

TEXTE

71/2025

**Abschlussbericht**

# Der kumulierte Energieaufwand als Förderkriterium im Gebäudebereich

**von:**

Jana Deurer  
IREES GmbH, Karlsruhe

Dr. Jan Steinbach  
IREES GmbH, Karlsruhe

**Unter Mitwirkung von**

Prof. Dr. Benjamin Krick  
Architekt, Sanierungsmanager Riedstadt

Dr. Burkhard Schulze-Darup,  
Freischaffender Architekt und Stadtplaner

Dr. Bernd Steinmüller,  
Experte für Innovations- und Nachhaltigkeitsmanagement  
BSMC GmbH

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt

TEXTE 71/2025

KLIFOPLAN des Bundesministeriums für Wirtschaft und  
Klimaschutz

Forschungskennzahl 3720 41 511 0

FB001716

Abschlussbericht

## **Der kumulierte Energieaufwand als Förderkriterium im Gebäudebereich**

von

Jana Deurer  
IREES GmbH, Karlsruhe

Dr. Jan Steinbach  
IREES GmbH, Karlsruhe

### **Unter Mitwirkung von**

Prof. Dr. Benjamin Krick  
Architekt, Sanierungsmanager Riedstadt

Dr. Burkhard Schulze-Darup,  
Freischaffender Architekt und Stadtplaner

Dr. Bernd Steinmüller,  
Experte für Innovations- und Nachhaltigkeitsmanagement  
BSMC GmbH

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

### Durchführung der Studie:

IREES GmbH - Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien  
Durlacher Allee 77  
76131 Karlsruhe

### Abschlussdatum:

März 2024

### Redaktion:

Fachgebiet V 1.4 Energieeffizienz  
Michael Bade

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7701>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen\*Autoren.

### **Kurzbeschreibung: Der kumulierte Energieaufwand als Förderkriterium im Gebäudebereich**

In diesem Forschungsbericht wird der kumulierte Energieaufwand und das Treibhauspotenzial für verschiedene Referenzgebäude, sowohl im Neubau als auch im Gebäudebestand berechnet. Die Referenzgebäude werden dabei sehr detailliert nach Bauteilen und Materialien unter Berücksichtigung der Baupraxis abgebildet. Aufbauend auf den Ergebnissen werden Empfehlungen abgeleitet, die zu einer verbesserten Umsetzung klimafreundlichen Bauens in der Praxis führen sollen.

Grundlage der Berechnung ist die Ökobilanzierung, als Methode zur Quantifizierung des Umwelt- und Klimaeinflusses von Produkten, Unternehmen und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus. Die Berechnung erfolgt über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, also über die Herstellung der Baustoffe, den Betrieb des Gebäudes sowie den Rückbau und die Entsorgung der eingesetzten Materialien. Die Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen von Neubauten und Bestandssanierungen erfolgt im Verbund mehrerer Modelle. Im Rahmen dieses Projektes wurden mehrere Modelle, für die Baukonstruktion im Neubau, Wärmeversorgung und Raumlüftung, entwickelt. Für die Baukonstruktion im Bestand wird das Modell Invert/ee-Lab eingesetzt.

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen die Bedeutung des kumulierten Energieaufwands für die Bewertung von Bauweisen, Energiestandards und Gebäudetypen. Weiterhin wird deutlich, dass der Energiestandard entscheidend für den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgas-Emissionen der Typgebäude ist. Die Bauweisen haben einen nachrangigen Einfluss auf den kumulierten Energieaufwand, wobei Unterschiede zwischen den betrachteten Bauweisen, insbesondere im Aufbau der Außenwände und Geschossdecken festzustellen sind. Der Vergleich zwischen Sanierung und Neubau zeigt, dass die Erneuerung des Bestandsgebäudes, inklusive neuer Wärmeversorgung mit einem geringeren Energieaufwand als Neubau verbunden ist.

Zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands muss deshalb die Sanierungsaktivität und die Effizianzforderungen an Neubauten und Bestandsanierungen erhöht werden sowie Leichtbau und der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen zu fördern. Dafür sind zentrale politische Instrumente, das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude, die Bundesförderung effiziente Gebäude und das Gebäudeenergiegesetz weiterzuentwickeln.

### **Abstract: Cumulative energy demand as a funding criteria in the building sector**

This project calculates the cumulative energy demand and global warming potential for various reference buildings, both for new and existing buildings. The reference buildings are mapped in great detail according to building components and materials, taking construction practice into account. Based on the results, recommendations are derived that should lead to improved implementation of climate-friendly construction in practice.

The calculation is based on life cycle assessment, a method for quantifying the environmental and climate impact of products, companies and services over their entire life cycle. The calculation covers the entire life cycle of the building, i.e. the production of the building materials, the operation of the building and the dismantling and disposal of the materials used. The cumulative energy demand and greenhouse gas emissions of new buildings and refurbishments are calculated using a combination of several models. As part of this project, several models were developed for the building construction in new buildings, heat supply and room ventilation. The Invert/ee-Lab model is used for building construction in existing buildings.

The results of the project show the importance of cumulative energy consumption for the assessment of construction methods, energy standards and building types. Furthermore, it

becomes clear that the energy standard is decisive for the cumulative energy demand and greenhouse gas emissions of the type buildings. The construction methods have a subordinate influence on the cumulative energy consumption, whereby differences between the construction methods analysed can be observed, particularly in the construction of the external walls and floor slabs. The comparison between refurbishment and new construction shows that the refurbishment of the existing building, including a new heat supply, is associated with lower energy consumption than new construction.

In order to reduce the cumulative energy demand, the refurbishment activity and the efficiency requirements for new and existing buildings must therefore be increased and lightweight construction and the use of renewable raw materials must be promoted. To this end, key political instruments such as the Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude, federal funding for efficient buildings and the Building Energy Act must be further developed.

## Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung und Hintergrund.....	33
1.1	Die Bedeutung der grauen Energie in Gebäuden .....	33
1.2	Aktuelle regulatorische Entwicklungen zur Reduktion der grauen Energie .....	34
1.3	Zielsetzung .....	36
2	Beschreibung des methodischen Vorgehens .....	37
2.1	Grundlagen der Berechnung.....	37
2.1.1	Begrifflichkeiten.....	37
2.1.2	Methodik der Ökobilanzierung.....	37
2.1.3	Datengrundlage der Berechnung.....	38
2.2	Berechnungsmodelle .....	39
2.2.1	Baukonstruktion.....	40
2.2.2	Wärmeversorgung (nur Raumwärme).....	42
2.2.3	Raumlüftung .....	44
2.3	Bezugsgröße der Berechnung und Nutzungsdauer von Bauteilen .....	45
2.4	Vergleich der gewählten Methode mit Rechenregeln des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude.....	46
2.5	Berechnung der Lebenszykluskosten.....	47
3	Berechnungsparameter und Inputdaten.....	49
3.1	Energiestandards .....	49
3.2	Wirkungsindikatoren.....	51
3.3	Referenzgebäude und Bauweisen im Neubau.....	52
3.3.1	Untersuchte Referenzgebäudetypen im Neubau .....	52
3.3.2	Betrachtete Bauweisen im Neubau .....	53
3.3.3	Berechnungsannahmen .....	61
3.4	Referenzgebäude und Bauweisen im Gebäudebestand.....	61
3.4.1	Wohn- und Nichtwohngebäudebestand in Deutschland .....	62
3.4.2	Untersuchte Referenzgebäudetypen im Gebäudebestand .....	66
3.4.3	Betrachtete Bauweisen für die energetischen Sanierung .....	68
4	Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen im Neubau von Gebäuden .....	69
4.1	Einfluss der Energiestandards auf den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen.....	69
4.2	Einfluss der Bauweisen auf den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen.....	74

4.3	Einfluss der Gebäudetypen auf den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen.....	84
4.4	Einfluss der Gebäudetechnik auf den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen.....	87
4.5	Sensitivitäten.....	90
4.5.1	Veränderung des kumulierten Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen bei Bezugnahme auf Haushaltsgröße .....	90
4.5.2	Veränderung des kumulierten Energieaufwands und Treibhausgasemissionen bei Erhöhung der Bauteilnutzungsdauer .....	92
4.6	Zwischenfazit.....	94
5	Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen bei der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden .....	96
5.1	Einfluss des energetischen Ausgangszustands auf den kumulierten Energieaufwand .....	96
5.2	Einfluss des erzielten Energiestandards auf den kumulierten Energieaufwand .....	97
5.3	Einfluss der Baualtersklasse auf den kumulierten Energieaufwand.....	100
5.4	Einfluss der Gebäudetypen auf den kumulierten Energieaufwand.....	102
5.5	Unterschiede bei verschiedenen Sanierungsoptionen .....	105
5.6	Neubau und Bestandsgebäude im Vergleich .....	109
5.7	Zwischenfazit.....	110
6	Kosten für Neubau und die energetische Sanierung.....	112
6.1	Lebenszykluskosten für ausgewählte Varianten im Neubau .....	112
6.2	Lebenszykluskosten ausgewählte Bestandsgebäude .....	115
7	Zusammenfassung und Fazit .....	119
8	Handlungsempfehlungen .....	122
8.1	Herausforderungen bei der Reduktion von grauer Energie und der Treibhausgasemissionen und bei der Umsetzung klimafreundlichen Bauens .....	122
8.2	Erhöhung der Energieeffizienz in der Nutzungsphase von Gebäuden .....	123
8.3	Reduktion der grauen Energie und Emissionen von Gebäuden .....	124
8.3.1	Durch veränderte Bauweisen und Gebäudekonzepte.....	125
8.3.2	Durch den Einsatz energieeffizienter Materialien und Ressourceneffizienz im Bau.....	126
8.3.3	Durch Einsatz emissionsreduzierter und dekarbonisierter Materialien.....	127
8.4	Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung in Gebäuden.....	128
8.5	Weiterentwicklung und Ergänzung der bestehenden Fördermechanismen.....	129
8.6	Verbesserung der Datengrundlage für die Berechnung der Lebenszyklusemissionen .....	131
9	Quellenverzeichnis .....	132
A.1	Flächen und Rauminhalte .....	140

A.2	Wärmeübergangswiderstände nach Bauteilen .....	142
A.3	Datenbank an Baustoffen für opake Bauteile.....	143
A.4	Datenbank an Baustoffen für transparente Bauteile.....	145
A.5	Faktoren zur Berechnung von inhomogenen Bauteilen .....	145
A.6	Aufbau der Bauteile von Bestandsgebäuden.....	148
A.7	Heizwärmebedarf und installierte Leistung von Nichtwohngebäuden .....	152
A.8	Beispielrechnung.....	153
A.9	Zusammenfassung des Fachgesprächs .....	154
A.10	Modellbeschreibung Invert/ee-Lab .....	155

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anzahl der Baufertigstellungen nach überwiegend verwendetem Baustoff im Neubau von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Zeitraum 2016 bis 2021 .....	34
Abbildung 2:	Lebenszyklus von Gebäuden bzw. einzelner Komponenten ....	38
Abbildung 3:	Methodik zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands (und weiteren Klima- und Umweltauswirkungen) der Baukonstruktion von Neubauten .....	40
Abbildung 4:	Heizwärmebedarf und installierte Leistung der verschiedenen Wohngebäudetypen und Energiestandards.....	50
Abbildung 5:	Definition des kumulierten Energieaufwands.....	51
Abbildung 6:	Aufbau der Varianten im Neubau .....	54
Abbildung 7:	Wohngebäude in Deutschland nach Baualter.....	62
Abbildung 8:	Außenwandtypen von Wohngebäuden in Deutschland .....	63
Abbildung 9:	Anzahl der Nichtwohngebäude nach Gebäudetyp und Baualtersklasse.....	64
Abbildung 10:	Mittlere Energiebezugsfläche der Nichtwohngebäude nach Gebäudetyp und Baualtersklasse.....	65
Abbildung 11:	Mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient der Nichtwohngebäude nach Gebäudetyp und Baualtersklasse .....	66
Abbildung 12:	Übersicht über die Varianten der energetischen Sanierung nach Bauteilen.....	68
Abbildung 13:	Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [Einfamilienhaus] .....	70
Abbildung 14:	Anteile des kumulierten Energieaufwands nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [Einfamilienhaus].....	71
Abbildung 15:	Anteile des kumulierten Energieaufwands (unterschieden nach erneuerbar und nicht erneuerbar) nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [Einfamilienhaus] .....	72
Abbildung 16:	Kumulierter Energieaufwand nach Bauteilen und Effizienzstandards in der Herstellungsphase [Einfamilienhaus] .....	73
Abbildung 17:	Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [Einfamilienhaus, Gas-Brennwärmtauschler].....	74
Abbildung 18:	Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Bauweisen [Einfamilienhaus].....	75
Abbildung 19:	Treibhausgasemissionen (biogen und fossil) nach Lebenswegmodulen und Bauweisen [Einfamilienhaus].....	77

Abbildung 20:	Kumulierter Energieaufwand nach Bauteilen und Bauweisen in der Herstellungsphase [Einfamilienhaus, ohne Wärmeversorgung und Raumlüftung].....	78
Abbildung 21:	Kumulierter Energieaufwand nach Materialien und Bauweisen in der Herstellungsphase [Einfamilienhaus, ohne Wärmeversorgung und Raumlüftung].....	79
Abbildung 22:	Kumulierter Energieaufwand nach Lebenswegmodulen und Konstruktionen der Außenwand [Einfamilienhaus] .....	81
Abbildung 23:	Kumulierter Energieaufwand nach Lebenswegmodulen und Bauweisen [Einfamilienhaus] .....	82
Abbildung 24:	Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und Bauweisen [Verwaltungsgebäude] .....	83
Abbildung 25:	Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und Gebäudetypen.....	85
Abbildung 26:	Anteile des kumulierten Energieaufwands nach Lebenswegmodulen und Gebäudetypen .....	86
Abbildung 27:	Einfamilienhaus - Veränderung des kumulierten Energieaufwands bei Bau eines Kellers und Flachdaches .....	87
Abbildung 28:	Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen verschiedener Wärmeversorgungssysteme [Erzeugung und Verteilung].....	88
Abbildung 29:	Kumulierter Energieaufwand verschiedener Wärmeversorgungssysteme in der Herstellungsphase (A1-A3) nach Komponenten .....	89
Abbildung 30:	Kumulierter Energieaufwand in der Herstellungsphase der Wärmeversorgungssysteme und installierte Leistung nach verschiedenen Energiestandards .....	90
Abbildung 31:	Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen bei Bezugnahme auf Haushaltsgröße nach Lebenswegmodulen und Gebäudetypen .....	92
Abbildung 32:	Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen bei Erhöhung der Nutzungsdauer nach Lebenswegmodulen und Energiestandards.....	93
Abbildung 33:	Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] eines unsanierten und teilsanierten Einfamilienhauses im Ausgangszustand und bei energetischer Hüllensanierung.....	97
Abbildung 34:	Dämmdicke und kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] für verschiedene Energiestandards im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle .....	98
Abbildung 35:	Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen für die energetische Sanierung der	

	Gebäudehülle nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards.....	99
Abbildung 36:	Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen für die energetische Sanierung nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [mit Tausch des Wärmeversorgungssystem].....	100
Abbildung 37:	Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] eines Einfamilienhauses in verschiedenen Baualtersklassen im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard .....	101
Abbildung 38:	Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] verschiedener Wohngebäudetypen im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard .....	102
Abbildung 39:	Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] verschiedener Nichtwohngebäudetypen im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard .....	103
Abbildung 40:	Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] verschiedener Nichtwohngebäudetypen im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle auf Effizienzhaus-Stufe 55 .....	105
Abbildung 41:	Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen verschiedener Dämmstoffe bei der Komplettsanierung eines Steildaches auf GEG-Standard.....	106
Abbildung 42:	Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen verschiedener Dämmstoffe bei der Sanierung einer Außenwand auf GEG-Standard .....	107
Abbildung 43:	Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen verschiedener Dämmstoffe bei Sanierung der obersten Geschossdecke auf GEG-Standard.....	108
Abbildung 44:	Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen von Neubau und Bestand .....	109
Abbildung 45:	Resultierende U-Werte nach Bauteilen für Neubau und Bestand .....	110
Abbildung 46:	Gesamtkosten verschiedener Energiestandards im Neubau von einem Einfamilienhaus in Massivbauweise.....	113
Abbildung 47:	Investitionskosten für den Neubau eines Einfamilienhauses nach Bauteilen und Energiestandards.....	114
Abbildung 48:	Investitionskosten für den Neubau eines Einfamilienhauses nach Bauteilen für verschiedene Bauweisen .....	115
Abbildung 49:	Gesamtkosten verschiedener Energiestandards bei Sanierung eines Einfamilienhauses .....	116

Abbildung 50:	Investitionskosten für verschiedene Effizienzhaus-Stufen und die gesetzlichen Anforderungen .....	117
Abbildung 51:	Investitionskosten für verschiedene Varianten der Sanierung der Außenwand .....	118
Abbildung 52:	Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab.....	156
Abbildung 53:	Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab .....	157
Abbildung 54:	Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten .....	158
Abbildung 55:	Modellierung von Politikinstrumenten in Invert/ee-Lab.....	158

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definition verwendeter Begrifflichkeiten.....	37
Tabelle 2:	Lebenswegmodule in der ÖKOBAUDAT .....	38
Tabelle 3:	Faktoren der Potenztrendlinie der Wärmeversorgungssysteme .....	42
Tabelle 4:	Treibhauspotenzial und Primärenergiefaktoren der Energieträger .....	43
Tabelle 5:	Zuordnung der Lüftungsart auf Gebäudetyp und Energiestandard .....	44
Tabelle 6:	Angenommene Luftwechselraten nach Gebäudetypen.....	45
Tabelle 7:	Berücksichtigte Nutzungsdauer von Bauteilen [in Jahren] .....	45
Tabelle 8:	Vergleich der Methodik des QNG mit den Berechnungsannahmen in diesem Projekt.....	46
Tabelle 9:	Endverbraucherpreise für Erdgas und Strom [in ct/kWh].....	47
Tabelle 10:	U-Werte nach Bauteilen der betrachteten Energiestandards [in W/ (m <sup>2</sup> ·K)] im Neubau .....	49
Tabelle 11:	Anforderungen an den Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust von sanierten Gebäuden .....	50
Tabelle 12:	Abmessungen der Wohngebäude nach Gebäudetypen .....	52
Tabelle 13:	Abmessungen der Nichtwohngebäude nach Gebäudetypen...	53
Tabelle 14:	Berücksichtigte Kostengruppe nach DIN 276 .....	53
Tabelle 15:	Varianten der monolithischen Massivbauweisen nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien	55
Tabelle 16:	Definierte Varianten in zweischaliger Massivbauweise nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien	56
Tabelle 17:	Definierte Varianten in Massivholzbauweise nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien.....	57
Tabelle 18:	Definierte Varianten in Holzleichtbauweise nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien.....	57
Tabelle 19:	Definierte Varianten in Beton-Skelettbauweise nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien.....	58

