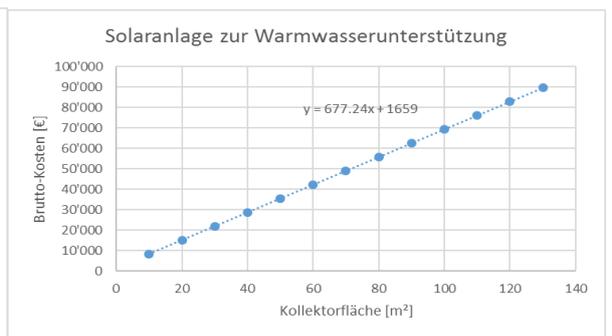
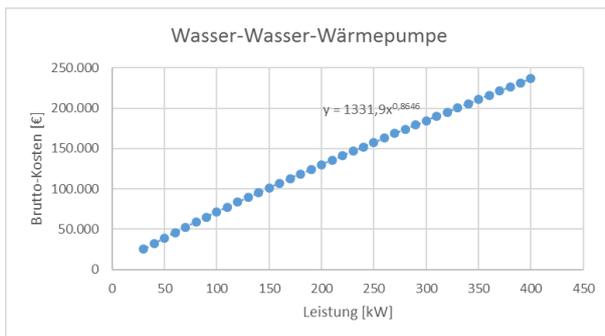
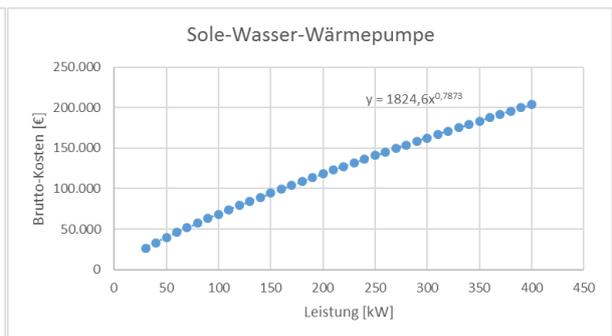
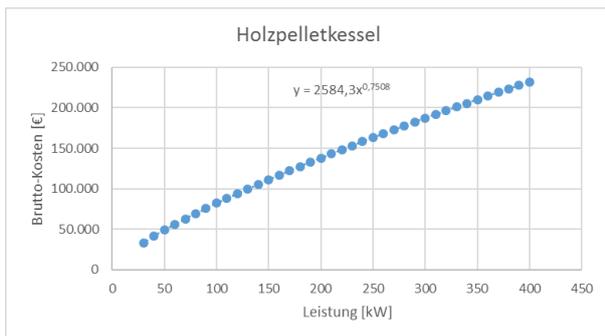
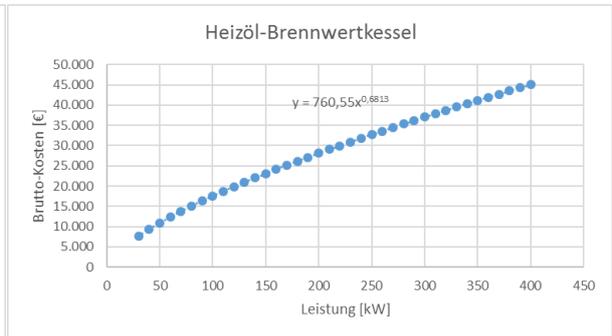
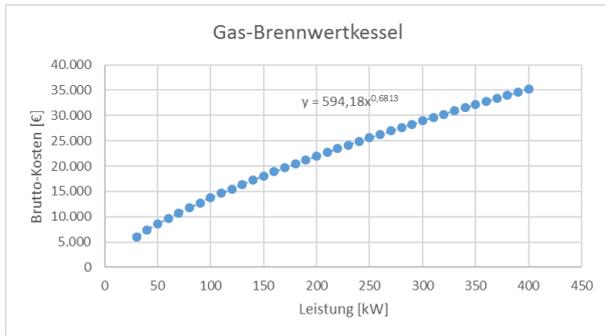