Tabelle 20:	Definierte Varianten in Holz-Skelettbauweise nach Bauteilen und mit relevanten Materialien .....59
Tabelle 21:	Bauteilkategorien und Materialien im Aufbau der Bodenplatte .....59
Tabelle 22:	Bauteilkategorien und Materialien im Aufbau des Kellers.....60
Tabelle 23:	Bauteilkategorien und Materialien im Aufbau der Dachkonstruktionen .....60
Tabelle 24:	Wärmedämmung nach Außenwandtyp .....63
Tabelle 25:	Unterscheidung der Referenzgebäude im Wohngebäudebereich .....66
Tabelle 26:	Endenergiebedarf der Nichtwohngebäude nach Baualtersklassen [in kWh/m <sup>2</sup> Nutzfläche] .....67
Tabelle 27:	Durchschnittliche Anzahl an Wohnungen und Personen nach Gebäudetypen .....91
Tabelle 28:	Verlängerte Nutzungsdauern von Bauteilen in Gebäuden .....92
Tabelle 29:	Gliederung der Flächen und Rauminhalte im Hochbau .....140
Tabelle 30:	Faktoren zur Umrechnung der Bruttogrundfläche auf Wohn- und Nutzfläche .....140
Tabelle 31:	Wohnfläche in Bestandsgebäuden nach Gebäudetyp und Baualtersklasse .....140
Tabelle 32:	Wärmeübergangswiderstand R.....142
Tabelle 33:	Übersicht über die Wärmeleitfähigkeit (Bemessungswert) und der Nutzungsdauer verschiedener Materialien .....143
Tabelle 34:	Übersicht über die Wärmeleitfähigkeit und der Nutzungsdauer verschiedener Materialien .....145
Tabelle 35:	Faktoren zur Berechnung der Fläche von inhomogenen Bauteilen.....145
Tabelle 36:	Faktoren zur Berechnung des Volumens von inhomogenen Bauteilen.....147
Tabelle 37:	Verschiedenen Optionen zum Aufbau der Bauteile von Bestandsgebäuden .....148
Tabelle 38:	Heizwärmebedarf und installierte Leistung der verschiedenen Nichtwohngebäudetypen und Energiestandards.....152

## Formelverzeichnis

Formel 1:	Normierung der Ergebnisse .....45
-----------	-----------------------------------

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BEG	Bundesförderung Effiziente Gebäude
BGF	Bruttogrundfläche
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
BSH	Brettstapelholz
BWKZ	Bauwerkszuordnungskatalog
CAPEX	Capital Expenditures, Investitionsausgaben
CRCF	Carbon Removal Certification Framework
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
CONIC	Construction Impact Calculator
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPS	Expandiertes Polystyrol
EFH	Einfamilienhaus
EH	Effizienzhaus
EWP	Sole-Wasser-Wärmepumpe
GBK	Gasbrennwertkessel
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GMH	Großes Mehrfamilienhaus
GWP	Global Warming Potential
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KfN	Klimafreundlicher Neubau
Kfz	Kraftfahrzeug
KSG	Klimaschutzgesetz
KVH	Konstruktionsvollholz
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
LULUC	Land use and land use change
LWP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
MFH	Mehrfamilienhaus
MMH	Mittleres Mehrfamilienhaus

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
<b>KMH</b>	Kleines Mehrfamilienhaus
<b>NWG</b>	Nichtwohngebäude
<b>NF</b>	Nutzfläche
<b>NGF</b>	Nettogrundfläche
<b>OSB</b>	Oriented Strand Board
<b>PE</b>	Primärenergie
<b>PER</b>	Primary Energy Renewable
<b>PERM</b>	Primary Energy Renewable Material
<b>PENR</b>	Primary Energy Non Renewable
<b>PENRE</b>	Primary Energy Non Renewable Energy
<b>PENRM</b>	Primary Energy Non Renewable Material
<b>PIR</b>	Polyisocyanurat-Hartschaum
<b>QNG</b>	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
<b>RH</b>	Reihenhaus
<b>TGA</b>	Technische Gebäudeausrüstung
<b>THG</b>	Treibhausgasemissionen
<b>TJI</b>	Doppel-T-Träger
<b>WDVS</b>	Wärmedämmverbundsystem
<b>WF</b>	Wohnfläche
<b>WRG</b>	Wärmerückgewinnung
<b>WSchVO</b>	Wärmeschutzverordnung
<b>XPS</b>	Extrudiertes Polystyrol

## Zusammenfassung

### Ziel und Hintergrund

Auf dem Weg hin zu klimafreundlichem Bauen und treibhausgasneutralem Gebäudebestand sind noch zahlreiche Hürden zu überwinden. Nicht nur müssen die direkten Treibhausgasemissionen von Gebäuden bis 2030 um mehr als 40 % reduziert werden (Bundesregierung 2022), auch die grauen Emissionen von Gebäuden müssen signifikant sinken. Dabei besteht die Herausforderung, dass der Gebäudesektor im Klimaschutzgesetz ausschließlich die direkten Treibhausgasemissionen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe umfasst. Die Treibhausgasemissionen durch Stromeinsatz in Gebäuden ist allerdings im Energiesektor, die Herstellung von Bauprodukten, die Errichtung und der Rückbau von Gebäuden und das Recycling von Bauprodukten im Industriesektor des Klimaschutzgesetz verortet. Für klimafreundliche Gebäude sind deshalb sektorübergreifende Anstrengungen sinnvoll (Deurer *et al.* 2023). Politische Aktivitäten in diesem Zusammenhang sind das Förderprogramm Klimafreundlicher Neubau (in Zusammenhang mit dem Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude), die Novelle der Europäischen Gebäuderichtlinie mit der verpflichtenden Ökobilanzierung von neuen Gebäuden ab 2028, die Anforderungen der Taxonomie und Nachhaltigkeitsberichterstattung mit Auswirkungen auf Baustoffe, und der Zertifizierungsrahmen für die Kohlenstoffentnahme.

Zur Bewertung der Klimaauswirkungen von Gebäuden werden in diesem Vorhaben der kumulierte Energieaufwand, das Treibhauspotenzial und die Lebenszykluskosten für verschiedene Energiestandards, Bauweisen und Gebäudetypen im Neubau und Gebäudebestand bei jeweils unterschiedlichen Bauteilaufbauten quantifiziert. Die Referenzgebäude werden dabei sehr detailliert nach Bauteilen und Materialien unter Berücksichtigung der Baupraxis abgebildet.

Die Berechnung erfolgt über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, also über die Herstellung der Baustoffe, den Betrieb des Gebäudes sowie den Rückbau und die Entsorgung der eingesetzten Materialien. Der Fokus liegt dabei auf der Herstellungsphase, da die damit verbundenen Klimaauswirkungen unmittelbar auftreten und deshalb verstärkt adressiert werden müssen. Aufbauend auf den Ergebnissen werden Empfehlungen abgeleitet, die zu einer verbesserten Umsetzung klimafreundlichen Bauens in der Praxis führen sollen. Darüber hinaus können auf Basis der Studie die zahlreichen Hürden auf dem Weg zum klimafreundlichen Bauen abgeleitet werden.

Die durchgeführten Untersuchungen entsprechen somit einer Ergänzung des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude, da eine Vielzahl von Referenzgebäuden betrachtet wird, unabhängig von einem Anforderungswert, nach dem die in den Referenzgebäuden eingesetzten Materialien bewertet werden.

### Methodisches Vorgehen

Grundlage der Berechnung ist die Ökobilanzierung, als Methode zur Quantifizierung des Umwelteinflusses von Produkten, Unternehmen und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus. Ein standardisiertes Vorgehen wird in den ISO-Standards 14040 (2021-02) und 14044 (2021-02) festgelegt, was ein einheitliches, transparentes und vergleichbares Vorgehen ermöglicht.

Zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands und des Treibhauspotenzials wird die ÖKOBAUDAT eingesetzt. Die Datenbank bildet die Umweltauswirkungen und Primärenergieaufwände von Bauprodukten über den gesamten Lebenszyklus unter inländischen Produktionsbedingungen ab. Für die Berechnungen der Studie wird die Version

2023-I, die derzeit gültige Bilanzierungsmethode DIN EN 15804 (2022-03) + A2 und generische Datensätze verwendet sowie nahezu alle Module der ÖKOBAUDAT berücksichtigt. Transportprozesse sowie Reparatur, Ersatz und Umbau/Erneuerung werden nicht betrachtet.

Die Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen von Neubauten und Bestandssanierungen erfolgt im Verbund mehrerer Modelle.

Das Modell *CONIC (Construction Impact Calculator)* berechnet die Klima- und Umweltauswirkungen der Baukonstruktion im Neubau. Das Modell wurde im Rahmen des Projektes entwickelt. In das Modell wird der Aufbau der unterschiedlichen Varianten nach Bauweise und Gebäudetyp sowie die Eigenschaften der Materialien und gebäudespezifischen Informationen eingegeben. Im Rahmen des Projektes werden sowohl Wohn- als auch Nichtwohngebäude sowie insgesamt sieben unterschiedliche Bauweisen betrachtet. Für alle Bauweisen wird der Aufbau anhand spezifischer Bauteile und Materialien definiert. Modellendogen wird dann die Dämmdicke nach Bauteilen auf Basis der erforderlichen U-Werte berechnet. Über den Wärmedurchlasswiderstand R und den Wärmedurchgangskoeffizient U wird die Dämmdicke iterativ anhand des zu erreichenden Energiestandards definiert. Anschließend werden mithilfe der Gebäudeabmessungen die Flächen und Volumina von Bauteilen und Materialien bestimmt und mit der ÖKOBAUDAT gekoppelt, um die Klima- und Umweltauswirkungen zu berechnen.

Für die Berechnung der Klimaauswirkungen von Bestandssanierungen wird das Modell *Invert/ee-Lab* mit der ÖKOBAUDAT gekoppelt. Mit dem Modell lassen sich der kumulierte Energieaufwand, die Treibhausgasemissionen sowie die Investitionskosten für eine Vielzahl von unterschiedlichen Referenzgebäuden und unterschiedliche Energiestandards automatisiert berechnen. In diesem Vorhaben wird der Gebäudebestand über die hinterlegte Referenzgebäudedatenbank im Modell *Invert/ee-lab* berechnet, die auf den Untersuchungen der Gebäudetypologie und den weiteren Untersuchungen zum Sanierungszustand im deutschen Gebäudebestand beruhen. Es wird nicht die Errichtung der Gebäude und die Herstellung aller Gebäudekomponenten untersucht, sondern nur der Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen für die Baumaßnahmen, die mit der energetischen Sanierung auf unterschiedliche Energiestandards verbunden sind. Dabei werden alle nachträglich aufgetragenen Materialien (Dämmmaterial, Putz, Armierung, Fensterglas, Rahmen etc.) und der energetische Ausgangszustand der Gebäude berücksichtigt. Das Modell berechnet mithilfe eines linearen Optimierungsmodell, welche Effizienzmaßnahmen erforderlich sind, um die vorgegebenen Energiestandards mit Bezug auf die Gesamtenergieeffizienz der Gebäudehülle zu erreichen. Der spezifische Transmissionswärmekoeffizient ( $Ht'$ ) des jeweiligen Energiestandards geht somit als Nebenbedingung in die Optimierung ein. Anschließend werden die Materialmengen unterschiedlicher Konstruktionsvariante für die zu sanierenden Komponenten und die damit verbundenen energetischen Kennwerte und Treibhausgasemissionen durch direkte Kopplung mit der ÖKOBAUDAT analog zur Berechnung im Neubau ermittelt.

Weitere, excel-basierte Modelle, wurden für die Berechnung der Klimaauswirkungen der Wärmeversorgung und Raumlüftung entwickelt.

Das Modell für die Wärmeversorgung berechnet auf Basis von Referenz-Wärmeversorgungssystemen den kumulierten Energieaufwand und das Treibhauspotenzial für unterschiedliche Leistungsgrößen von Heizungstechniken, Gebäudetypen und Sanierungszustände von Gebäuden. Das Modell umfasst dabei die Heiztechnik und das notwendige Verteilsystem. Betrachtet werden Gasbrennwertkessel sowie eine Luft-Wasser-Wärmepumpe und Sole-Wasser-Wärmepumpe. Die verschiedenen Wärmeversorgungssysteme

werden anhand der Masse in Bezug auf die Heizleistung skaliert. Für die Berechnung der Klimaauswirkungen der Herstellungs- und Entsorgungsphase wird die Ecoinvent-Datenbank verwendet.

Für die Berechnung des kumulierten Energieaufwand und der THG-Emissionen in der Nutzungsphase wird der Nutzenergiebedarf der verschiedenen Referenzgebäude benötigt. Anhand des Nutzenergiebedarfs wird schließlich der End- und Primärenergiebedarf berechnet und anschließend auf die Wohnfläche bezogen. Für Bestandsgebäude wird der Nutzenergiebedarf für Raumwärme, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung für die verschiedenen Gebäudetypen und Energiestandards mit dem Modell Invert/ee-lab berechnet. Für die Berechnung des Nutzenergiebedarfs der Neubauten wird die Software „Energieberater 18599 3D PLUS“ von Hottgenroth (2023) eingesetzt.

Da eine Nutzungsdauer von 20 Jahren für die Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung unterstellt wird, werden mit 259 g/ kWh das Treibhauspotenzial und mit 1,71 der Primärenergiefaktor eines Strom-Mixes im Jahr 2030 berücksichtigt (Fritsche und Greß 2022). Für Erdgas wird ein Treibhauspotenzial von 246 g/ kWh und ein Primärenergiefaktor von 1,1 angenommen.

Die Auslegung der Lüftungsanlagen erfolgt nach DIN 1946-6 (2029-12). Anhand der Luftwechselrate, der Leistungsaufnahme und Betriebsstunden der Lüftungsanlagen werden dann der kumulierte Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus berechnet.

Der berechnete kumulierte Energieaufwand (kWh) aus Konstruktion und technischer Gebäudeausrüstung wird schließlich auf die spezifische Wohn- bzw. Nutzfläche und die spezifische Bauteilnutzungsdauer normiert (kWh/(m<sup>2</sup>a)). Diese Methode ermöglicht die Bewertung des kumulierten Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen des Gebäudes aus heutiger Sicht. Weiterhin ist durch die Annualisierung der Ergebnisse und Normierung auf die Wohn- bzw. Nutzfläche ein direkter Vergleich des kumulierten Energieaufwands und Umweltauswirkungen der eingesetzten Baustoffe, technischen Gebäudeausrüstung und der Betriebsphase des Gebäudes möglich.

Für eine ganzheitliche Bewertung der Kosten für die dargestellten Gebäude erfolgt eine Berechnung der Lebenszykluskosten für ausgewählte Varianten. Die Lebenszykluskosten bzw. Gesamtkosten umfassen die Investition, den Energiebezug und die Wartung. Ersatzinvestitionen werden nicht berücksichtigt.

## **Zentrale Ergebnisse und Handlungsempfehlungen**

### Bedeutung des kumulierten Energieaufwands

In dieser Studie wurde sowohl der erneuerbare als auch der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf der verschiedenen Bauweisen, Gebäudetypen und Energiestandards berechnet. Dabei wurde deutlich, dass der Energieaufwand in der Herstellungsphase sowie im Abriss und der Entsorgung überwiegend nicht erneuerbar ist. In der Nutzungsphase ist der Energieaufwand jedoch überwiegend erneuerbar, was insbesondere auf den unterstellten Strom-Mix im Jahre 2030 zurückzuführen ist, der bereits einen hohen Anteil erneuerbarer Energien aufweist.

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Dekarbonisierung von Industrieprozessen und dem Ausbau der erneuerbaren Energie im Stromsystem ist die Ergänzung um den erneuerbaren Energieaufwand wichtig, da diese Energie zwar aus erneuerbaren Quellen stammt, dafür jedoch auch Erzeugungskapazitäten (Photovoltaik-Anlagen, Windräder usw.) errichtet werden müssen.

Für eine vollständige Bewertung von Materialien und Bauprodukten ist deshalb bei der Ökobilanzierung (u.a. bei Zertifizierung nach Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude) die Analyse des gesamten Primärenergieaufwands zu empfehlen.

### Energieeffizienz von Gebäuden

Entscheidend für den kumulierten Energieaufwand und die fossilen Treibhausgasemissionen ist der Energieeffizienzstandard der Gebäude, unabhängig von Neubau und Bestand. Mit steigender Energieeffizienz sinken der Primärenergieaufwand und die Treibhausgasemissionen während der Nutzungsphase der Gebäude deutlich. Dabei steigt der kumulierte Energieaufwand in der Herstellungsphase der Materialien leicht an, diese Steigerung ist jedoch im Vergleich zur Reduktion des Primärenergieaufwands in der Nutzungsphase zu vernachlässigen. Die Darstellung der Lebenszykluskosten zeigt zudem, dass Energieeffizienz die Kosten in der Betriebsphase reduziert und die Kostensteigerungen zur Umsetzung der erhöhten Anforderungen an die Energieeffizienz marginal sind.

Insgesamt ist das Verhältnis des Energieaufwands in der Herstellungsphase zur Reduktion des Primärenergieaufwands in der Nutzungsphase bei energetischer Sanierung im Bestand deutlich niedriger als bei Neubauten. Der Fokus der Aktivitäten zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen sollte deshalb auf der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden und nicht im Neubau von Gebäuden liegen. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass die Ertüchtigung des Gebäudebestands (unter bestimmten Voraussetzungen) über den Lebenszyklus mit geringeren Klimaauswirkungen als der Neubau von Gebäuden verbunden ist. Gleichwohl gilt: Wenn schon Neubau, dann mit höchster Energieeffizienz.

In Bezug auf die Energieeffizienz von Gebäuden ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- ▶ *Erhöhte Sanierungsaktivität:* Umfassende Vorschläge für eine Steigerung der Sanierungsrate und -tiefe sind bereits in zahlreichen Studien enthalten. Als Beispiele sind die Erhöhung der Förderquoten und -budgets, die Stärkung der individuellen Sanierungsfahrpläne, die Serielle Sanierung und Mindesteffizienzstandards für Bestandsgebäude zu nennen (Rother *et al.* 2020; Steinbach *et al.* 2021; Repenning *et al.* 2023). Die Erhöhung der Sanierungsrate alleine kann jedoch zu gefährlichen Lock-in-Effekten führen, wenn der Wärmeschutz nicht ausreichend verbessert wird. Gleichzeitig ist eine wesentliche Erhöhung der Sanierungsrate volkswirtschaftlich kaum leistbar. Entscheidend ist daher die Erhöhung der Sanierungstiefe: Wenn ein Bauteil erneuert wird, dann auf ein zielführendes Niveau. Als zielführend erweist sich in dieser Studie unter allen Gesichtspunkten die Effizienzhaus-Stufe 40 bzw. daraus abgeleitete Qualitäten für die Sanierung des Gebäudebestandes.
- ▶ *Ordnungsrechtliche Verschärfung der Effizienzanforderungen für Neubauten und Bestandssanierungen:* Die Bedeutung der Effizienzstandards bei energetischer Sanierung und Neubauten wird bereits in einer Reihe von Studien adressiert, die eine Verschärfung der ordnungsrechtlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden aufgreifen und Empfehlungen zur Umsetzung aussprechen (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2020; Rother *et al.* 2020; Steinbach *et al.* 2021; Repenning *et al.* 2023).
- ▶ *Heranziehen der Heizlast als Indikator zur Bewertung von Gebäuden:* Je geringer die Heizlast des Gebäudes, desto geringer ist auch die installierte Leistung des Wärmeerzeugers. Insbesondere bei der Installation von Wärmepumpen in sanierten Gebäuden ist die Betrachtung der Heizlast zu empfehlen. Je geringer die Heizlast durch einen höheren Effizienzstandard, desto geringer der Stromverbrauch der Wärmepumpe. Der Stromverbrauch von Wärmepumpen hat unmittelbare Auswirkungen auf das Stromsystem, da bei zunehmender Elektrifizierung des Gebäudesektors auch Lastspitzen durch Beheizung

entstehen. Eine geringe Heizlast wird insbesondere durch einen hohen Wärmeschutz der Gebäudehülle inkl. Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung begünstigt.

### Reduktion der grauen Energie von Gebäuden

Verglichen mit der Energieeffizienz von Gebäuden ergeben sich hinsichtlich der unterschiedlichen Bauweisen geringere Potenziale zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen. Nichtsdestotrotz sollte die Herstellungs- und Errichtungsphase nicht vernachlässigt werden.

Ein Gebäude in Holzleichtbauweise hat bei gleichen Energiestandards den geringsten, ein Gebäude in Massivbauweise mit Wärmedämmverbundsystem den höchsten kumulierten Energieaufwand. Dazwischen liegen die monolithische Massivbauweise und der Massivholzbau. Die Unterschiede zwischen den Bauweisen liegen insbesondere im Aufbau der Außenwände und Geschossdecken. Die Vorteile des Holzleichtbaus liegen insbesondere in der Balken- und Rahmenkonstruktion. Durch den punktuellen Einsatz von Holz als tragende Elemente in den Außenwänden und Geschossdecken kann der kumulierte Energieaufwand im Vergleich der Bauweisen deutlich reduziert werden. Im Gegensatz dazu resultieren in den Massivbauweisen, auch für den Massivholzbau, aufgrund des flächendeckenden Materialeinsatzes höhere Energieaufwände. Weiterhin bestehen Unterschiede zwischen verschiedenen Bauteilaufbauten innerhalb der gleichen Bauweise. Reduktionspotenziale ergeben sich durch den Einsatz von Stegträgern im Vergleich zu Vollholz. Weiterhin sind Unterschiede zwischen den Massivbauweisen zu beobachten, die auf die eingesetzten Bauprodukte (Dämmung und Tragwerk) zurückzuführen sind. Die Bauprodukte Kalksandstein, Ziegel und Stahlbeton sind mit unterschiedlichen Produktionsverfahren und damit auch Energieaufwänden und Treibhausgasemissionen verbunden. In der Analyse resultiert für Stahlbeton der höchste Energieaufwand und für Mauerziegel der geringste. Dabei ist jedoch der Bewehrungsanteil zu berücksichtigen.

Allerdings liegt die Klimawirkung aller Bauweisen deutlich über der für eine Zielerreichung notwendigen Treibhausgasemissionen und muss in den nächsten Jahren reduziert werden. Dafür ist neben der Etablierung des Leichtbaus (auch im Massivbau) auch die Dekarbonisierung von Bauprodukten notwendig.

Darüber hinaus zeigt der Vergleich nachwachsender und fossiler Baustoffe bei der Sanierung im Bestand die Unterschiede beim Primärenergieaufwand von verschiedenen Dämmstoffen. Dabei wird deutlich, dass nachwachsende Rohstoffe nicht immer mit geringeren Klimaauswirkungen als synthetische oder mineralische Dämmstoffe verbunden sind. Der Primärenergieaufwand hängt vom Verarbeitungsgrad der Materialien sowie deren Dichte ab und ist zum Beispiel bei Faserdämmstoffen niedriger als bei Plattendämmstoffen. Während (schwere) Holzfaserdämmplatten also mit einem hohen Energieaufwand verbunden sind, sind leichtere Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (Holz- und Zellulosefasern als Einblasdämmstoffe, Hanf, Stroh und Flachs sowie Mineralwolle) mit einem niedrigeren Energieaufwand als erdölbasierte Produkte verbunden. Bauprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen können jedoch nicht nur den kumulierten Energieaufwand von Gebäuden reduzieren, sondern tragen auch zur Speicherung von Kohlenstoff in Gebäuden bei.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass kompakte Gebäude, also solche mit einem niedrigen A/V-Verhältnis, weniger graue Energie benötigen. Durch die geringere Gebäudehüllfläche reduziert sich der Materialeinsatz, wodurch sich wiederum der Energieaufwand in der Herstellungsphase des Gebäudes reduziert. Das A/V-Verhältnis hat damit auch Auswirkungen auf den Betrieb, da sich bei einer geringeren Gebäudehüllfläche weniger Wärmeverluste ergeben. Es ist deshalb zu empfehlen, Bauweisen und Gebäudetypen zu fördern,

die das Zusammenleben vieler Menschen ermöglichen und dabei weniger Ressourcen benötigen. Je weniger Wohnfläche pro Person in Anspruch genommen wird, desto geringer sind auch die Pro-Kopf-Emissionen.

Weiterhin entscheidet auch die Nutzungsdauer von Bauprodukten über die graue Energie von Gebäuden. Bei Erhöhung der angenommenen Nutzungsdauern wird der kumulierte Energieaufwand und die fossilen Treibhausgasemissionen signifikant reduziert. Das bedeutet, dass in der Praxis eine möglichst lange Lebensdauer von Bauteilen angestrebt werden sollte. Dies setzt wiederum die ständige Instandsetzung und Sanierung von Gebäuden oder die Weiternutzung von Bauprodukten voraus. Damit Bauprodukten jedoch weitergenutzt werden können, müssen diese zunächst erfasst und dann vertrieben werden. Die Voraussetzung dafür wird durch einen digitalen Gebäuderessourcenpass geschaffen.

In Bezug auf die graue Energie von Gebäuden ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- ▶ Förderung von ressourceneffizientem Bauen (bspw. durch Leichtbau)
- ▶ Ausbau der Infrastruktur für gebrauchte Bauprodukte und Förderung des Einsatzes
- ▶ Implementierung des Gebäuderessourcenpasses
- ▶ Förderung von emissionsreduzierten bzw. dekarbonisierten Materialien

#### Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung in Gebäuden

Bei Betrachtung der Treibhausgasemissionen werden weitere Unterschiede zwischen den Bauweisen sichtbar. Die berechneten Treibhausgasemissionen umfassen sowohl fossile als auch biogene Emissionen, wobei der Fokus auf den fossilen Treibhausgasemissionen liegt. Fossile Treibhausgasemissionen entstehen durch den Einsatz fossiler Energieträger in der Herstellungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase und orientieren sich damit am kumulierten Energieaufwand. Biogene Treibhausgasemissionen resultieren in Form von gespeichertem Kohlenstoff (CO<sub>2</sub>) in Holz und pflanzlichen Baustoffen und in Form von Emissionen beim Einsatz von Biomasse als Energieträger sowie bei der Verbrennung der Baustoffe. Negative biogene Treibhausgasemissionen resultieren vor allem im Holzbau, durch die Speicherung von CO<sub>2</sub> in der Herstellungsphase, am Lebensende (Modul C3) werden diese wieder freigesetzt. Der Zeitpunkt der Freisetzung ist dabei von der Nutzungsdauer der Materialien abhängig. Je länger die Materialien verwendet und ggf. auch mehrmals in Gebäuden eingesetzt werden, desto länger wird das CO<sub>2</sub> gebunden. Die Verwendung von CO<sub>2</sub>-speichernden Materialien ist auch in Bezug auf den Carbon Removal Certification Framework relevant.

Durch die Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit von Materialien als zentrales Förderkriterium kann der Gebäudebestand als CO<sub>2</sub>-Senke ausgebaut werden. Dadurch kann auch der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen erhöht werden. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass auch die fossilen Treibhausgasemissionen möglichst gering sind und nicht durch die biogenen Treibhausgasemissionen aufgewogen werden. Die Berechnungen zeigen, dass im Neubau der Holzleichtbau die Bauweise mit dem geringsten kumulierten Energieaufwand und den geringsten fossilen Treibhausgasen ist. Der Massivholzbau stellt die größte CO<sub>2</sub>-Senke dar, hat jedoch einen höheren kumulierten Energieaufwand als die Holzleichtbauweise. Zudem ist es im Sinne der Materialeffizienz geboten, die begrenzte Ressource Holz nicht in massiven Holzkonstruktionen, sondern sparsam, statischen Erfordernissen entsprechend einzusetzen.

#### Weiterentwicklung der bestehenden Fördermechanismen

Zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands von Gebäuden – durch Energieeffizienz im Betrieb sowie die Reduktion der grauen Energie - bietet sich eine Weiterentwicklung und Ergänzung der bestehenden Fördermechanismen (insbesondere QNG, GEG und BEG) an.

Da das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude bereits umfassende Anforderungen an die Qualität von Gebäuden definiert hat, werden konkrete Vorschläge zur Weiterentwicklung des Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude gemacht, um die in dieser Studie identifizierten Handlungsempfehlungen zu berücksichtigen. Die konkreten Empfehlungen zur Weiterentwicklung zielen darauf ab, den kumulierten Energieaufwand als Bewertungskriterium zu berücksichtigen sowie das Treibhauspotenzial in biogen und fossil zu unterscheiden. Das ist auch eine Voraussetzung für die Bewertung der Senkenleistung von Materialien und der Förderung des Einsatzes von nachwachsenden Rohstoffen. Zudem sollte die Datengrundlage angepasst werden, indem herstellereinspezifische Angaben verwendet werden können und dadurch auch ein Anreiz zur Nutzung von gebrauchten und emissionsreduzierten Bauprodukten entsteht. Weiterhin sollten die Anforderungswerte reduziert werden, um kompatibel mit den Klimaschutzzielen zu sein.

Daneben sollte ein separater Anforderungswert für die Herstellungsphase von Gebäuden definiert werden, um die unmittelbaren Klimaauswirkungen durch Herstellung und Errichtung der Gebäude gezielter zu adressieren. Zum Planungszeitpunkt sind alle Phasen des Lebenszyklus‘ bis auf die Herstellung und Errichtung höchst unsicher.

Weitere Empfehlungen zur Weiterentwicklung ergeben sich für die Bundesförderung effiziente Gebäude und das Gebäudeenergiegesetz hinsichtlich einer Erhöhung der ordnungsrechtlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Neubauten und Bestand und der Fördersätze für die energetische Sanierung sowie die Implementierung von Mindestenergieeffizienzstandards für Bestandsgebäude und eines Gebäuderessourcenpasses zur Erfassung von eingesetzten Bauprodukten.

## Summary

### Goal and scope

There are still numerous hurdles to overcome on the way to climate-friendly construction and a greenhouse gas-neutral building stock. Not only must direct greenhouse gas emissions from buildings be reduced by more than 40 % by 2030 (Federal Government 2022), but grey emissions from buildings must also be significantly reduced. The challenge here is that the building sector in the Climate Protection Act only includes direct greenhouse gas emissions from the combustion of fossil fuels. However, greenhouse gas emissions from the use of electricity in buildings are in the energy sector, while the manufacture of construction products, the construction and dismantling of buildings, and the recycling of construction products are in the industry sector of the Climate Protection Act. Cross-sector efforts therefore make sense for climate-friendly buildings (Deurer *et al.* 2023). Political activities in this context include the Climate-friendly New Construction funding programme (in connection with the Sustainable Building quality seal), the amendment to the European Buildings Directive with the mandatory life cycle assessment of new buildings from 2028, the taxonomy and sustainability reporting requirements with an impact on building materials, and the certification framework for carbon removal.

To assess the climate impact of buildings, this project quantifies the cumulative energy consumption, global warming potential and life cycle costs for various energy standards, construction methods and building types in new and existing buildings. The reference buildings are mapped in detail according to building components, materials, and construction practices.

The calculation covers the entire life cycle of the building, i.e. the production of the building materials, the operation of the building, and the dismantling and disposal of the materials used. The focus is on the production phase, as the associated climate impacts occur directly and must be addressed to a greater extent. Based on the results, recommendations are derived that should lead to an improved implementation of climate-friendly construction. In addition, the numerous hurdles on the way to climate-friendly construction can be identified based on the study.

The investigations carried out are therefore a supplement to the Sustainable Building Quality Seal (QNG), as a large number of reference buildings are considered, regardless of the required threshold.

### Methodological approach

The calculation is based on life cycle assessment to quantify the environmental impact of products, companies, and services over their entire life cycle. The standardised procedure, found in ISO standards 14040 (2021-02) and 14044 (2021-02), enables a uniform, transparent, and comparable approach.

ÖKOBAUDAT is used to calculate the cumulative energy consumption and global warming potential. The database maps the environmental impact and primary energy consumption of construction products over their entire life cycle under domestic production conditions. Version 2023-I, the currently valid accounting method DIN EN 15804 (2022-03) + A2 and generic data sets are used for the calculations in the study and almost all ÖKOBAUDAT modules are considered. Transport processes as well as repair, replacement and conversion/renewal are not considered.

The cumulative energy consumption and greenhouse gas emissions of new buildings and refurbishments are calculated using a combination of several models.

The *CONIC (Construction Impact Calculator)* model calculates the climate and environmental impact of the construction of new buildings. The model was developed as part of the project. The model uses construction methods, building type, materials and other building-specific information as inputs. Both residential and non-residential buildings and a total of seven different construction methods are analysed as part of the project. For each construction method, the structure is defined based on specific components and materials. The insulation thickness is calculated endogenously for each building component based on the required U-values. The insulation thickness is defined iteratively via the thermal resistance R and the thermal transmittance U based on the energy standard to be achieved. The areas and volumes of building components and materials are then determined using the building dimensions and coupled with ÖKOBAUDAT to calculate the climate and environmental impact.

The *Invert/ee-Lab* model is coupled with ÖKOBAUDAT to calculate the climate impact of refurbishments. The model can be used to automatically calculate the cumulative energy consumption, greenhouse gas emissions and investment costs for many different reference buildings and different energy standards. In this project, the building stock is calculated using the reference building database stored in the *Invert/ee-lab* model, which is based on the analyses of the building typology and further analyses of the renovation status of the German building stock. The construction of the buildings and the manufacture of all building components are not analysed, but only the energy consumption and greenhouse gas emissions for the construction measures associated with the energy-efficient refurbishment to different energy standards. All subsequently applied materials (insulation material, plaster, reinforcement, window glass, frames, etc.) and the initial energy status of the buildings are considered. The model uses a linear optimisation model to calculate which efficiency measures are required to achieve the specified energy standards concerning the overall energy efficiency of the building envelope. The specific transmission heat coefficient (Ht') of the respective energy standard is thus included in the optimisation as a secondary condition.

The material quantities of different construction variants for the components to be refurbished and the associated energy parameters and greenhouse gas emissions are then determined by direct coupling with ÖKOBAUDAT in the same way as the calculation for new buildings.

Further Excel-based models were developed to calculate the climate impact of the heat supply and room ventilation.

Based on reference heat supply systems, the model for heat supply calculates the cumulative energy consumption and the global warming potential for different performance levels of heating technologies, building types and refurbishment statuses of buildings. The model includes the heating technology and the necessary distribution system. Gas condensing boilers, an air-to-water heat pump and a brine-to-water heat pump are analyzed. The various heat supply systems are scaled according to their mass and heating output. The Ecoinvent database is used to calculate the climate impact of the production and disposal phases.

To calculate the cumulative energy demand and GHG emissions in the utilization phase, the useful energy demand of the various reference buildings is required. Finally, the final and primary energy demand is calculated from the useful energy demand and then related to the living space. For existing buildings, the useful energy demand for space heating, hot water, ventilation, and air conditioning is calculated for the various building types and energy standards using the *Invert/ee-lab* model. The 'Energieberater 18599 3D PLUS' software from Hottgenroth (2023) is used to calculate the useful energy demand of the new buildings.

As a useful life of 20 years is assumed for the components of the technical building equipment, the global warming potential of 259 g/ kWh and the primary energy factor of 1.71 for an

electricity mix in 2030 are considered (Fritsche and Greß 2022). A global warming potential of 246 g/ kWh and a primary energy factor of 1.1 are assumed for natural gas.

The ventilation systems are designed following DIN 1946-6 (2029-12). The cumulative energy consumption and greenhouse gas emissions over the entire life cycle are then calculated based on the air exchange rate, power consumption, and operating hours of the ventilation systems.

The calculated cumulative energy consumption (kWh) from construction and technical building equipment is finally standardized to the specific living or usable area and the specific building component service life (kWh/(m<sup>2</sup>a)). This method makes it possible to assess the building's cumulative energy consumption and greenhouse gas emissions from today's perspective. Furthermore, by annualizing the results and standardizing them to the living or usable area, a direct comparison of the cumulative energy consumption and environmental impact of the building materials used, technical building equipment and the operating phase of the building is possible.

For a holistic assessment of the costs for the buildings shown, the life cycle costs are calculated for selected variants. The life cycle costs, or total costs, include the investment, energy consumption, and maintenance. Replacement investments are not taken into account.

### **Key findings and recommendations for action**

#### Significance of the cumulative energy demand

In this study, both the renewable and non-renewable primary energy requirements of the various construction methods, building types, and energy standards were calculated. It became clear that the energy required in construction and during demolition and disposal is predominantly non-renewable. In the utilization phase, however, the energy input is predominantly renewable, which is due in particular to the assumed electricity mix in 2030, which already has a high proportion of renewable energies.

Against the backdrop of the increasing decarbonisation of industrial processes and the expansion of renewable energy in the electricity system, the addition of renewable energy input is important, as although this energy comes from renewable sources, generation capacities (photovoltaic systems, wind turbines, etc.) must also be built.

For a complete assessment of materials and building products, it is therefore advisable to analyse the total primary energy consumption in the life cycle assessment (e.g. for certification according to the Sustainable Building Quality Seal).

#### Energy efficiency of buildings

The energy efficiency standard of buildings is decisive for cumulative energy consumption and fossil greenhouse gas emissions, regardless of whether they are new or existing. As energy efficiency increases, primary energy consumption and greenhouse gas emissions fall significantly during the utilisation phase of buildings. The cumulative energy consumption in the production phase of the materials increases slightly, but this increase is negligible compared to the reduction in primary energy consumption in the utilisation phase. The presentation of the life cycle costs also shows that energy efficiency reduces the costs in the operating phase and that the cost increases for implementing the increased energy efficiency requirements are marginal.