## Wärmeabgabe

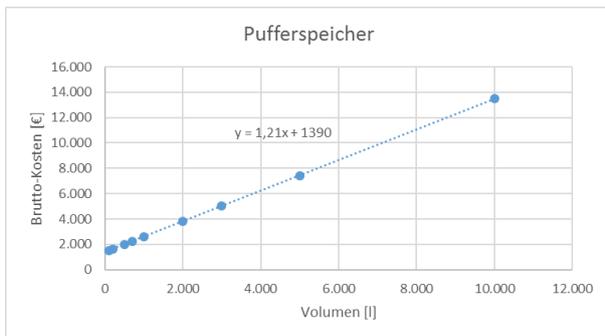
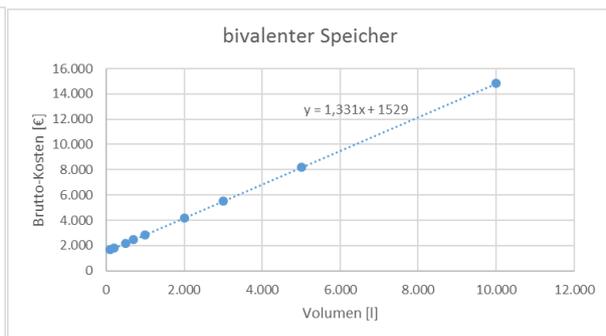
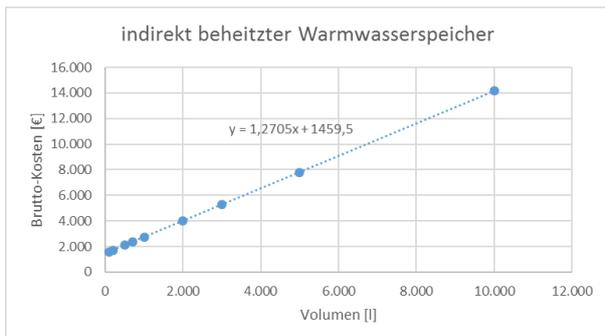
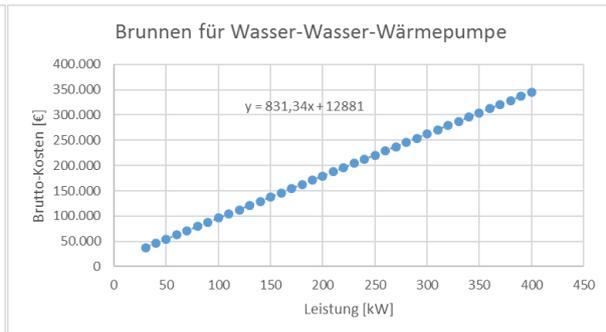
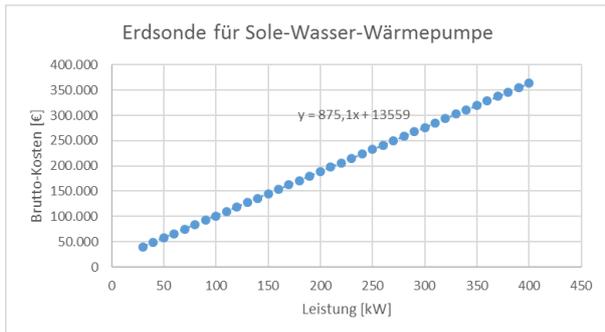
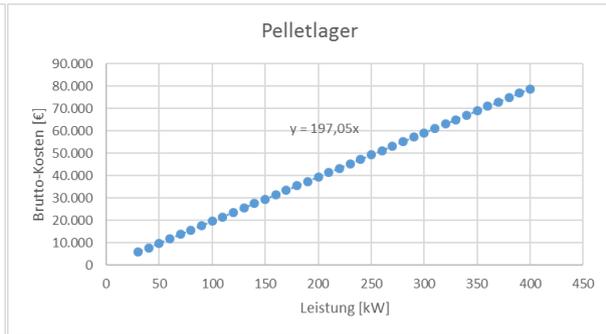
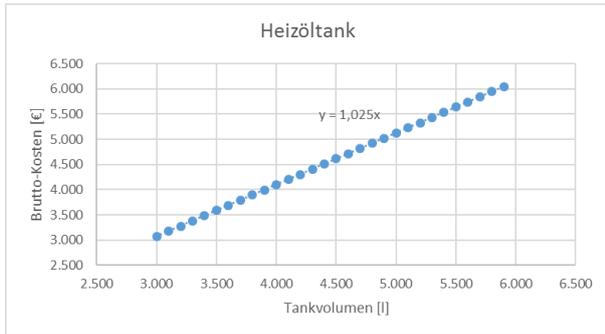