Overall, the ratio of energy consumption in the production phase to the reduction in primary energy consumption in the utilisation phase is significantly lower for energy-efficient refurbishment of existing buildings than for new buildings. The focus of activities to reduce cumulative energy consumption and greenhouse gas emissions should therefore be on the

energy-efficient refurbishment of existing buildings and not on the construction of new buildings. The results of the analysis show that the refurbishment of existing buildings (under certain conditions) is associated with lower climate impacts over the life cycle than the construction of new buildings. Nevertheless, the following applies: if new buildings are to be built, then they should be as energy efficient as possible.

The following recommendations for action arise concerning the energy efficiency of buildings:

- ▶ **Increased refurbishment activity:** Comprehensive proposals for increasing the rate and depth of refurbishment are already included in numerous studies. Examples include increasing funding quotas and budgets, strengthening individual refurbishment roadmaps, serial refurbishment and minimum efficiency standards for existing buildings (Rother et al. 2020; Steinbach et al. 2021; Repenning et al. 2023). However, increasing the refurbishment rate alone can lead to dangerous lock-in effects if thermal insulation is not improved sufficiently. At the same time, a significant increase in the refurbishment rate is hardly economically viable. It is therefore crucial to increase the depth of refurbishment: if a building component is refurbished, then to a target-oriented level. In this study, the Efficiency House Level 40 or the qualities derived from it for the refurbishment of existing buildings prove to be target-oriented from all points of view.
- ▶ **Stricter regulatory efficiency requirements for new buildings and refurbishments:** The importance of efficiency standards for energy refurbishment and new buildings is already addressed in several studies that take up a tightening of regulatory requirements for the energy efficiency of buildings and make recommendations for implementation (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2020; Rother et al. 2020; Steinbach et al. 2021; Repenning et al. 2023).
- ▶ **Using the heating load as an indicator for evaluating buildings:** The lower the heating load of the building, the lower the installed output of the heat generator. Consideration of the heating load is particularly recommended when installing heat pumps in renovated buildings. The lower the heating load due to a higher efficiency standard, the lower the electricity consumption of the heat pump. The electricity consumption of heat pumps has a direct impact on the electricity system, as increasing electrification of the building sector also results in peak loads due to heating. A low heating load is favoured in particular by high thermal insulation of the building envelope, including a ventilation system with heat recovery.

### Reducing the grey energy of buildings

Compared to the energy efficiency of buildings, there is less potential for reducing cumulative energy consumption and greenhouse gas emissions among the different construction methods. Nevertheless, the manufacturing and construction phase should not be neglected.

A building in lightweight timber construction has the lowest cumulative energy consumption with the same energy standards, while a building in solid construction with a thermal insulation composite system has the highest. In between are monolithic solid construction and solid timber construction. The differences between the construction methods lie in the structure of the exterior walls and floor slabs. The advantages of lightweight timber construction lie in the beam and frame construction. The selective use of timber as load-bearing elements in the exterior walls and storey ceilings can significantly reduce the cumulative energy consumption compared to the different construction methods. In contrast, solid construction methods, including solid timber construction, result in higher energy costs due to the extensive use of materials. There are also differences between the various component structures within the same construction

method. Reduction potentials result from the use of web beams compared to solid wood. Differences can also be observed between the solid construction methods, which are attributable to the building products used (insulation and load-bearing structure). The building products sand-lime brick, brick and reinforced concrete are associated with different production processes and therefore also energy consumption and greenhouse gas emissions. The analysis shows the highest energy consumption for reinforced concrete and the lowest for bricks. However, the proportion of reinforcement must be considered.

However, the climate impact of all construction methods is significantly higher than the greenhouse gas emissions required to achieve the target and must be reduced in the coming years. In addition to the establishment of lightweight construction (also in solid construction), this also requires the decarbonization of building products.

Furthermore, the comparison of renewable and fossil building materials in the refurbishment of existing buildings shows the differences in the primary energy consumption of various insulation materials. It becomes clear that renewable raw materials are not always associated with a lower climate impact than synthetic or mineral insulation materials. The primary energy consumption depends on the degree of processing of the materials and their density and is lower for fibre insulation materials than for board insulation materials, for example.

While (heavy) wood fibre insulation boards are therefore associated with high energy consumption, lighter insulation materials made from renewable raw materials (wood and cellulose fibres as blow-in insulation materials, hemp, straw and flax as well as mineral wool) are associated with lower energy consumption than petroleum-based products. However, building products made from renewable raw materials can not only reduce the cumulative energy consumption of buildings but also contribute to the storage of carbon in buildings.

Furthermore, the results of this study show that compact buildings, i.e. those with a low A/V ratio, require less grey energy. The smaller building envelope reduces the amount of material used, which in turn reduces the amount of energy required in the construction phase of the building. The A/V ratio therefore also has an impact on operation, as a smaller building envelope results in less heat loss. It is therefore advisable to promote construction methods and building types that allow many people to live together while using fewer resources. The less living space is used per person, the lower the per capita emissions.

Furthermore, the useful life of building products also determines the grey energy of buildings. Increasing the assumed service life significantly reduces the cumulative energy consumption and fossil greenhouse gas emissions. This means that in practice, the aim should be to maximise the service life of building components. This in turn requires the continuous repair and refurbishment of buildings or the continued use of building products. However, for building products to continue to be used, they must first be recorded and then distributed. The prerequisite for this is created by a digital building resource passport.

The following recommendations for action arise concerning the grey energy of buildings:

- ▶ Promotion of resource-efficient construction (e.g. through lightweight construction)
- ▶ Expanding the infrastructure for used building products and promoting their use
- ▶ Implementation of the building resource passport
- ▶ Promotion of emission-reduced or decarbonised materials

### Increasing carbon storage in buildings

When analysing greenhouse gas emissions, further differences between the construction methods become apparent. The calculated greenhouse gas emissions include both fossil and biogenic emissions, with a focus on fossil greenhouse gas emissions.

Fossil greenhouse gas emissions result from the use of fossil fuels in the production, operation and disposal phases and are therefore based on cumulative energy consumption. Biogenic greenhouse gas emissions result in the form of stored carbon (CO<sub>2</sub>) in wood and plant-based building materials and in the form of emissions from the use of biomass as an energy source and from the combustion of building materials. Negative biogenic greenhouse gas emissions result primarily in timber construction, due to the storage of CO<sub>2</sub> in the production phase, which is released again at the end of life (module C3). The time of release depends on the useful life of the materials. The longer the materials are used and possibly used several times in buildings, the longer the CO<sub>2</sub> is bound. The use of CO<sub>2</sub>-storing materials is also relevant to the Carbon Removal Certification Framework.

By considering the CO<sub>2</sub> storage capacity of materials as a central funding criterion, the building stock can be expanded as a CO<sub>2</sub> sink. This can also increase the proportion of renewable raw materials. However, care must be taken to ensure that fossil greenhouse gas emissions are also minimised and are not offset by biogenic greenhouse gas emissions.

The calculations show that lightweight timber construction is the construction method with the lowest cumulative energy consumption and the lowest fossil greenhouse gas emissions in new buildings. Solid timber construction represents the largest CO<sub>2</sub> sink but has a higher cumulative energy requirement than lightweight timber construction. Furthermore, in terms of material efficiency, the limited resource of wood should be used sparingly and following structural requirements rather than in solid timber constructions.

### Further development of existing subsidy mechanisms

In order to reduce the cumulative energy consumption of buildings - through energy efficiency in operation and the reduction of grey energy - it is advisable to further develop and supplement the existing funding mechanisms (in particular QNG, GEG and BEG).

As the Quality Seal for Sustainable Buildings has already defined comprehensive requirements for the quality of buildings, specific proposals are made for the further development of the Quality Seal for Sustainable Buildings to take into account the recommendations for action identified in this study. The specific recommendations for further development are aimed at accounting for the cumulative energy consumption as an assessment criterion and differentiating between biogenic and fossil greenhouse potential.

This is also a prerequisite for assessing the sink performance of materials and promoting the use of renewable raw materials. In addition, the database should be adapted so that manufacturer-specific information can be used, thereby incentivizing the use of used and emission-reduced building products. Furthermore, the requirement values should be reduced to be compatible with the climate protection targets.

In addition, a separate requirement value should be defined for the production phase of buildings to address the direct climate impact of the production and construction of buildings in a more targeted manner. At the time of planning, all phases of the life cycle apart from production and construction are highly uncertain.

Further recommendations for further development arise for the federal promotion of efficient buildings and the Building Energy Act concerning increasing the regulatory requirements for the

energy efficiency of new and existing buildings and the subsidy rates for energy-efficient refurbishment as well as the implementation of minimum energy efficiency standards for existing buildings and a building resource passport to record the building products used.

## Stellungnahme der beteiligten Experten

### Dank und Anerkennung

Wir durften die vorliegende Studie als wissenschaftlicher Beirat begleiten. Für die konstruktiven Diskussionen bedanken wir uns bei Autorenteam und UBA als Auftraggeber. Wir konnten sowohl zu den untersuchten Gebäuden als auch zur Methodik beraten. Die Studie hebt sich in Praxisnähe, wissenschaftlicher Qualität, Relevanz und Korrektheit der Hauptaussagen wohltuend von vergleichbaren Studien ab und verbessert die zurückgezogene Vorgängerstudie. Es liegt nun eine belastbare Publikation des UBA zur weiteren Verwendung vor.

### Wichtigste Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Studie sind aus unserer Sicht:

- ▶ **Dominierender Teil des Lebenszyklus** ist – unabhängig vom gewählten Effizienzniveau, der Materialwahl, der Gebäudetechnik und egal ob Alt- oder Neubau – die **Betriebsphase**.
  - Dies bedeutet, der bisher gewählte regulatorische **Fokus auf den Gebäudebetrieb ist korrekt**.
  - **Verschiebungen dieses Schwerpunktes** können sich dagegen **kontraproduktiv** auswirken, wenn (wie bei der aktuellen Neubauförderung der Fall) Schwerpunkte hin zu weniger relevanten Bereichen verrückt, neue kosten- und zeitintensive bürokratische Hürden aufgebaut, sowie teurere Materialien und Prozesse erzwungen werden.
  - **Stärker zu berücksichtigen** sind dagegen **Leistungsbedarf und Maximallast der Gebäude** mit Schwerpunkt auf der Heizlast. In einer künftig im Wesentlichen auf elektrischem Strom basierenden Energieversorgung ist sie ein entscheidender Faktor für die Belastung des Sektor-übergreifenden Stromnetzes.
- ▶ **Zentral** für das Erreichen der Klimaziele im Gebäudesektor ist die Ertüchtigung des Gebäudebestands auf **höchste Effizienz**. Gleichwohl bleibt der Neubau relevant.  
**Maßnahmen:**
  - thermische Verbesserung der Gebäudehülle (wo technisch sinnvoll vorzugsweise mit wenig verarbeiteten erneuerbaren Materialien oder Recycling-Produkten),
  - Wärmerückgewinnung aus Abluft und ggf. Abwasser,
  - Umstellung der Wärmeversorgung auf Wärmepumpen (bzw. Wärmenetze wo sinnvoll möglich),
  - Verbindung mit PV-Anlagen, so sie auf Dächern und an Fassaden wirtschaftlich zu betreiben sind.

Im Neubau hat die Herstellungsphase höheres Gewicht, die Betriebsphase bleibt jedoch auch hier dominant. Die durch Materialwahl erzielbaren Einsparungen im Vergleich zur Betriebsphase sind gering.

- ▶ Als **im Lebenszyklus** wirtschaftlichste der in der Studie untersuchten Optionen mit dem zugleich geringsten Gesamtenergiebedarf, den geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen, der geringsten Netzbelastung und in diesem Sinne **optimal** erweist sich das **Passivhaus und die aus diesem Standard abgeleiteten Altbausanierungen**.
- ▶ Die Studie belegt des Weiteren die **hohe Komplexität der Bestimmung des Herstellungsenergieaufwandes und der damit verbundenen Emissionen**.

- Die Berücksichtigung der Herstellungsenergie kann (auf dem aktuellen Datenstand und unter Nutzung der aktuellen Methodik) sogar zu Fehlinterpretationen und Fehloptimierungen führen. Sie ist als regulatorisches Kriterium für den Bauherren darum derzeit nicht ratsam und auch nicht erforderlich.
- Es ist vielmehr Aufgabe der Bauindustrie, ihre Produkte innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte klima- und ressourcenschonend bereitzustellen. Die bereits bestehenden Regelungen schätzen wir dazu als ausreichend ein.

## Empfehlungen für gesetzliche Anforderungen und Förderungen

### Vorbemerkung

Es ist unstrittig, dass ein (nahezu) klimaneutraler Gebäudebestand unabdingbare Voraussetzung zur Eindämmung des Klimawandels ist.

- ▶ Dazu ist die Reduktion des Energiebedarfes im Lebenszyklus erforderlich. Dies und die Wahl der Wärmeerzeuger sind Aufgabe der am Bau Beteiligten.
- ▶ Die dazu erforderliche Dekarbonisierung der Netze ist Aufgabe der Netzbetreiber, hierauf haben die am Bau Beteiligten keinen Einfluss. Ein (kumulierter) CO<sub>2</sub>-Anforderungswert an Gebäude – der sich mit der Dekarbonisierung der Energieträger ständig ändern müsste – ist daher nicht sinnvoll.
- ▶ Die Ausbildung von Gebäuden als Kohlenstoffspeicher (die durch die Wahl der Baumaterialien im Einflussbereich der am Bau beteiligten liegt) kann aber durch unten genannte Förderungen unterstützt werden.

### Empfehlungen für den Neubau

- ▶ **Primäre Anforderung:** sollte an den **Heizwärmebedarf** ergehen, nachgewiesen durch ein vereinfachtes, durch eine staatliche Stelle bereitgestelltes, kostenfreies Tool. Eine Schnittstelle zu externen Programmen sollte bereitgestellt werden.  
**Alternativ: Heizlastkriterium.** Beide Kriterien sollten sich, den Ergebnissen dieser Studie folgend, am Passivhaus-Standard orientieren.
- ▶ **Sekundäre Anforderung:** an den **Endenergiebedarf** (Heizung und Warmwasser, ebenfalls nach obigem Tool).
  - Dabei ist der Endenergiebedarf so einzustellen, dass er mit einer Wärmepumpe, SCOP 3, erreicht werden kann.
  - PV-Erzeugung kann monatsweise gegengerechnet werden, um das System für Biomassekessel und synthetische Brennstoffe (EE-Gas, E-fuels) prinzipiell offen zu halten (“Technologieoffenheit” – die Wärmeerzeugung durch Oxidation im Gebäude ist allerdings weder einzel- noch volkswirtschaftlich sinnvoll und schon gar nicht klimafreundlich).
  - Bei Anschluss an ein Wärmenetz (mit konkretem Dekarbonisierungsfahrplan) ist ein um den Faktor 3 höherer Endenergiebedarf zulässig.
- ▶ **Förderungen** kann es für die Verwendung von Materialien mit geringem Herstellenergiebedarf (PERE + PENRE) geben. Hier kann mit einem einfachen Tool die Differenz zu einem Referenzwert ermittelt, und diese entsprechend monetarisiert werden.
- ▶ **Verpflichtung für PV** auf geeigneten Flächen am Gebäude oder auf dessen Grundstück mit der Möglichkeit zur Kompensation durch Investition in neue Windkraftanlagen (>Passivhaus-Plus).

### Empfehlungen für den Gebäudebestand

- ▶ **Verfahren A, bei Komplettmodernisierung: Wie Neubau.** Orientierung der Werte an den in dieser Studie gezeigten Best-Case-Sanierungsvarianten.
- ▶ **Verfahren B, bei Schrittweiser Sanierung:** Anforderungen an alle Komponenten der Gebäudehülle angelehnt an **die Best-Case-Sanierungsvarianten dieser Studie nach dem Kopplungsprinzip.**  
Für Fälle, in denen das Kopplungsprinzip nicht greift (z.B. oberste Geschossdecke): Verpflichtung zur Ertüchtigung nach einer zu bestimmenden Zeit, abhängig von bestehenden Wärmeschutz des Gebäudes, spätestens bei Wechsel des Heizsystems.  
Zulässig zur Wärmeerzeugung sind: Anschluss an ein Wärmenetz, Wärmepumpen. Zu Bioenergie und synthetischen Brennstoffen vgl. Neubau. In Ausnahmefällen direktelektrische Warmwasserbereitung (z.B. bei geringem Bedarf, langen Leitungsnetzen).
- ▶ **Förderung:** Bei Vorlage eines Sanierungskonzeptes/ Sanierungsfahrplans Senkung des Mehrwertsteuersatzes auf 0% (bekannt von der Photovoltaik), wenn die umzusetzenden Maßnahmen den festgelegten Qualitäten entsprechen.  
Zusätzlich: Förderung von Dämmstoffen mit geringem Herstellungsenergieaufwand: Förderfähig sind in diesem Sinne beispielsweise alle Dämmstoffe mit geringerem Herstellungsenergiebedarf (PERE, PENRE) als expandiertes Polystyrol bezogen auf den erreichten U-Wert.
- ▶ **Verpflichtung für/Förderung von PV** auf geeigneten Flächen am Gebäude oder auf dessen Grundstück mit der Möglichkeit zur Kompensation durch Investition in neue Windkraftanlagen.

### Zur Methodik

Den aktuellen Normungen folgend, wurde auch in dieser Studie **Modul C (Abriss, Entsorgung)** inkludiert. **Die Methodik der Normung ist in diesem Punkt fehlerhaft**, ihre Anwendung kann zu falschen Schlüssen führen.

- ▶ Zum Abriss, der voraussichtlich stattfinden wird, wenn das Energiesystem (weitgehend) dekarbonisiert und erneuerbar ist, werden die heutigen Energie- und CO<sub>2</sub>-Faktoren angesetzt: Eine mit Sicherheit falsche Annahme.
- ▶ In der Regel steht am Nutzungsende die Annahme der “thermischen Verwertung”. Schon heute – und erst recht in Zukunft – ist “thermische Entwertung” der passendere Begriff. So widerspricht die Verbrennung der angestrebten Kreislaufwirtschaft und ist eine in Zukunft unwahrscheinliche Option.
- ▶ Wir können heute kaum sagen, auf welche Weise die Nachnutzung der in 30-100 Jahren freiwerdenden Komponenten stattfinden wird.

Methodisch **korrekt ist, Abriss und Entsorgung künftigen Prozessen der Rohstoffgewinnung zuzuschreiben** (diese Zuordnung ist zulässig, solange von den eingesetzten Materialien und Prozessen keine desaströsen Folgewirkungen ausgehen. Solche Materialien und Prozesse sind von vorneherein zu vermeiden). Dass sich dieser methodische Fehler nicht auf die Korrektheit Hauptaussagen auswirkt, zeigt die **geringe Relevanz gegenüber der dominanten Betriebsphase.**

*Prof. Dr.-Ing. Benjamin Krick, Dr.-Ing. Burkhard Schulze-Darup, Dipl.- Phys. Dr.-Ing. Bernd Steinmüller, MBA*

# 1 Zielsetzung und Hintergrund

## 1.1 Die Bedeutung der grauen Energie in Gebäuden

Bislang liegt der Fokus von Klimaschutzmaßnahmen auf dem Energieverbrauch des Gebäudes während der Nutzungsphase. Der Rechtsrahmen im Gebäudeenergiegesetz (GEG) fokussiert einen effizienten Betrieb von Gebäuden durch Anreizwirkungen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle und den Einbau effizienter Wärmeversorgungsstechniken auf Basis erneuerbarer Energien. Die Betrachtung des restlichen Lebenszyklus von Gebäuden und somit der Herstellung und Entsorgung von Baustoffen und Dämmstoffen sowie der technischen Gebäudeausrüstung, die sogenannte graue Energie, wird darin bislang nicht adressiert. Dies liegt auch daran, dass die in diesem Zusammenhang verursachten Energieverbräuche außerhalb des Klimabilanzrahmens des Gebäudesektors im Klimaschutzgesetz (KSG) liegen und die Emissionen aufgrund des Quellprinzips dem Industriesektor zugeordnet werden.

Der Gebäudesektor im KSG umfasst die Privaten Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen. Der Endenergieverbrauch, der aus verschiedenen Anwendungen wie Raumwärme, mechanische Energie, Beleuchtung und Klimakälte resultiert, summierte sich im Jahr 2022 auf 1.025 TWh. Der Endenergieverbrauch für die thermische Konditionierung von Gebäuden (Raumwärme und Warmwasser) beträgt rund 790 TWh und hat damit einen Anteil von rund 33 % am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland. Zur Deckung werden immer noch überwiegend fossile Energieträger eingesetzt. Der Endenergieverbrauch im Industriesektor nach KSG beträgt dagegen 645 TWh und umfasst die Prozessverfeuerungen und Wärmeerzeugungsanlagen aber auch Industrieprozesse und die Herstellung von Bauprodukten (dena - Deutsche Energie Agentur 2023; Harthan *et al.*, 2023).

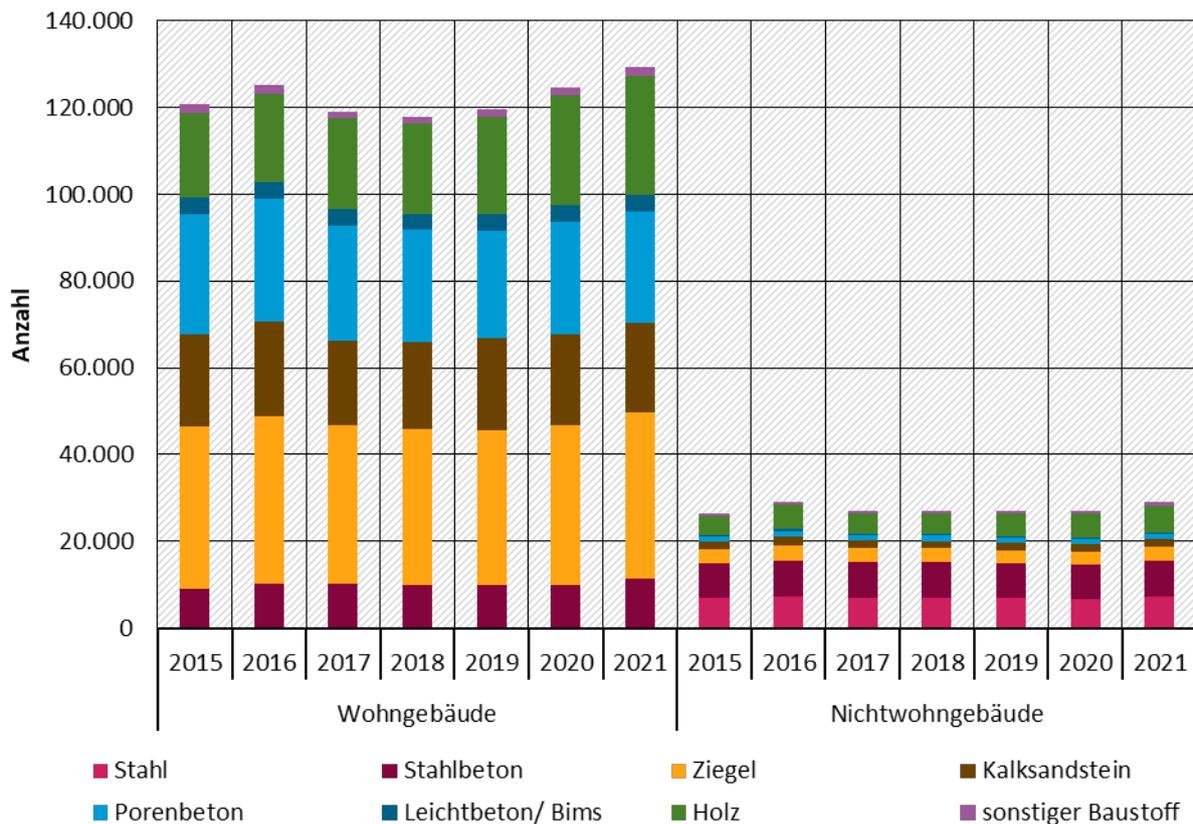
Nach einer Erhebung der Global Alliance for Buildings and Construction entfallen 34 % des globalen Energieverbrauchs auf den Gebäudebereich, wobei 20 % durch die Nutzung von Gebäude entstehen und etwa 5 % auf die Herstellung von Bauprodukten wie Stahl und Aluminium (UNEP - United Nations Environment Programme 2022).

Eine Abschätzung der jeweiligen Anteile von Nutzungs-, Herstellungs- und Entsorgungsphase von Gebäuden liegt in Deutschland nur hinsichtlich der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) vor. Die direkten THG-Emissionen aus dem Gebäudebetrieb (Raumwärme und Warmwasser) umfassen in Deutschland nur rund 15 % der gesamten THG-Emissionen. Je nachdem wie die Bilanzgrenze gezogen wird, werden durch Errichtung, Erhalt und Betrieb von Gebäuden jedoch insgesamt 30 bis 40 % der THG-Emissionen verursacht. Weiterhin entfallen 50 % der Rohstoffgewinnung auf Baumaterialien (Ramseier und Frischknecht 2020; Schubert *et al.* 2023).

Zur Veranschaulichung der im Neubau derzeit eingesetzten Baustoffe zeigt Abbildung 1 die fertiggestellten Wohn- und Nichtwohngebäude nach vorwiegend verwendetem Material.

Insgesamt übersteigen die errichteten Wohngebäude deutlich die Anzahl an fertiggestellten Nichtwohngebäuden. Während Wohngebäude im Zeitraum 2016 bis 2021 überwiegend aus Ziegel, Kalksandstein und Porenbeton gebaut wurden, beträgt der Anteil von Stahl und Stahlbeton beim Neubau von Nichtwohngebäuden mittlerweile über 50 Prozent an den überwiegend verwendeten Baustoffen. Bei Wohngebäuden ist der Anteil von Stahlbeton im Verlauf von 2018 bis 2021 ebenfalls gestiegen. Der Anteil von Holz ist sowohl im Bau von Wohn- als auch von Nichtwohngebäuden in den letzten beiden Jahren gestiegen.

**Abbildung 1: Anzahl der Baufertigstellungen nach überwiegend verwendetem Baustoff im Neubau von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Zeitraum 2016 bis 2021**



Quelle: Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt (2022)

Bei den Gebäudesanierungen dominieren konventionelle, synthetische Dämmstoffe. Im Jahr 2019 wurden insgesamt 38,5 Mio. m<sup>3</sup> Dämmstoffe abgesetzt, davon 16,5 Mio. m<sup>3</sup> mineralische, 18,5 Mio. m<sup>3</sup> auf fossile und 3,5 Mio. m<sup>3</sup> auf nachwachsende Rohstoffe (FNR - Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe 2020a).

Bei Neubauten ist die Errichtung des Gebäudes bzw. Herstellung der Baustoffe im Vergleich zur energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden bedeutender, da ein zunehmend ambitionierter Energiestandard im Betrieb des Gebäudes zu einer Verschiebung des Energieverbrauchs in die Herstellungsphase führt. Insgesamt können der Energieverbrauch und das Treibhauspotenzial von neuen Gebäuden aber durch höhere Energiestandards reduziert werden (Mahler *et al.* 2019; Habert *et al.* 2020).

## 1.2 Aktuelle regulatorische Entwicklungen zur Reduktion der grauen Energie

Im Rahmen der Bundesförderung Energieeffiziente Gebäude (BEG) werden seit Juli 2021 Nachhaltigkeitsaspekte von Gebäuden durch eine eigene Nachhaltigkeitsklasse gefördert. Das Qualitätssiegel Nachhaltige Gebäude (QNG) formuliert Anforderungen an die ökologische, ökonomische und soziokulturelle Qualität von Gebäuden. Seit Januar 2023 gelten die Anforderungen des QNG teilweise auch im Förderprogramm „Klimafreundlicher Neubau“ (KfN) des BMWSB. In der Kombination von KfN mit QNG werden damit Neubauten gefördert, die zum einen die Anforderungen an ein Effizienzhaus (EH) 40 erfüllen und zum anderen maximal 24 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>a) über den gesamten Lebenszyklus (QNG-Plus) emittieren. Die Verleihung des QNG setzt dabei eine Zertifizierung mit einem von vier registrierten Bewertungssystemen für

nachhaltiges Bauen voraus, welche die Ressourceninanspruchnahme und Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus beurteilen. Daneben wird die Errichtung eines Gebäudes mit allen Anforderungen des QNG gefördert. Neben den Anforderungen des EH 40 muss das Gebäude dann entweder alle Anforderungen des QNG-Plus oder des QNG-Premium erfüllen (BMWSB - Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2023b). Grundlage des QNG ist die ÖKOBAUDAT, eine Datenbank mit Ökobilanz-Datensätzen für Bauprodukte. Für eine Zertifizierung ist das Treibhauspotenzial mit den vorhandenen Datensätzen zu berechnen (BMWSB 2023a).

Für eine transparente und einheitliche Umsetzung der Anforderungen des QNG in Software-Lösungen hat die Gütegemeinschaft Gebäudebilanzierung (18599 Gütegemeinschaft) im Juli 2023 ihren Tätigkeitsbereich erweitert. Mit der strategischen Erweiterung soll nun auch Software zur Ökobilanzierung von Gebäuden validiert und dadurch einheitlicher werden.

Um die Lebenszyklusemissionen zu reduzieren und gleichzeitig die Senkenleistung von Gebäuden zu erhöhen, wurde im Jahr 2023 in Zusammenarbeit aus BMWSB und BML eine Strategie für den Holzbau erarbeitet. Die Holzbauinitiative umfasst acht Handlungsfelder, mithilfe derer der Einsatz von Holz im Bausektor erhöht werden soll. Zudem plant die Bundesregierung im Rahmen des für 2024 geplanten "Vergaberechtstransformationspakets", die Beschaffung und Vergabe auch im Bereich der Baustoffe an Nachhaltigkeitskriterien auszurichten (BMWSB 2023b).

Neben den nationalen Bestrebungen rückt die Ökobilanzierung von Bauwerken auch auf europäischer Ebene in den Fokus. In der Novelle der Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) wird in der Fassung von 2024 erstmalig die Berechnung der Lebenszyklusemissionen von Gebäuden gefordert. Ab 2028 soll das Treibhauspotenzial von Neubauten von der Herstellung der Baustoffe bis zum Recycling am Lebensende berechnet werden, um die Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft zu stärken (EU-RL 2024/1275).

Die graue Energie wird von der Europäischen Kommission nicht nur durch die EPBD, sondern auch im Rahmen der Taxonomie adressiert. Die Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten ist ein zentrales Instrument innerhalb der Sustainable Finance Strategy der EU und zielt darauf ab, Nachhaltigkeitskriterien in den Entscheidungsprozess für Investitionen zu integrieren. Die Taxonomie ist ein Klassifizierungssystem für wirtschaftliche Aktivitäten und definiert Standards für ökologisch nachhaltige Aktivitäten (EU-V 2020/852).

Die Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen im Rahmen der Corporate Sustainable Reporting Directive (CSRD) greift die Kennzahlen der Taxonomie auf. Die Aktivitäten des Bau- und Immobiliensektor (Neubau, Bestandssanierung, etc.) werden durch die Taxonomie adressiert und auch in Nachhaltigkeitsberichten von Unternehmen werden Aktivitäten in Verbindung zum Bau- und Immobiliensektor erfasst. (Neitz-Regett et al. 2022)

Wirtschaftliche Aktivitäten im Bau- und Immobiliensektor sind dann nachhaltig, wenn sie ein wesentliches Ziel der Taxonomie fördern und kein anderes Ziel verletzen sowie bestimmte Mindeststandards (hinsichtlich Menschen- und Arbeitnehmerrechte betreffend) einhalten.

Neubauten, die konform sind, müssen entweder das Umweltziel Klimaschutz oder Klimawandelanpassung oder Kreislaufwirtschaft einhalten. Das Ziel Klimaschutz adressiert den Jahres-Primärenergiebedarf von Gebäuden und die Lebenszyklus-Emissionen von Gebäuden. Um konform mit der Taxonomie zu sein, muss der Primärenergiebedarf mindestens 10 % unter dem GEG-Standard liegen und die THG-Emissionen über den Lebenszyklus berechnet und offengelegt werden (DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen 2023).

Weiterhin wird durch den Carbon Removal Certification Framework (CRCF) derzeit ein Rahmen geschaffen, um die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung zu regulieren und zu fördern. Dazu gehört auch die Zertifizierung von langlebigen Baustoffen und der Holzbauweise (PI 2022).

### 1.3 Zielsetzung

Da mit steigenden Effizienzanforderungen die Klimaauswirkungen in der Herstellungsphase von Gebäuden bedeutender werden, ist es sinnvoll, die graue Energie nach Gebäudetypen, Bauweisen und eingesetzten Materialien zu betrachten.

Ziel des Vorhabens ist es deshalb, den kumulierten Energieaufwand<sup>1</sup> und das Treibhauspotenzial für verschiedene Energiestandards, Bauweisen und Gebäudetypen im Neubau und Gebäudebestand bei jeweils unterschiedlichen Bauteilaufbauten zu quantifizieren. Die Referenzgebäude werden dabei sehr detailliert nach Bauteilen und Materialien unter Berücksichtigung der Baupraxis abgebildet.

Die Berechnung erfolgt über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, also über die Herstellung der Baustoffe, den Betrieb des Gebäudes sowie den Rückbau und die Entsorgung der eingesetzten Materialien. Der Fokus liegt dabei auf der Herstellungsphase, da die damit verbundenen Klimaauswirkungen unmittelbar auftreten und deshalb verstärkt adressiert werden müssen. Aufbauend auf den Ergebnissen werden Empfehlungen abgeleitet, die zu einer verbesserten Umsetzung klimafreundlichen Bauens in der Praxis führen sollen. Darüber hinaus können auf Basis der Studie die zahlreichen Hürden auf dem Weg zum klimafreundlichen Bauen abgeleitet werden.

Die durchgeführten Untersuchungen entsprechen somit einer Ergänzung des QNG, da eine Vielzahl von Referenzgebäuden betrachtet wird, unabhängig von einem Anforderungswert, nach dem die in den Referenzgebäuden eingesetzten Materialien bewertet werden.

---

<sup>1</sup> Der Begriff Primärenergieaufwand wird analog verwendet

## 2 Beschreibung des methodischen Vorgehens

### 2.1 Grundlagen der Berechnung

#### 2.1.1 Begrifflichkeiten

Zum besseren Verständnis stellt Tabelle 1 eine Übersicht der in diesem Bericht verwendeten Begrifflichkeiten dar.

**Tabelle 1: Definition verwendeter Begrifflichkeiten**

Begriff	Erläuterung
<b>Gebäudetyp</b>	Als Gebäudetyp wird die Unterscheidung zwischen verschiedenen Gebäudegrößen und dem Verwendungszweck bezeichnet
<b>Bauweise</b>	Als Bauweise werden die unterschiedlichen Baukonstruktionen der Referenzgebäude bezeichnet
<b>Bauteil</b>	Als Bauteil wird ein abgeschlossenes Element im Gebäude, wie beispielsweise Außenwand, bezeichnet
<b>Bauteilkategorie</b>	Als Bauteilkategorie wird eine weitere Gliederungsebene der Bauteile bezeichnet. Ein Bauteil kann mehrere Bauteilkategorien, wie beispielsweise Tragwerk haben.
<b>Variante</b>	Eine Variante bezeichnet unterschiedliche Ausprägungen verschiedener Gestaltungsparameter innerhalb einer Bauweise. Dazu zählen die Materialien und die Energiestandards.

Quelle: Eigene Darstellung IREES

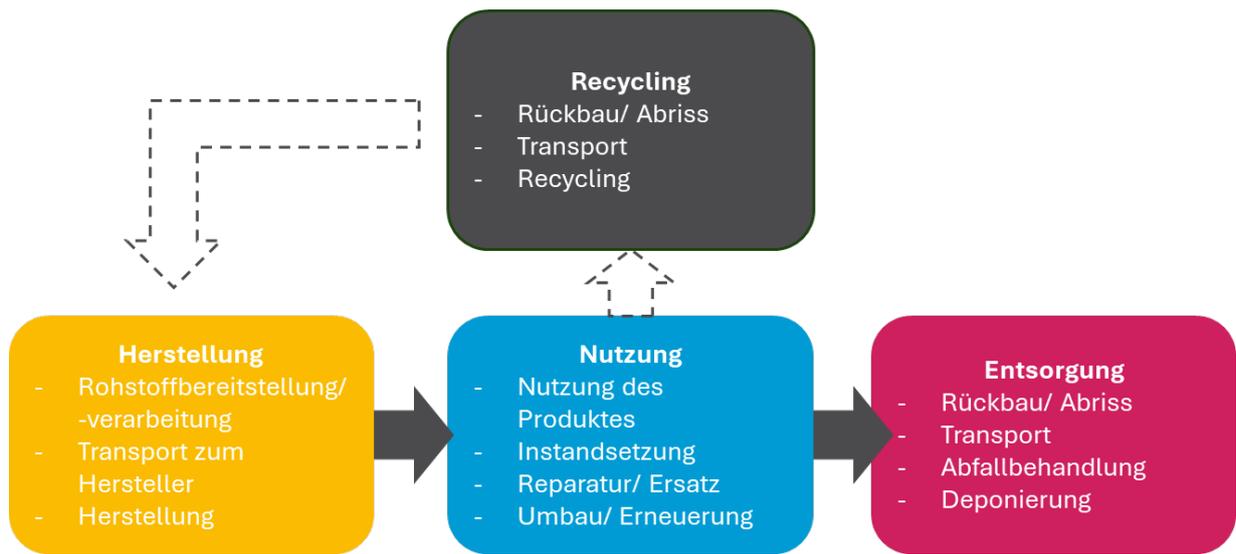
#### 2.1.2 Methodik der Ökobilanzierung

Grundlage der Berechnung ist die Ökobilanzierung, als Methode zur Quantifizierung des Umwelteinflusses von Produkten, Unternehmen und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus. Ein standardisiertes Vorgehen wird in den ISO-Standards 14040 (2021-02) und 14044 (2021-02) festgelegt, was ein einheitliches, transparentes und vergleichbares Vorgehen ermöglicht. Eine Ökobilanz umfasst folgende Schritte:

1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Zur Bewertung des Umwelteinflusses von Bauprodukten von der Rohstoffgewinnung über die Produktion der Materialien, die Fertigung des Produktes, die Nutzungsphase bis zur Verwertung besteht darüber hinaus die Europäische Norm DIN EN 15978 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode“ (DIN EN 15978:2012-10; IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V. 2020). Die einzelnen Phasen des Lebenszyklus für Gebäude nach DIN EN ISO 14044 (2021-02) sind in Abbildung 2 dargestellt.