# Mehrfamilienhaus: Investitionskosten für TGA

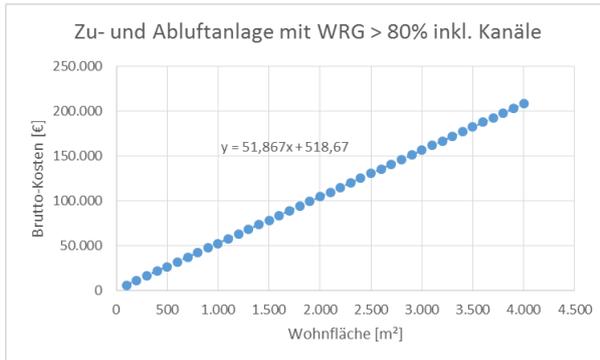
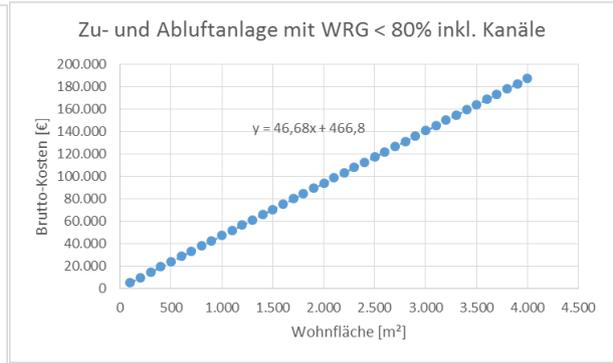
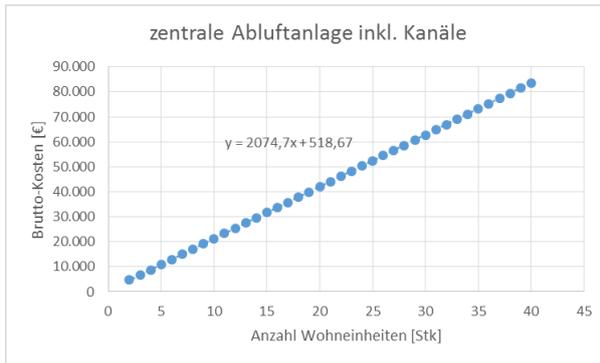
## Wärmeerzeuger



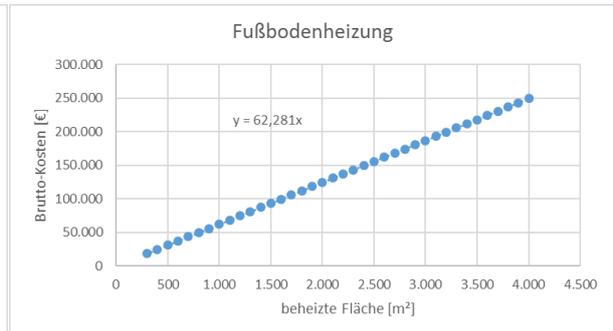
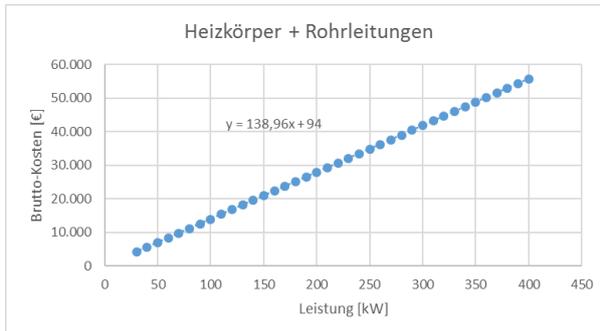
## Zusatzkosten zu den Wärmeerzeugern



## Lüftungsanlagen

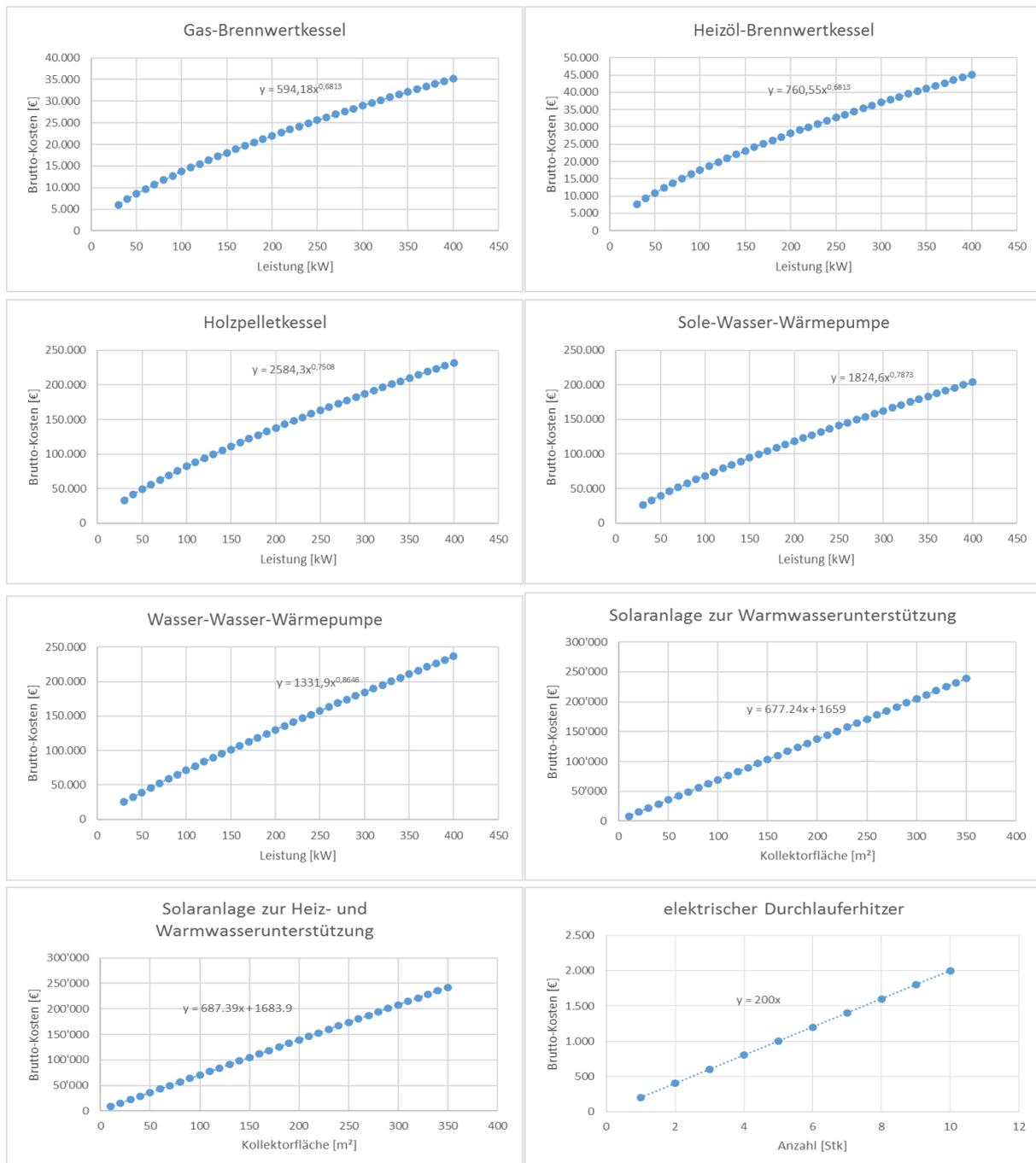


## Wärmeabgabe

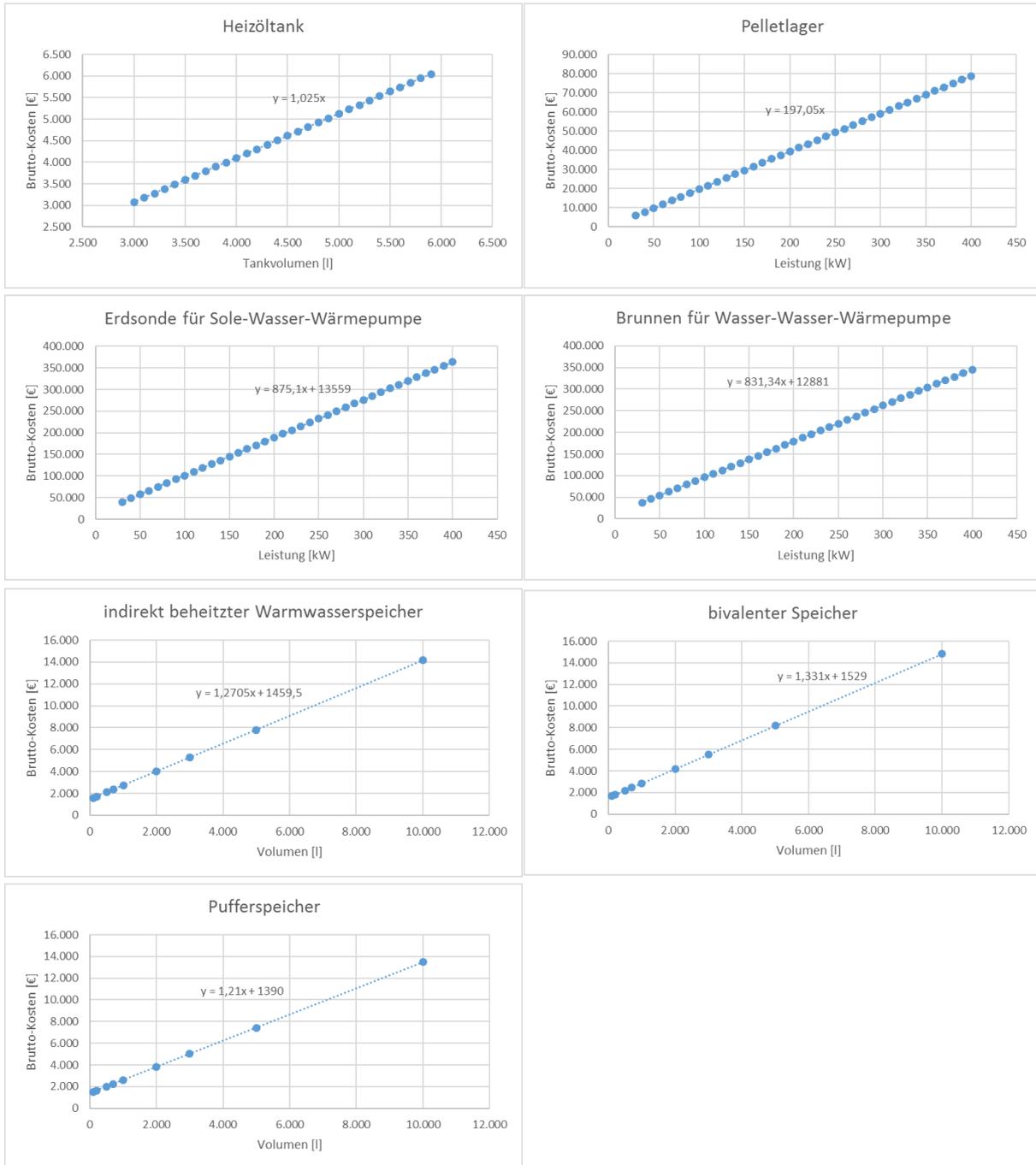


# Nichtwohngebäude: Investitionskosten für TGA

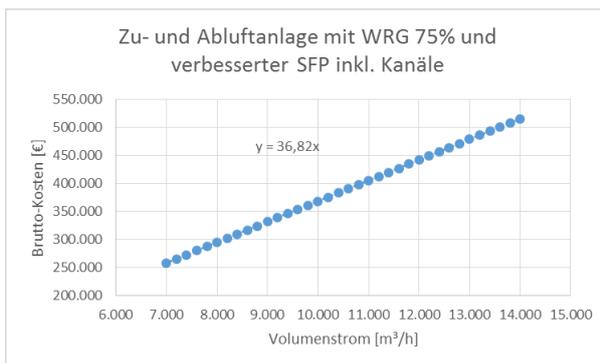