**Abbildung 2: Lebenszyklus von Gebäuden bzw. einzelner Komponenten**



Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN ISO 14044 (2021-02)

### 2.1.3 Datengrundlage der Berechnung

Die Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen der betrachteten Gebäudetyten und Bauweisen sowie eingesetzten Baustoffen erfolgt auf Basis der Datenbank ÖKOBAUDAT. Die ÖKOBAUDAT ist eine Datenbasis zur Ökobilanzierung von Bauwerken. Sie wird vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) betrieben und vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) inhaltlich betreut.

Tabelle 2 zeigt die Lebenswegmodule der DIN EN 15804 (2022-03), die auch in der ÖKOBAUDAT enthalten sind.

**Tabelle 2: Lebenswegmodule in der ÖKOBAUDAT**

Herstellungsphase			Errichtungsphase		Nutzungsphase					Entsorgungsphase				Vorteile und Belastungen außerhalb Systemgrenze
Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Bau/Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Umbau/Erneuerung	Abbruch	Transport	Abfallbehandlung	Deponierung	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
					B6	Energieeinsatz								
					B7	Wassereinsatz								

Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 15804 (2022-03)

Die ÖKOBAUDAT bildet die Umweltauswirkungen und Primärenergieaufwände von generischen Produkten unter inländischen Produktionsbedingungen ab. Das bedeutet, dass auch die Förderung der Rohstoffe und die Stromgewinnung auf die landesspezifische Situation parametrisiert wird. Dadurch können die Angaben stark von anderen Datenbanken, wie beispielsweise Ecoinvent abweichen. Beispielsweise ist der spezifische Primärenergieaufwand (als Energieträger) von hochverarbeiteten Holzprodukten in der ÖKOBAUDAT mit einem ähnlichen Primärenergieaufwand wie Stahlbeton verbunden<sup>2</sup>.

In der Datenbank sind prinzipiell Informationen hinsichtlich der Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase sowie zum Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recyclingpotenzial enthalten. In jeder Phase des Lebenszyklus finden weitere Kategorisierungen statt.

Für die Berechnungen der Studie wird die Version 2023-I der ÖKOBAUDAT verwendet. Die in der ÖKOBAUDAT enthaltenen Datensätze sind konform zur DIN EN 15804 (2022-03). Es sind sowohl generische als auch spezifische, durchschnittliche und repräsentative Datensätze enthalten. Generische Datensätze beinhalten Ökobilanzdaten gemäß DIN EN 15804 (2022-03) ohne externe Verifizierung bzw. kritische Prüfung. Spezifische Datensätze entsprechen herstellereigenen Datensätzen für ein bestimmtes Produkt. Durchschnittsdatsätze sind durchschnittliche Datensätze von Industrieverbänden, Unternehmen usw. Repräsentative Datensätze sind durchschnittliche Datensätze für ein Land/eine Region. In der Berechnung werden generische Datensätze verwendet. In der Berechnung werden nahezu alle Module der ÖKOBAUDAT berücksichtigt. Transportprozesse sowie Reparatur, Ersatz und Umbau/Erneuerung werden nicht betrachtet. Zudem wird die derzeit gültige Bilanzierungsmethode DIN EN 15804 (2022-03) + A2 verwendet. Diese wurde im Zuge der Harmonisierung mit dem Product Environmental Footprint (PEF) entwickelt und enthält aktuellere Charakterisierungsfaktoren sowie neue Wirkungsindikatoren. Es ist zu beachten, dass in den Datensätzen der ÖKOBAUDAT keine Angaben zur Wärmeleitfähigkeit der Materialien enthalten sind. Diese werden deshalb separat in einer Datenbank gesammelt und mit den Datensätzen der ÖKOBAUDAT verknüpft. Eine Beschreibung der erstellten Datenbank von Materialien findet sich in Anhang A.1.

Die Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen der Wärmeversorgungssysteme erfolgt dagegen mithilfe der Datenbank Ecoinvent<sup>3</sup>. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, werden die Wärmeversorgungssysteme für die verschiedenen Gebäudetypen und Sanierungszustände skaliert. Eine solche Skalierung ist mit den Datensätzen in der ÖKOBAUDAT nur bedingt möglich, weshalb auf die Ecoinvent zurückgegriffen wurde.

## 2.2 Berechnungsmodelle

Die Berechnung des kumulierten Energieaufwands sowie des Treibhauspotenzials verschiedener Bauweisen, Gebäudetypen und Energiestandards im Neubau erfolgt in einem Verbund aus drei Modellen. Die Berechnungsmodelle orientieren sich dabei an den verschiedenen Gebäudekomponenten nach DIN 276 (2018-12). Die Gebäudekomponenten nach Kostengruppe (KG) 300 werden in einem Modell abgebildet, die Wärmeversorgung und Raumlüftung in KG 400 separat in zwei verschiedenen Modellen. Jedes Berechnungsmodell arbeitet mit unterschiedlichen Inputparametern, die im Folgenden beschrieben werden.

---

<sup>2</sup> Stand Oktober 2023

<sup>3</sup> Ecoinvent ist eine der größten Datenbanken für Ökobilanzdaten, siehe <https://ecoinvent.org/>

Die Berechnung der Baukonstruktion (Sanierungsmaßnahmen) im Gebäudebestand erfolgen mit dem Modell Invert/ee-Lab. Für die Wärmeversorgung und Raumlüftung werden die gleichen Modelle wie im Neubau eingesetzt.

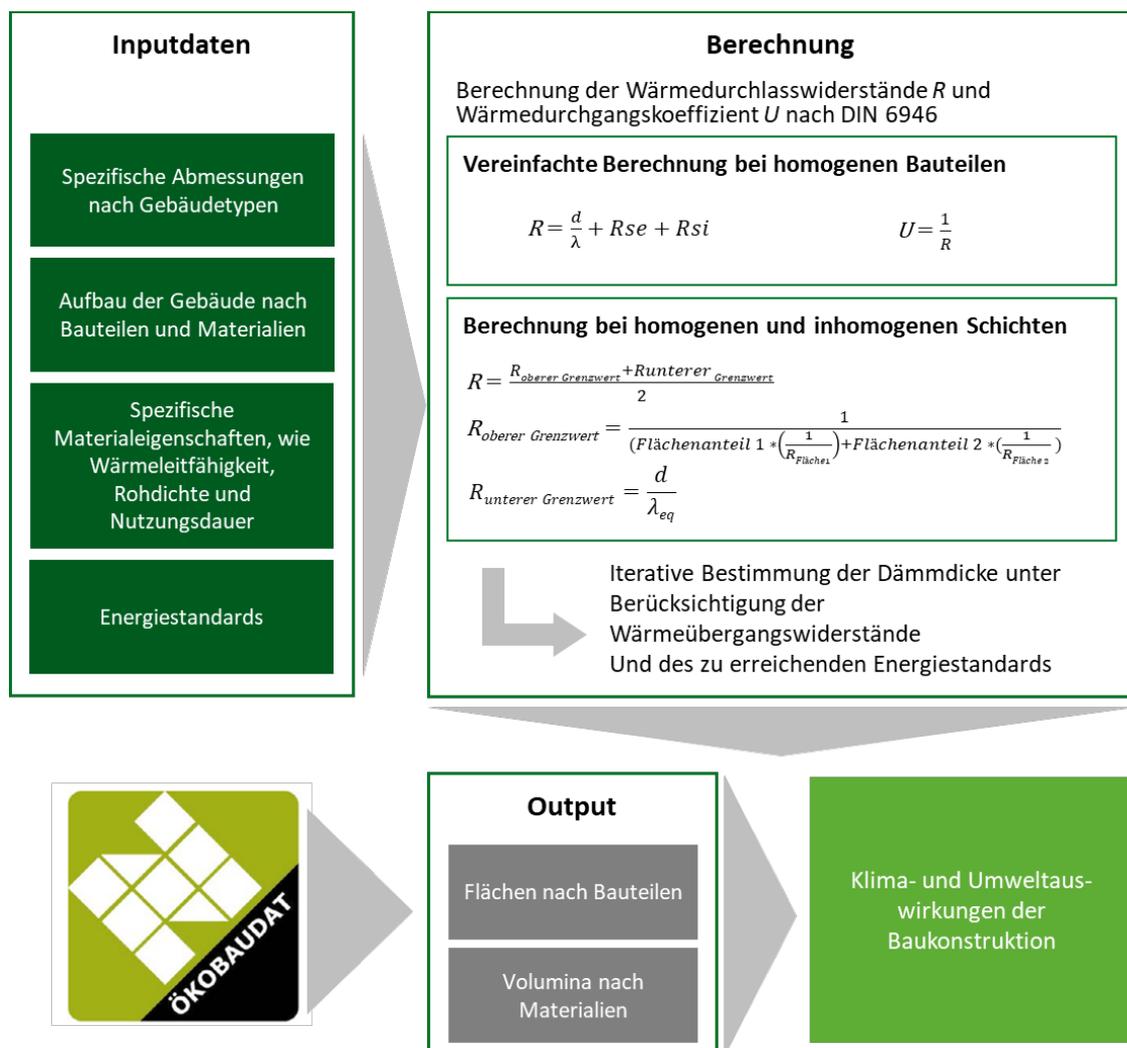
### 2.2.1 Baukonstruktion

#### Berechnung der Neubauten

Zur Berechnung der Klima- und Umweltauswirkungen der Baukonstruktion, durch die Herstellung der Bauteile, der Errichtung sowie Abriss und eine mögliche Verwertung wurde innerhalb des Projektes das Modell CONIC (Construction Impact Calculator) auf Basis der Programmiersprache Python<sup>4</sup> entwickelt.

Abbildung 3 gibt einen Überblick über das Modell. Eine beispielhafte Rechnung findet sich in Anhang A.8.

**Abbildung 3: Methodik zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands (und weiteren Klima- und Umweltauswirkungen) der Baukonstruktion von Neubauten**



Quelle: Eigene Darstellung IREES

<sup>4</sup> <https://www.python.org/>

In das Modell wird der Aufbau der unterschiedlichen Varianten nach Bauweise und Gebäudetyp eingegeben. Der Aufbau der Varianten wird dabei detailliert nach Bauteilen, Bauteilkategorien und Materialien definiert (siehe Kapitel 3.3.2). Zudem gehen in das Modell die Energiestandards (siehe Kapitel 3.1), die spezifischen Abmessungen nach Gebäudetypen (siehe Kapitel 3.3) und die Eigenschaften der Materialien ein. Eine Zusammenstellung der Materialien mit Wärmeleitfähigkeit und Nutzungsdauer findet sich unterschieden nach opaken und transparenten Bauteilen im Anhang A.3 und Anhang A.4.

Modellendogen wird dann die Dämmdicke nach Bauteilen auf Basis der erforderlichen U-Werte berechnet. Die Berechnung erfolgt nach DIN 6946 (2018-03) (Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren) und berücksichtigt sowohl homogene und inhomogene Bauteile als auch die Wärmeübergangswiderstände nach Bauteilen. Über den Wärmedurchlasswiderstand R und den Wärmedurchgangskoeffizient U wird die Dämmdicke iterativ anhand des zu erreichenden Energiestandards definiert. Dabei werden die Wärmeübergangswiderstände nach Bauteilen berücksichtigt (siehe Anhang A.1).

Anschließend werden mithilfe der Gebäudeabmessungen die Flächen und Volumina von Bauteilen und Materialien bestimmt und mit der ÖKOBAUDAT gekoppelt, um die Klima- und Umweltauswirkungen zu berechnen. Über die Volumina ist die ÖKOBAUDAT an das Modell gekoppelt, um materialspezifisch die Klima- und Umweltauswirkungen zu berechnen.

### **Berechnung für die energetische Sanierung im Gebäudebestand**

Für die Berechnung im Gebäudebestand wird nicht die Errichtung der Gebäude und die Herstellung aller Gebäudekomponenten untersucht, sondern nur der Energieaufwand und die THG-Emissionen für die Baumaßnahmen, die mit der energetischen Sanierung auf unterschiedliche Energiestandards verbunden sind. Dabei werden alle nachträglich aufgetragenen Materialien (Dämmmaterial, Putz, Armierung, Fensterglas, Rahmen etc.) berücksichtigt. Bei der Quantifizierung wird stets die gesamte Baumaßnahme betrachtet.

Es wird also nicht unterschieden, inwieweit Maßnahmen und Materialien bei einer reinen Instandsetzung ohne energetische Sanierung erforderlich gewesen wären. Grundsätzlich lässt das Berechnungsmodell diese Unterscheidung jedoch auch zu, so dass dies in Zukunft auch möglich ist. Ein weiterer Unterschied zum Neubau ist, dass der energetische Ausgangszustand der Gebäude berücksichtigt werden muss, der aus dem jeweiligen Baustandard im Errichtungsjahr der Gebäude und der bereits nachträglich erfolgten Sanierungsmaßnahmen einzelner Komponenten erfolgt. Das Modell berechnet daher zunächst, welche Effizienzmaßnahmen erforderlich sind, um die vorgegebenen Energiestandards mit Bezug auf die Gesamtenergieeffizienz der Gebäudehülle zu erreichen<sup>5</sup>. Dies ist modelltechnisch über ein lineares Optimiermodell implementiert, wobei die Auswahl der zu sanierenden Bauteile (Außenwand, Dach, Keller/Bodenplatte, Fenster) und die jeweiligen Sanierungstiefe (Dämmdicke, Fenster) unter Minimierung der erforderlichen Investitionen berechnet werden (Steinbach und Schultmann 2015; Steinbach 2016). Der spezifische Transmissionswärmekoeffizient ( $H_t'$ ) des jeweiligen Energiestandards geht somit als Nebenbedingung in die Optimierung ein. Das Modell führt die Optimierung separat für jedes Referenzgebäude und für jeden vorgegebenen Energiestandard durch. Im Resultat ergeben sich

---

<sup>5</sup> Das Berechnungsmodell setzt dabei auf dem von Steinbach (2016), Steinbach und Schultmann (2015) entwickelten Modell zur Berechnung von Maßnahmenpaketen und Investitionskosten für die energetische Sanierung auf und erweitert dieses um die Möglichkeit, unterschiedliche Baukonstruktionsvarianten zu ermitteln. Das Modell ist in Python mit dem Paket Pyomo für die Optimierung programmiert.

für jedes Referenzgebäude damit Unterschiede in dem zu sanierenden Bauteil bzgl. der Sanierungstiefe und damit verbundenen U-Wert des Bauteils nach der Sanierung.

Im zweiten Schritt werden die Materialmengen (Schichtdicke, Volumen und Gewicht) unterschiedlicher Konstruktionsvariante für die zu sanierenden Komponenten und die damit verbundenen energetischen Kennwerte und THG-Emissionen durch direkte Kopplung mit der ÖKOBAUDAT analog zur Berechnung im Neubau ermittelt. Der Aufbau der Konstruktionsvarianten und die erforderlichen Materialien werden als Input im Modell vorgegeben (vgl. Kapitel 3.4.3), wobei je nach Material unterschieden wird, inwieweit die jeweilige Schichtdicke als feste Größe eingeht oder vom Modell in Abhängigkeit des zu erreichenden U-Wertes und der jeweiligen Wärmeleitfähigkeit bestimmt wird.

Mit dem Modell lassen sich damit der kumulierte Energieaufwand, die THG-Emissionen, die resultierenden U-Werte sowie die Investitionskosten (vgl. Kapitel 2.4) flexibel für eine Vielzahl von unterschiedlichen Referenzgebäuden und unterschiedliche Energiestandards automatisiert berechnet. In diesem Vorhaben wird der Gebäudebestand über die hinterlegte Referenzgebäudedatenbank im Modell Invert/ee-lab berechnet, die auf den Untersuchungen der Gebäudetypologie und den weiteren Untersuchungen zum Sanierungszustand im deutschen Gebäudebestand beruhen. Im Rahmen dieses Projektes werden rund 650 unterschiedliche Referenzgebäude im Gebäudebestand unterschieden, für die jeweils drei unterschiedliche Energiestandards und 32 mögliche Konstruktionsvarianten der Gebäudekomponenten berechnet werden. Die Eingangsdaten und Datengrundlage werden in Kapitel 3.4 beschrieben.

### 2.2.2 Wärmeversorgung (nur Raumwärme)

Zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen von verschiedenen Wärmeversorgungssystemen zur Bereitstellung von Raumwärme in verschiedenen Gebäudetypen wurde im Rahmen des Projektes ein Modell entwickelt. Das Excel-basierte Tool berechnet auf Basis von Referenz-Wärmeversorgungssystemen den kumulierten Energieaufwand und das Treibhauspotenzial für unterschiedliche Leistungsgrößen von Heizungstechniken, Gebäudetypen und Sanierungszustände von Gebäuden. Das Tool umfasst dabei die Heiztechnik und das notwendige Verteilsystem.

Betrachtet werden Gasbrennwertkessel (GBK) sowie eine Luft-Wasser-Wärmepumpe (LWP) und Sole-Wasser-Wärmepumpe (EWP). Die Referenz-Wärmeversorgungssysteme basieren auf der Sachbilanz einer Studie von Klingler *et al.* (2014) und Daten der Ecoinvent-Datenbank. Für die Skalierung wurde die Masse des Wärmeversorgungssystems in Bezug auf die Heizleistung definiert. Dafür wurden Angaben über die Masse des Wärmeversorgungssystems und die Heizleistung der Wärmeversorgungssysteme aus Produkten von mehreren Herstellern gesammelt. Mit den gesammelten Daten wird eine Potenztrendlinie von Masse zu Heizleistung erstellt, die durch die Formel  $M = a \cdot P^b$  definiert. Die dafür notwendigen Parameter sind in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Faktoren der Potenztrendlinie der Wärmeversorgungssysteme**

Wärmeversorgungssysteme	Anzahl der Daten	Normalisierungs-konstante a	Skalierungsfaktor b	Gütemaß R2
Luft-Wasser-Wärmepumpe	127	64,40	0,60	0,80
Sole-Wasser-Wärmepumpe	97	34,75	0,64	0,72
Gasbrennwertkessel	47	9,98	0,54	0,88

Quelle: Klingler *et al.* (2014), Caduff *et al.* (2014) und eigene Berechnungen mit Ecoinvent

Die elektronischen Komponenten der Wärmeversorgungssysteme werden als konstant über die Heizleistung angenommen und somit nicht skaliert. Die Länge der Erdwärmesonde ist ebenfalls nicht von diesem Zusammenhang abhängig, sondern hängt von der Heizlast des Gebäudes sowie der spezifischen Entzugsleistung des Bodens ab. Das Verteilungssystem ist abhängig vom Heizsystem, der Vorlauftemperatur und der Heizfläche der Gebäude.