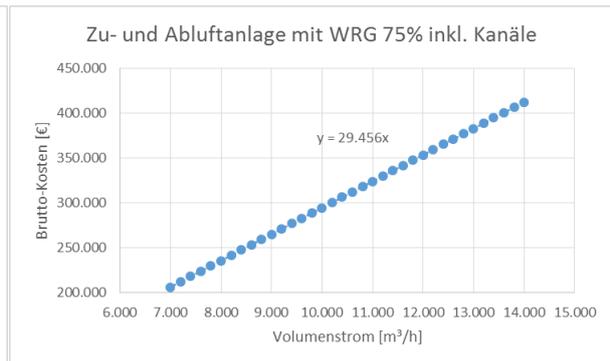
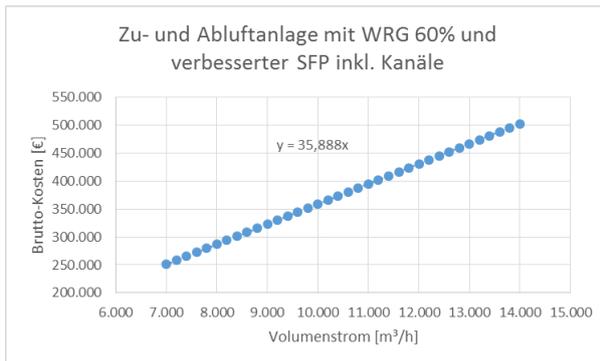
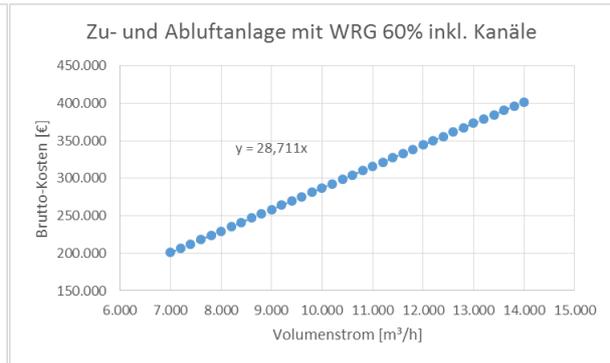
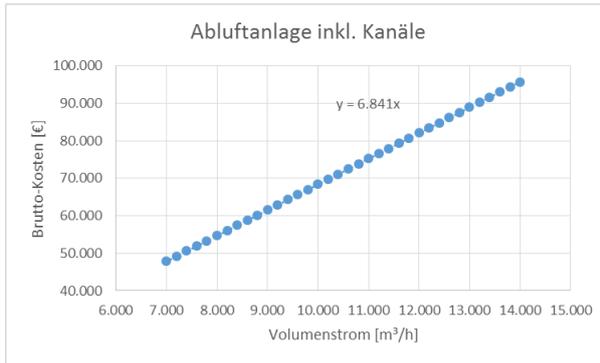
## Wärmeerzeuger



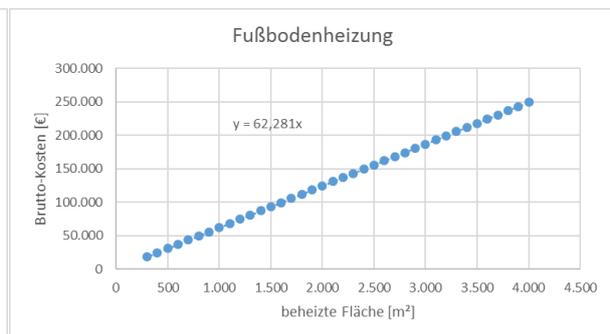
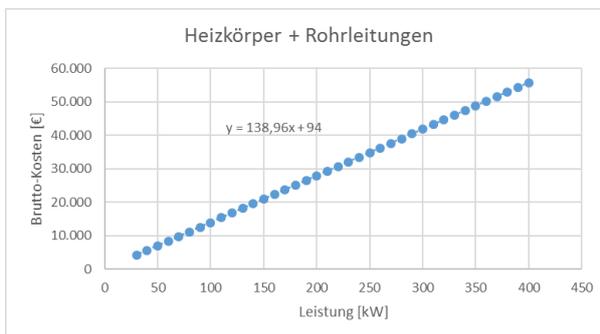
## Zusatzkosten zu den Wärmeerzeugern



## Lüftungsanlagen



## Wärmeabgabe



## 7 Anhang B – Untersuchte Varianten

### Einfamilienhaus

Variante 2: U-Werte Gebäudehülle 10 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,315 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,252 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,620 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,180 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,180 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)

Variante 3: U-Werte Gebäudehülle 20 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,224 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,040 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,440 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,160 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,160 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)

Variante 4: U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

#### Variante 5: U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,210 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,780 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,080 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)

#### Variante 6: U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,175 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,650 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,100 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,100 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)

#### Variante 7: verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

#### Variante 8: Gas-Brennwertkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Gas-Brennwertkessel anstatt Öl-Brennwertkessel

#### Variante 9: Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung anstatt nur zur Warmwasserunterstützung
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 10: Luft-Wasser-Wärmepumpe

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Luft-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 11: Sole-Wasser-Wärmepumpe

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Sole-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 12: Wasser-Wasser-Wärmepumpe

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Wasser-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 13: Holzpelletkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 14: Zu- und Abluftanlage mit 70 % Wärmebereitstellungsgrad

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Zu- und Abluftanlage mit 70 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 15: Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 16: Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 8 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> U-Wert Bodenplatte: 0,322 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert Außenwände: 0,258 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert Fenster: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert Tür: 1,656 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert Dach: 0,184 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert oberste Geschossdecke: 0,184 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 17: Effizienzhaus 70 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> U-Wert Bodenplatte: 0,287 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert Außenwände: 0,230 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert Fenster: 1,070 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert Tür: 1,476 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert Dach: 0,164 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert oberste Geschossdecke: 0,164 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> Luft-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage

--> Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C

--> indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 18: Effizienzhaus 70 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,287 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,230 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,070 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,476 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,164 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,164 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 19: Effizienzhaus 55 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 20: Effizienzhaus 55 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 21: Effizienzhaus 55 mit Sole-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Sole-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 22: Effizienzhaus 55 mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)

Im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wasser-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 23: Effizienzhaus 55 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Luft-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 24: Effizienzhaus 55 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 35 % verbessert (rechnerischer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,228 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,182 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,850 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,130 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,130 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > Luft-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 25: Effizienzhaus 40 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 52 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,134 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,620 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 0,864 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,096 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,096 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

## Doppelhaushälfte

Variante 2: U-Werte Gebäudehülle 10 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,315 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,252 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,180 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,180 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächenfenster: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,620 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)

Variante 3: U-Werte Gebäudehülle 20 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,224 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,160 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,160 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,040 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächenfenster: 1,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,440 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)

Variante 4: U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,980 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

#### Variante 5: U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,210 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,780 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,840 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,080 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)

#### Variante 6: U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,175 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,100 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,100 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,650 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,700 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)

#### Variante 7: verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)

#### Variante 8: Gas-Brennwertkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Gas-Brennwertkessel anstatt Öl-Brennwertkessel

Variante 9: Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung anstatt nur zur Warmwasserunterstützung

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 10: Luft-Wasser-Wärmepumpe

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Luft-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage

--> Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C

--> indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 11: Sole-Wasser-Wärmepumpe

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Sole-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage

--> Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C

--> indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 12: Wasser-Wasser-Wärmepumpe

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Wasser-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage

--> Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C

--> indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 13: Holzpelletkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage

--> indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 14: Zu- und Abluftanlage mit 70 % Wärmerückgewinnung

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Zu- und Abluftanlage mit 70 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 15: Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 16: Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 8 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> U-Wert Bodenplatte: 0,322 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert Außenwände: 0,258 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert Dachflächen: 0,184 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert oberste Geschossdecke: 0,184 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert Fenster: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert Dachflächenfenster: 1,290 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> U-Wert Tür: 1,656 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)

--> Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 17: Effizienzhaus 70 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> U-Wert Bodenplatte: 0,287 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert Außenwände: 0,230 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert Dachflächen: 0,164 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert oberste Geschossdecke: 0,164 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert Fenster: 1,070 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert Dachflächenfenster: 1,150 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> U-Wert Tür: 1,476 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)