In Passivhäusern wird ein luftgeführtes System angenommen. Da allerdings keine Luft-Luft-Wärmepumpe betrachtet wurde, wird in Gebäuden mit Passivhausstandard zwar eine Luft-Wasser-Wärmepumpe, jedoch kein wasserbasiertes Verteilsystem installiert.

Zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands und des Treibhauspotenzials aus dem Einsatz von Strom und Erdgas während der Nutzungsphase wurden die in Tabelle 4 dargestellten Parameter verwendet. Für den Strom-Mix wurde ein prognostizierter Primärenergiefaktor im Jahr 2030 angenommen. Da eine Nutzungsdauer von 20 Jahren für die Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung unterstellt wird, werden das Treibhauspotenzial und der Primärenergiefaktor eines Strom-Mixes im Jahr 2030 berücksichtigt. Der Primärenergiefaktor bildet den Kraftwerkspark des National Energy and Climate Plan ab (Fritsche und Greß 2022).

**Tabelle 4: Treibhauspotenzial und Primärenergiefaktoren der Energieträger**

Energieträger	Treibhauspotenzial [g/kWh]	Primärenergiefaktor
Strom	259	1,71
Erdgas	246	1,1

Quelle: Fritsche und Greß (2022); Harthan et al. (2023)

Das Modell benötigt den Nutzenergiebedarf der Gebäude, um je nach Wärmeversorgungssystem einen End- und Primärenergiebedarf zu berechnen. Als Bezugsgröße wird die Nutzfläche nach GEG verwendet. Das Ergebnis wird jedoch, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, auf die Wohnfläche bezogen.

Für Bestandsgebäude wird der Nutzenergiebedarf für Raumwärme, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung für die verschiedenen Gebäudetypen und Energiestandards mit dem Modell Invert/ee-lab berechnet. Das Modell wird z.B. auch für die Szenarien Modellierung des Gebäudesektors im Projektionsbericht der Bundesregierung eingesetzt (Harthan *et al.* 2023) und wird gemeinsam von IREES, der TU-Wien und e-think betrieben (Steinbach 2016; Müller 2015). Eine ausführliche Modellbeschreibung ist im Anhang A.8 enthalten. Das Modell wird in dieser Studie jedoch nicht zur Modellierung von Szenarien eingesetzt, sondern um den Nutzenergiebedarf für thermische Konditionierung der unterschiedlichen Gebäudetypen zu berechnen. Im Modell ist der deutsche Gebäudebestand über verschiedene Referenzgebäude mit bauphysikalischen Parametern abgebildet. Die Datengrundlage basiert dabei insbesondere auf den Erhebungen des IWU im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich (Cischinsky und Diefenbach 2018; Diefenbach *et al.* 2010; Hörner *et al.* 2022). Die Berechnung des Nutz- und Endenergiebedarfs erfolgt dabei auf Basis eines Monatsbilanzverfahrens entsprechend der DIN V 18599-1 (2018-09).

Für die Berechnung des Nutzenergiebedarfs der Neubauten wird die Software „Energieberater 18599 3D PLUS von Hottgenroth“ eingesetzt (Hottgenroth Software 2023). Die Gebäudetypen werden dafür separat in das Modell integriert. Hottgenroth berechnet anhand der Abmessungen der Gebäudetypen und der thermisch relevanten Bauteile die Nutzfläche nach GEG und die Wohnfläche.

### 2.2.3 Raumlüftung

Die Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen von Lüftungsanlagen erfolgt mit einem weiteren excel-basierten Tool. Es werden sowohl Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) und Lüftungsanlagen ohne WRG betrachtet, die in unterschiedlichen Bauweisen und Gebäudetypen eingesetzt werden. Die Auslegung der Lüftungsanlagen erfolgt nach DIN 1946-6 (2019-12). Anhand der Luftwechselrate, der Leistungsaufnahme und Betriebsstunden der Lüftungsanlagen werden dann der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus berechnet. Dafür wird die ÖKOBAUDAT als Datengrundlage verwendet. In Bezug auf die Nutzung werden die Faktoren aus Tabelle 4 verwendet.

Tabelle 5 zeigt die Lüftungsart nach Gebäudetyp und Energiestandard.

**Tabelle 5: Zuordnung der Lüftungsart auf Gebäudetyp und Energiestandard**

Gebäudetyp	Energiestandard	Lüftungsart
Wohngebäude	GEG 2023 und EH 55	Dezentrales Zu- und Abluftsystem
Wohngebäude	EH 40	Zentrales Zu- und Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung
Wohngebäude	Passivhaus	Zentrales Zu- und Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung, Beheizung über die Zuluft
Verwaltungsgebäude	GEG 2023, EH 55 und EH 40	Zentrales Zu- und Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung
Verwaltungsgebäude	Passivhaus	Zentrales Zu- und Abluftsystem mit Rotationswärmetauscher und Luftheizung
Verkaufsgebäude	GEG 2023, EH 55 und EH 40	Zentrales Zu- und Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung
Verkaufsgebäude	Passivhaus	Zentrales Zu- und Abluftsystem mit Rotationswärmetauscher und Luftheizung
Schulgebäude	GEG 2023, EH 55 und EH 40	Zentrales Zu- und Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung
Schulgebäude	Passivhaus	Zentrales Zu- und Abluftsystem mit Rotationswärmetauscher und Luftheizung

Quelle: Eigene Darstellung IREES

Lüftungsanlagen tauschen die Raumluft in regelmäßigen Abständen aus, um die Last von Feuchte und Schadstoffen zu reduzieren. Die Luftwechselrate beschreibt, wie oft die Luft innerhalb einer Stunde ausgetauscht wird. Tabelle 6 zeigt die angenommenen Luftwechselraten nach Gebäudetypen. Zur Berechnung der Luftmenge werden daneben noch die Abmessungen der Gebäude benötigt (siehe Abschnitt 3.3). Darüber hinaus sind die Betriebsstunden und die Leistung der Lüftungsanlage entscheidend. Für die Lüftungsanlage mit WRG wird eine Leistung von 0,28 Wh/m<sup>3</sup>, für die Anlage ohne WRG 0,18 Wh/m<sup>3</sup> angenommen.

**Tabelle 6: Angenommene Luftwechselraten nach Gebäudetypen**

Gebäudetyp	Luftwechselrate [in 1/h]	Betriebsdauer pro Tag
Einfamilienhaus	0,4	24 Stunden
Mehrfamilienhaus	0,45	24 Stunden
Verkaufsgebäude	4	13 Stunden
Verwaltungsgebäude	4	9 Stunden
Schulgebäude	3	9 Stunden

Quelle: Eigene Darstellung IREES nach DIN 1946-6 (2019-12) und Feist (2006)

### 2.3 Bezugsgröße der Berechnung und Nutzungsdauer von Bauteilen

Der berechnete kumulierte Energieaufwand in der Einheit Kilowattstunden (kWh) wird auf die spezifische Wohn- bzw. Nutzfläche und die Bauteilnutzungsdauer (siehe Tabelle 7) normiert und nach Formel 1 dargestellt. Diese Methode ermöglicht die Bewertung des kumulierten Energieaufwands und der Umweltauswirkungen des Gebäudes aus heutiger Sicht.

Die in der ÖKOBAUDAT enthaltenen Datensätze bilden die Klima- und Umweltauswirkungen der Baustoffe und Materialien unter heutigen Produktionsabläufen, eingesetzten Verfahren und Energieträgern ab. Werden im Laufe der Lebensdauer des Gebäudes einzelne Bauteile im Zuge von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen ausgetauscht, so werden die eingesetzten Bauteile unter veränderten Bedingungen produziert. Die verwendete Datengrundlage (siehe Kapitel 2.1.3) bildet allerdings keine zukünftigen Produktionsbedingungen ab, weshalb die gewählte Methode keinen Austausch von Bauteilen berücksichtigt. Weiterhin ist durch die Annualisierung der Ergebnisse und Normierung auf die Wohn- bzw. Nutzfläche ein direkter Vergleich des kumulierten Energieaufwands und Umweltauswirkungen der eingesetzten Baustoffe, technischen Gebäudeausrüstung und der Betriebsphase des Gebäudes möglich.

**Formel 1: Normierung der Ergebnisse**

$$\frac{kWh}{m^2_{Wohn-oder\ Nutzfläche} \cdot a}$$

Tabelle 7 zeigt die berücksichtigten Lebensdauern der einzelnen Bauteile. Dabei wird nach Putz, tragende und nicht tragende Bauteile, Wärmedämmung, Dachziegel sowie Fenster unterschieden.

Eine vollständige Auflistung der Nutzungsdauern nach verwendeten Materialien findet sich in Abschnitt A.3

**Tabelle 7: Berücksichtigte Nutzungsdauer von Bauteilen [in Jahren]**

Bauteile	Nutzungsdauer
Putz	40
Tragende Bauteile	80
Nicht-tragende Elemente	60
Wärmedämmung	40

Bauteile	Nutzungsdauer
Dachziegel	60
Fenster	40

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von BBSR (2017)

## 2.4 Vergleich der gewählten Methode mit Rechenregeln des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, ist das QNG ein Zertifizierungssystem für Gebäuden und stellt damit umfassende Anforderungen an die ökologische, ökonomische und soziokulturelle Qualität von Gebäuden. Das QNG, verbunden mit der Förderung von Neubauten, macht konkrete Vorgaben an das Treibhauspotenzial und den Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar im Lebenszyklus von Gebäuden. Hinsichtlich des Treibhauspotenzials wird nicht in das fossile und biogene GWP unterschieden, sondern das  $GWP_{total}$  als Bewertungsgröße herangezogen.

Die Bilanzierungsregeln des QNG machen konkrete Vorgaben an die Systemgrenze der Erfassung des Gebäudes und des Lebenszyklus sowie an die zu verwendenden Datengrundlagen. Der Lebenszyklus, nach Definition des QNG, umfasst die Rohstoffbeschaffung (A1), Transport während der Herstellung (A2), Produktion der Baustoffe (A3), Austausch von Bauteilen bzw. Baustoffen (B4), Energiebedarf im Betrieb (B6) sowie die Abfallbehandlung (C3) und Deponierung (C4). Die Bilanzierung umfasst die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 (2018-12), wobei in der Berechnung nur die vorgegeben Datensätze und Sockelbeträge zu verwenden sind. Der Austausch von Bauteilen ist explizit zu berücksichtigen, die Austauschzyklen sind Bauteil- und Gerätespezifisch vorgegeben. Insgesamt ist ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren zu unterstellen. Darüber hinaus wird nicht nur die thermische Konditionierung von Gebäuden, also Raumwärme und Warmwasser, in der Zertifizierung berücksichtigt, sondern auch der Energie- bzw. Strombedarf der Nutzer und Nutzerinnen. Aus diesem Grund darf auch die Erzeugung von erneuerbarer Energie (mit Photovoltaik) am Gebäude bzw. auf dem Grundstück bilanziert und vom Energiebedarf des Gebäudes bzw. der Nutzer und Nutzerinnen subtrahiert werden.

Tabelle 8 vergleicht die Bilanzierungsregeln des QNG mit den Berechnungsannahmen in diesem Projekt anhand verschiedener Kriterien. Anders als im QNG werden in diesem Projekt das fossile und biogene GWP getrennt betrachtet. Zudem wird neben dem nicht erneuerbaren auch der erneuerbare Primärenergiebedarf berechnet.

Die Bezugsgröße ist in diesem Projekt die beheizte Fläche und die bauteilspezifische Lebensdauer. Anders als im QNG wird dadurch kein Austausch von Bauteilen berücksichtigt.

**Tabelle 8: Vergleich der Methodik des QNG mit den Berechnungsannahmen in diesem Projekt**

Kriterien	Berechnungsannahmen im Projekt	Bilanzierungsregeln im QNG
Indikatoren	$GWP_{fossil}$ und $GWP_{biogenic}$ , PENRE und PERE	$GWP_{100}$ und PENRE
Bezugsgröße	beheizte Fläche pro Jahr, bezogen auf die spezifische Bauteillebensdauer	Nettoraumfläche pro Jahr, bei einer Gebäudelebensdauer von 50 Jahren Austausch von Bauteilen
Module	A1-A3, A4, B1, B6, C1, C2, C3, C4, D	A1-A3, B4, B6, C3, C4, D

Kriterien	Berechnungsannahmen im Projekt	Bilanzierungsregeln im QNG
Gebäudestrom	Nur Lüftungsanlagen	Lüftungsanlagen und 20 kWh/(m <sup>2</sup> a) für Nutzung des Gebäudes
Berücksichtigte Bauteile	Keine Ausnahmen	Berücksichtigte Bauteile: >1 % Gebäudemasse oder >1 % PENRE oder >1 % GWP
Wärmeerzeugung	Verwendung der Ecoinvent-Datenbank	Wärmeerzeugung: Verwendung der ÖKOBAUDAT
Wärmebedarf	Berechnung nach DIN 18599	Berechnung nach DIN 18599

Quelle: Eigene Darstellung IREES

## 2.5 Berechnung der Lebenszykluskosten

Für eine ganzheitliche Bewertung der Kosten für die dargestellten Gebäude erfolgt eine Berechnung der Lebenszykluskosten für ausgewählte Varianten.

Die Lebenszykluskosten bzw. Gesamtkosten umfassen die Investition, Ersatzinvestition, den Energiebezug und die Wartung. Aufgrund der gewählten Methode (siehe Kapitel 2.3) werden keine Ersatzinvestitionen angenommen.

Es wird weiterhin in die Investitionskosten für die Baukonstruktion bzw. die energetische Sanierung der Gebäudehülle und für technische Gebäudeausrüstung (TGA) unterschieden. Dazu gehören die Wärmepumpe, das Verteilsystem (Fußbodenheizung, Plattenheizkörper) und die Lüftungsanlagen. Für die Baukonstruktion wird eine rechnerische Nutzungsdauer von 30 Jahren, für die Gebäudetechnik eine Nutzungsdauer von 20 Jahren unterstellt. Für die Wartungskosten werden pauschal 2 % der Anfangsinvestition für die TGA berechnet. (Enseling *et al.* 2020)

Weiterhin wird ein kalkulatorischer Zinssatz von 3 % unterstellt. Die Kosten werden mithilfe der Parameter annuisiert und aufsummiert, um verschiedene Varianten zu vergleichen.

Zur Berechnung der Energiebezugskosten werden die Endverbraucherpreise nach Energieträgern aus Mendelevitch *et al.* (2024) verwendet. In den Rahmendaten des Projektionsberichts der Bundesregierung wird eine Projektion der Energiepreise bis 2045 vorgenommen. Tabelle 9 zeigt die angenommenen Energiepreise für Erdgas und Wärmepumpen-Strom.

Da aufgrund der Betriebsdauer von Wärmeversorgungssystemen ein Strom-Mix von 2030 unterstellt wird (siehe Kapitel 2.3), wird ein Durchschnitt der Energiepreise bis 2030, ausgehend von 2022 angenommen. Im Jahr 2022 lag der Endverbraucherpreis für Erdgas bei rund 12 ct/kWh und der Endverbraucherpreis für Wärmepumpen-Strom bei rund 39 ct/kWh (nach Angaben in den Energiedaten des BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023)). Im Projektionsbericht wird bis 2030 eine Preisreduktion unterstellt.

**Tabelle 9: Endverbraucherpreise für Erdgas und Strom [in ct/kWh]**

Energieträger	Preis
Erdgas	9,50
Strom	26,7

Quelle: BMWK (2023); Mendelevitch *et al.* (2024)

Datengrundlage für die kapitalgebundenen Kosten im Neubau ist das Baupreislexikon<sup>6</sup>. Das Baupreislexikon bietet eine umfassende Sammlung an Preisen für Bauelemente und Bauleistungen. Dabei wird jeweils eine Spannbreite (niedrig, mittel und hoch) an Preisen angegeben.

Für die Berechnung im Bestand werden die resultierenden Kosten anhand der modellierten Maßnahmenpakete zur Erreichung der definierten Energiestandards berechnet. Neben den Auswertungen aus dem Baupreislexikon dienen dabei die von Hinz (2015) entwickelten Kostenkurven für die unterschiedlichen Gebäudekomponenten. Die Kostenkurven von Hinz (2015) werden zunächst mittels Baupreisindex auf das Jahr 2022 skaliert. Diese stellen typische Kosten in Abhängigkeit der Dämmdicke dar. Es sind jeweils die "Ohnehin-Kosten", wie bspw. Gerüst und Malerarbeiten und die energetischen Mehrkosten durch die Dämmung enthalten. Bei der Berechnung im Gebäudebestand werden „Ohnehin-Kosten“ und energetische Mehrkosten differenziert ausgewertet. Die Kostenkurven werden im Modell hinterlegt, um die Investitionskosten zur Erreichung der unterschiedlichen Energiestandards in Abhängigkeit des Ausgangszustandes der jeweiligen Bestandsgebäude zu berechnen.

### **Unterscheidung der Investitionskosten in den unterschiedlichen Konstruktionsvarianten**

Die Analyse von Hinz (2015) basiert dabei auf den gängigsten Konstruktionsvarianten für die einzelnen Gebäudekomponenten bei der energetischen Sanierung auf Basis real umgesetzter Projekte. Die den Kostenkurven unterstellte Konstruktionsvariante, wie bspw. ein Wärmedämmverbundsystem mit Polystyrol für die Außenwand, dienen als Basisvariante in der Berechnung. Um die Unterschiede in den Kosten zwischen den unterschiedlichen Konstruktionsvarianten zu berücksichtigen, erfolgt eine Analyse der Materialkosten mit den Daten aus dem Baupreislexikon. Dabei werden die spezifischen Kosten der Materialien der Basisvariante mit den Materialien der in dieser Studie definierten Konstruktionsvarianten verglichen. Für die Berechnung der Investitionskosten werden die Kostenkurven anhand der Unterschiede entsprechend skaliert.

---

<sup>6</sup> Das Baupreislexikon bietet Preise für verschiedene Bauleistungen und Bauelemente für Deutschland sowie für einzelne Stadt- und Landkreise. Die Preise werden anhand von mehreren Faktoren, wie Qualifikationen, Löhne und Gerätekosten bestimmt und monatlich aktualisiert. Weitere Informationen, siehe: <https://www.baupreislexikon.de/>

## 3 Berechnungsparameter und Inputdaten

### 3.1 Energiestandards

Im Neubau werden neben dem definierten Standard im Gebäudeenergiegesetz (GEG 2023) der Passivhaus-Standard sowie die beiden Effizienzhaus-Stufen (EH) 55 und 40 betrachtet. Das GEG entspricht seit Juli 2022 primärenergetisch einem EH 55, in Bezug auf die Gebäudehülle gelten jedoch noch die Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009. Ein Effizienzhaus ist ein technischer Standard und zeichnet Gebäude aus, die eine höhere Energieeffizienz als der GEG-Standard vorweisen. Ein Gebäude, das den Effizienz-Standard EH 40 erfüllt, benötigt 40 % der Primärenergie eines Referenzgebäudes und die Effizienz der Gebäudehülle gemessen am spezifischen Transmissionswärmekoeffizient beträgt 55 % von dem des Referenzgebäudes.