--> Luft-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage

--> Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C

--> indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 18: Effizienzhaus 70 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,287 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,230 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,164 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,164 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,070 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächenfenster: 1,150 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,476 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 19: Effizienzhaus 55 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 29-36 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (36 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage

Variante 20: Effizienzhaus 55 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 29-36 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (36 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 21: Effizienzhaus 55 mit Sole-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 29-36 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (36 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Sole-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 22: Effizienzhaus 55 mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 29-36 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (36 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wasser-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 23: Effizienzhaus 55 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 29-36 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (36 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Luft-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmerückgewinnung anstatt zentrale Abluftanlage
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 24: Effizienzhaus 55 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 35 % verbessert (rechnerischer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,228 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,182 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,130 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,130 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,85 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (35 % Verbesserung)
- > Luft-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 25: Effizienzhaus 40 mit Pelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 52 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,134 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,096 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert oberste Geschossdecke: 0,096 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,620 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Dachflächenfenster: 0,670 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > g-Wert Dachflächenfenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 0,864 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

## Mehrfamilienhaus

Variante 2: U-Werte Gebäudehülle 10 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,315 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,252 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,180 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,620 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)

Variante 3: U-Werte Gebäudehülle 20 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,224 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,160 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,040 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,440 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)

Variante 4: U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

#### Variante 5: U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,210 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,780 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,080 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)

#### Variante 6: U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,175 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,100 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,650 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)

#### Variante 7: verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)

#### Variante 8: Gas-Brennwertkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Gas-Brennwertkessel anstatt Öl-Brennwertkessel

#### Variante 9: Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung anstatt nur zur Warmwasserunterstützung
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 11: Sole-Wasser-Wärmepumpe

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Sole-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlicher Pufferspeicher

#### Variante 12: Wasser-Wasser-Wärmepumpe

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Wasser-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlicher Pufferspeicher

#### Variante 13: Holzpelletkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlicher Pufferspeicher

#### Variante 14: Zu- und Abluftanlage mit 70 % Wärmebereitstellungsgrad

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Zu- und Abluftanlage mit 70 % Wärmebereitstellungsgrad anstatt zentraler Abluftanlage

#### Variante 15: Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad anstatt zentraler Abluftanlage

Variante 16: Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 8 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,322 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,258 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,184 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,656 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (8 % Verbesserung)
- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad anstatt zentraler Abluftanlage

Variante 18: Effizienzhaus 70 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 18 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,287 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,230 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,164 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,070 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > U-Wert Tür: 1,476 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (18 % Verbesserung)
- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad anstatt zentraler Abluftanlage

Variante 19: Effizienzhaus 55 mit BWK + Solar + Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Zu- und Abluftanlage mit 90 % Wärmebereitstellungsgrad anstatt zentraler Abluftanlage

Variante 20: Effizienzhaus 55 mit Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlicher Pufferspeicher

Variante 21: Effizienzhaus 55 mit Sole-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Sole-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlicher Pufferspeicher

Variante 22: Effizienzhaus 55 mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe + U-Werte Gebäudehülle 29-33 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken (alternativer Nachweis)

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,250 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (29 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (31 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 1,200 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (33 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wasser-Wasser-Wärmepumpe anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlicher Pufferspeicher

Variante 25: Effizienzhaus 40 mit Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 52 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Kellerdecke: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,134 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert Dachflächen: 0,096 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,620 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Tür: 0,864 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (52 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlicher Pufferspeicher

## Büro

Variante 2: U-Werte Gebäudehülle 10 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,315 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,252 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Vorhangfassade: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,180 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)

Variante 3: U-Werte Gebäudehülle 20 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,224 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,040 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Vorhangfassade: 1,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,160 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)

Variante 4: U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Vorhangfassade: 0,980 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

#### Variante 5: U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,210 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,780 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Vorhangfassade: 0,840 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)

#### Variante 6: U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,175 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,650 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Vorhangfassade: 0,700 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,100 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)

#### Variante 7: verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

#### Variante 8: Gas-Brennwertkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Gas-Brennwertkessel anstatt Öl-Brennwertkessel

#### Variante 10: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > zusätzlich Sole-Wasser-Wärmepumpe
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 11: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> zusätzlich Wasser-Wasser-Wärmepumpe

--> Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 12: Holzpelletkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 13: verbesserte Rückwärmezahl

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60

--> mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

Variante 14: verbesserter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,75 anstatt 0,60

Variante 15: Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> U-Wert Bodenplatte: 0,298 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)

--> U-Werte Außenwände: 0,238 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)

--> U-Wert Fenster: 1,110 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)

--> U-Wert Vorhangfassade: 1,190 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)

--> U-Wert Dach: 0,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)

--> Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 16: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert  
im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,298 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,238 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,110 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Vorhangfassade: 1,190 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > zusätzlich Sole-Wasser-Wärmepumpe
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 17: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,298 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,238 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,110 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Vorhangfassade: 1,190 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > zusätzlich Wasser-Wasser-Wärmepumpe
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 19: Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Vorhangfassade: 0,980 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel
- > zusätzlich Pufferspeicher
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

Variante 20: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Vorhangfassade: 0,980 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > zusätzlich Sole-Wasser-Wärmepumpe
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > zusätzlich Pufferspeicher
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

Variante 21: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Vorhangfassade: 0,980 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > zusätzlich Wasser-Wasser-Wärmepumpe
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > zusätzlich Pufferspeicher
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

Variante 22: Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Vorhangfassade: 0,980 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 23: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert  
im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> U-Werte Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60

--> U-Wert Vorhangfassade: 0,980 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> zusätzlich Sole-Wasser-Wärmepumpe

--> Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 24: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

--> U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> U-Werte Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60

--> U-Wert Vorhangfassade: 0,980 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

--> zusätzlich Wasser-Wasser-Wärmepumpe

--> Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C

--> zusätzlich Pufferspeicher

Variante 25: Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + verbesserter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung + U-Werte Gebäudehülle 45 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,193 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,154 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,720 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Vorhangfassade: 0,770 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,110 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel
- > zusätzlich Pufferspeicher
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,69 anstatt 0,60

Variante 26: verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,210 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Werte Außenwände: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,780 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Vorhangfassade: 0,840 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,400 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

## Hotel

Variante 2: U-Werte Gebäudehülle 10 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,315 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,252 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Türen: 1,620 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,180 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (10 % Verbesserung)

Variante 3: U-Werte Gebäudehülle 20 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,224 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,040 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Türen: 1,440 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,160 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (20 % Verbesserung)

Variante 4: U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

Variante 5: U-Werte Gebäudehülle 40 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,210 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,168 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,780 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 1,080 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,120 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (40 % Verbesserung)

Variante 6: U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,175 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,650 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,100 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)

*Variante 7: verbesserte Wärmebrücken*

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)

Variante 8: Gas-Brennwertkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Gas-Brennwertkessel anstatt Öl-Brennwertkessel

Variante 9: Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung anstatt nur zur Warmwasserunterstützung
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 10: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 11: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 12: Holzpelletkessel

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

#### Variante 13: verbesserte Rückwärmezahl

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

#### Variante 14: verbesserter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,75 anstatt 0,60

Variante 15: Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,298 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,238 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,110 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Türen: 1,530 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 16: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,298 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,238 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,110 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Türen: 1,530 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 17: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 15 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,298 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,238 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 1,110 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Türen: 1,530 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,170 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (15 % Verbesserung)
- > Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 18: Brennwertkessel + Solar (für Warmwasser) + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

Variante 19: Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

Variante 20: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

Variante 21: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60

Variante 22: Holzpelletkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 23: Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert  
im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Sole-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 24: Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel + U-Werte Gebäudehülle 30 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,245 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,196 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,910 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 1,260 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Wasser-Wasser-Wärmepumpe + Brennwertkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher

Variante 25: Holzpelletkessel + verbesserte Rückwärmezahl + verbesserter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung + U-Werte Gebäudehülle 45 % verbessert

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,193 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,154 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,720 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 0,990 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,110 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (45 % Verbesserung)
- > Holzpelletkessel anstatt Brennwertkessel + Solaranlage
- > indirekt beheizter Trinkwarmwasserspeicher anstatt bivalenter Solarspeicher
- > zusätzlich Pufferspeicher
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,69 anstatt 0,60

Variante 26: Brennwertkessel + Solar (für Heizung und Warmwasser) + verbesserte Rückwärmezahl + U-Werte Gebäudehülle 50 % verbessert + verbesserte Wärmebrücken

im Vergleich zum Referenzgebäude gemäß EnEV 2014 geändert:

- > U-Wert Bodenplatte: 0,175 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,350 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Außenwände: 0,140 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,280 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Fenster: 0,650 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,300 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > g-Wert Fenster: 0,50 anstatt 0,60
- > U-Wert Türen: 0,900 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 1,800 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > U-Wert Dach: 0,100 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,200 W/(m<sup>2</sup>K) (50 % Verbesserung)
- > Wärmebrückenkorrekturfaktor 0,035 W/(m<sup>2</sup>K) anstatt 0,050 W/(m<sup>2</sup>K) (30 % Verbesserung)
- > Solaranlage zur Heiz- und Warmwasserunterstützung anstatt nur zur Warmwasserunterstützung
- > Fußbodenheizung mit 35/28 °C anstatt Heizkörper mit 55/45 °C
- > zusätzlich Pufferspeicher
- > Rückwärmezahl von 0,75 anstatt 0,60
- > mittlerer Gesamtwirkungsgrad von Ventilator, Übertragungssystem, Motor, Drehzahlregelung von 0,54 anstatt 0,60