Das Passivhaus ist ein international anerkannter, physikalisch begründeter Standard bei dem die Wärmeverluste durch intelligente Planung und passive Maßnahmen wie thermisch hochwertige Baukomponenten und eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung so weit reduziert sind, dass der verbleibende Energiebedarf nachhaltig bereitstellbar ist. Regelmäßig führt die Anwendung des Passivhaus-Konzept zu hoher Wirtschaftlichkeit, sowie gesunden und komfortablen Nutzungsbedingungen (Schnieders 2022).

Tabelle 10 zeigt die U-Werte<sup>7</sup> der einzelnen Bauteile und den Wärmebrückenzuschlag für jeden betrachteten Energieeffizienz-Standard.

**Tabelle 10: U-Werte nach Bauteilen der betrachteten Energiestandards [in W/ (m<sup>2</sup>·K)] im Neubau**

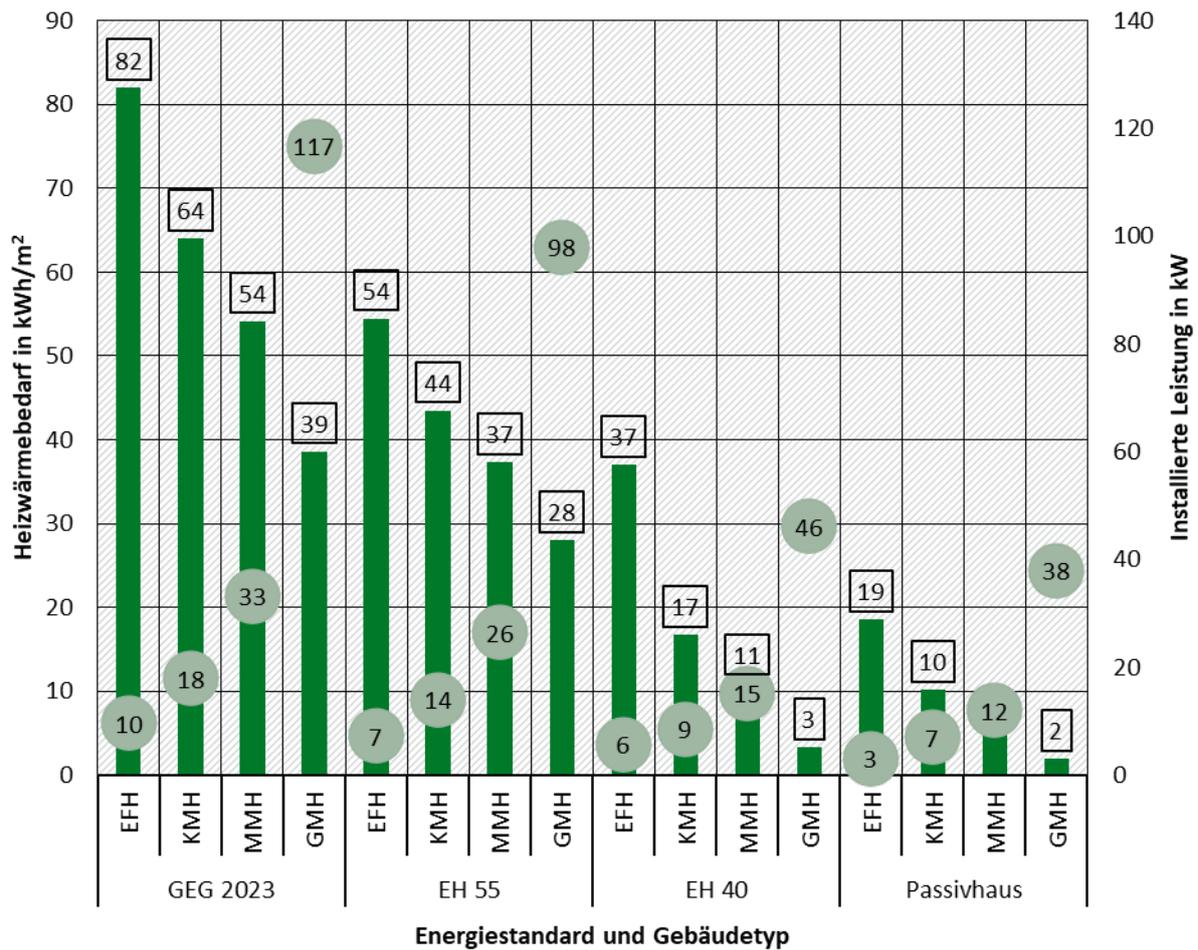
Energie- standard	Oberste Geschossdecke	Außen- wand	Fenster	Dach	Bodenplatte, Kellerdecke und -wand	Wärmebrücken- zuschlag
GEG 2023	0,20	0,28	1,30	0,20	0,35	0,10
EH 55	0,14	0,20	0,90	0,14	0,25	0,05
EH 40	0,14	0,18	0,85	0,14	0,20	0,03
Passivhaus	0,12	0,15	0,75	0,12	0,18	0,005

Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 4 zeigt darüber hinaus den Heizwärmebedarf (bezogen auf die Nutzfläche nach GEG) und die installierte Leistung der verschiedenen Energiestandards und Wohngebäudetypen. Eine entsprechende Übersicht für Nichtwohngebäude befindet sich im Anhang A.7.

<sup>7</sup> Der U-Wert bezeichnet den Wärmedurchgangskoeffizienten und ist damit ein Indikator für die Wärmedurchlässigkeit von Bauelementen

**Abbildung 4: Heizwärmebedarf und installierte Leistung der verschiedenen Wohngebäudetypen und Energiestandards**



Quelle: Eigene Berechnung IREES

Der zuvor beschriebene Ausgangszustand der Gebäude wird im Modell Invert/ee-Lab auf unterschiedliche Energieeffizienz-Standards saniert. In der Untersuchung sind folgende Standards relevant:

- ▶ GEG 2023
- ▶ Effizienzhaus 55
- ▶ Effizienzhaus 40

**Tabelle 11: Anforderungen an den Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust von sanierten Gebäuden**

Energieeffizienzstandard	Anforderung an Primärenergiebedarf im Vergleich zum Neubau Referenzgebäude im GEG	Anforderung an Transmissionswärmeverlust im Vergleich zum Neubau Referenzgebäude im GEG
GEG	1,4	1,4
EH 55	0,5	0,7
EH 40	0,39	0,55

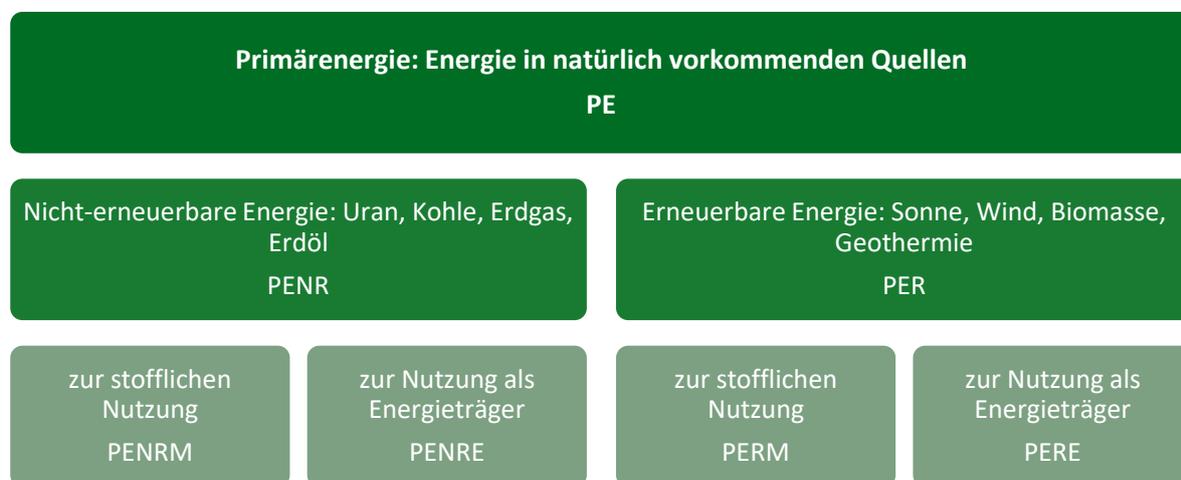
Quelle: GEG

### 3.2 Wirkungsindikatoren

In der Lebenszyklusanalyse gibt es eine Reihe von Umweltauswirkungen, die untersucht und bewertet werden können. Viele dieser Umweltauswirkungen werden auch in der ÖKOBAUDAT abgebildet. Der Fokus in diesem Projekt liegt allerdings auf dem kumulierten Energieaufwand und Treibhauspotenzial. Abbildung 5 zeigt die Definition des kumulierten Energieaufwands. Primärenergie ist die zur Verfügung stehende Energie in natürlich vorkommenden Quellen und wird in erneuerbare und nicht-erneuerbare Energie unterschieden. Nicht-erneuerbare Primärenergie (Primary Energy Non Renewable, PENR) umfasst die fossilen Energieträger Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran. Erneuerbare Primärenergie (Primary Energy Renewable, PER) umfasst Energie, die aus erneuerbaren Ressourcen gewonnen wird, auch Strom aus Photovoltaik und Wind sowie Wärme aus Solarthermie.

Weiterhin wird in der EN 15804 (2022-03) zwischen der energetischen Nutzung der Primärenergie und der stofflich gebundenen Primärenergie unterschieden. Die stoffliche gebundene Primärenergie (Primary Energy Non Renewable Material, PENRM) beschreibt den Energiegehalt von Materialien, insbesondere die in Holzprodukten gebundenen Energie, während die energetische Nutzung (Primary Energy Non Renewable Energy, PENRE) den Energieaufwand zur Produktion der Materialien umfasst. Diese Klassifizierung gilt auch erneuerbare Energien DIN EN 15804 (2022-03).

**Abbildung 5: Definition des kumulierten Energieaufwands**



Quelle: Eigene Darstellung nach DIN EN 15804 (2022-03)

In der neuen Bilanzierungsmethode der ÖKOBAUDAT (nach DIN EN 15804 (2022-03) + A2) werden fossile und biogene Treibhausgase sowie Treibhausgase aus Landnutzung (luluc) unterschieden. Biogene Treibhausgase entstehen durch Oxidation oder Zerfall von Biomasse, beispielsweise durch Verbrennung. Darüber hinaus berücksichtigt der Indikator „biogenes GWP“ die während des Wachstums von Biomasse aus der Atmosphäre aufgenommene und über die Lebensdauer des Materials gebundene Menge an CO<sub>2</sub>. Insbesondere bei Holzprodukten wird biogener Kohlenstoff wirksam gebunden. Wird das Produkt am Lebensende jedoch energetisch verwertet, oxidiert der Kohlenstoff wieder zu CO<sub>2</sub> und wird an die Atmosphäre abgegeben. Aus diesem Grund wird in diesem Projekt nur das fossile GWP der Produkte und Gebäude dargestellt und das biogene GWP gesondert ausgewiesen (DIN EN 16449:2014-06).

### 3.3 Referenzgebäude und Bauweisen im Neubau

Zur Berechnung der Klima- und Umweltauswirkungen von Gebäuden ist zunächst das Gebäude zu definieren. Die Gliederung der Flächen und Rauminhalte erfolgt dafür nach der DIN 277 (2021-08), die in Tabelle 29 im Anhang A.1 dargestellt sind. Für die Berechnungen sind vor allem die Bruttogrundfläche (BGF), die Wohnfläche (WF) und die Nutzfläche (NF) relevant. Die Bruttogrundfläche ergibt sich aus der Gesamtfläche aller Grundrissebenen des Gebäudes. Für die Umrechnung der Bruttogrundfläche (BGF) zur Wohnfläche (WF) in Wohngebäuden werden Faktoren verwendet, die in Tabelle 30 im Anhang A.1 dargestellt sind. Für die Nichtwohngebäude werden die Faktoren aus dem Bauwerkszuordnungskatalog (BWZK) verwendet. Für Nichtwohngebäude findet eine Umrechnung auf die Nutzfläche (NF) statt.

#### 3.3.1 Untersuchte Referenzgebäudetypen im Neubau

In Bezug auf Wohngebäude werden folgende Gebäudetypen betrachtet:

- ▶ Einfamilienhaus
- ▶ Kleines Mehrfamilienhaus
- ▶ Mittleres Mehrfamilienhaus
- ▶ Großes Mehrfamilienhaus

Tabelle 12 zeigt die Abmessungen und Gebäudeflächen nach Gebäudetypen, jeweils mit und ohne Keller. Die Geschosshöhen unterscheiden sich je nach Bauweise und werden deshalb modell-endogen berechnet. Der Keller ist unbeheizt, weshalb die Wohnfläche sich nicht zu den Varianten ohne Keller unterscheidet.

**Tabelle 12: Abmessungen der Wohngebäude nach Gebäudetypen**

Gebäudetyp	Länge (m)	Breite (m)	Lichte Höhe (m)	Geschosse (Anzahl)	BGF (m <sup>2</sup> )	Wohnfläche (m <sup>2</sup> )
Einfamilienhaus mit Keller	12	8,5	2,6	3	306	147
Einfamilienhaus ohne Keller	12	8,5	2,6	2	204	147
Kleines Mehrfamilienhaus mit Keller	18	12	2,6	3	648	324
Kleines Mehrfamilienhaus ohne Keller	18	12	2,6	2	432	324
Mittleres Mehrfamilienhaus mit Keller	17	14	2,6	5	1190	714
Mittleres Mehrfamilienhaus ohne Keller	17	14	2,6	4	952	714
Großes Mehrfamilienhaus mit Keller	30	18	2,6	9	4860	3240
Großes Mehrfamilienhaus ohne Keller	30	18	2,6	8	4320	3240

Quelle: Eigene Darstellung IREES

In Bezug auf die Nichtwohngebäude werden Büro- bzw. Verwaltungsgebäude, Verkaufsbauwerke und Schulgebäude betrachtet. Tabelle 13 zeigt die relevanten Parameter nach Gebäudetypen.

Als Verkaufsgebäude wird ein eingeschossiger Supermarkt untersucht. Es ergibt sich eine BGF von 1.000 m<sup>2</sup> und nach Umrechnung mit den in Tabelle 30 dargestellten Faktoren eine Nutzfläche von 710 m<sup>2</sup>. Das Büro- bzw. Verwaltungsgebäuden entspricht einem Rathaus in einer kleineren Kommune. Anhand der Abmessungen ergibt sich eine BGF von 2.800 m<sup>2</sup> und eine NF von 1.988 m<sup>2</sup>. Für Schulgebäude wird eine BGF von 2.025 und eine NF von 1.519 m<sup>2</sup> angenommen.

**Tabelle 13: Abmessungen der Nichtwohngebäude nach Gebäudetypen**

Gebäudetyp	Länge (m)	Breite (m)	Lichte Höhe (m)	Geschosse (Anzahl)	BGF (m <sup>2</sup> )	Nutzfläche (m <sup>2</sup> )
Verkaufsgebäude	50	20	5	1	1000	750
Büro- und Verwaltungsgebäude mit Keller	40	14	3	5	2800	1988
Büro- und Verwaltungsgebäude ohne Keller	40	14	3	4	2240	1590
Schulgebäude mit Keller	45	15	3	3	2700	1917
Schulgebäude ohne Keller	45	15	3	2	2025	1438

Quelle: Eigene Darstellung IREES

### 3.3.2 Betrachtete Bauweisen im Neubau

Die in dieser Studie betrachteten Bauweisen und Gebäudekonfigurationen wurden im Rahmen von mehreren internen Workshops mit den im Projekt involvierten Experten Dr. Benjamin Krick und Dr. Burkhard Schulze-Darup ausgewählt. Bei der Auswahl wurde sowohl auf eine möglichst große Variation als auch auf die Abbildung der reale Baupraxis geachtet. Es werden folgende Bauweisen betrachtet:

- ▶ Massivbauweise monolithisch
- ▶ Massivbauweise Stahlbeton/Kalksandstein/ Ziegel + WDVS / Vorhangfassade
- ▶ Massivholzbau
- ▶ Holzleichtbau
- ▶ Holzskelettbauweise
- ▶ Betonskelettbauweise

Für alle Bauweisen wird der Aufbau anhand spezifischer Bauteile und Materialien definiert. Die dargestellten Bauteile orientieren sich an den Kostengruppen der DIN 276 (2018-12). In der Berechnung werden sowohl die Baukonstruktion als auch ausgewählte technische Anlagen berücksichtigt. Tabelle 14 zeigt die ausgewählten Gebäudekomponenten nach den Kostengruppen.

**Tabelle 14: Berücksichtigte Kostengruppe nach DIN 276**

Kostengruppe	Bezeichnung
KG 320	Gründung und Unterbau
KG330	Außenwände und vertikale Baukonstruktionen (außen)

Kostengruppe	Bezeichnung
KG340	Innenwände und vertikale Baukonstruktionen (innen)
KG350	Decken und horizontale Baukonstruktionen
KG360	Dächer
KG420	Wärmeversorgungsanlagen, inkl. Wärmeerzeuger und Verteilsystem
KG430	Raumluftechnische Anlagen

Quelle: DIN 276:2018-12

In der DIN 276 (2018-12) werden die einzelnen Kostengruppen noch weiter in einzelne Bestandteile untergliedert. In dieser Studie wird eine andere Untergliederung gewählt, um einen höheren Detailgrad abzubilden. Für jedes Bauteil werden deshalb, wie in Abbildung 6 dargestellt, verschiedene Bauteilkategorien definiert. Jeder Bauteilkategorie werden weiterhin ein oder mehrere Materialien zugeordnet.

**Abbildung 6: Aufbau der Varianten im Neubau**



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Im Folgenden werden die verschiedenen Varianten nach Bauweise vorgestellt. Bei der Auswahl wurde sowohl auf eine möglichst große Variation als auch auf die Abbildung der realen Baupraxis geachtet. Dabei werden jeweils die Außenwand, Innenwände und Geschossdecken dargestellt. Die weiteren Bauteile und Bauteilkategorien werden übergreifend abgebildet. Weiterhin werden in Kapitel 3.3.3 zentrale Berechnungsannahmen beschrieben.

#### **Aufbau der Gebäude nach Bauweisen**

In der monolithischen Massivbauweise besteht in den Varianten 1 und 2 die Außenwand aus porosiertem Ziegel, es unterscheiden sich nur die Wärmeleitfähigkeiten des Mauerwerks. In Variante 3 besteht die Außenwand aus Porenbeton. Aufgrund der einschaligen (monolithischen) Bauweise und dem bereits wärmedämmenden Mauerwerk wird neben Wärmedämmputz in der Außenwand kein zusätzlicher Dämmstoff benötigt. In Variante 1 und 2 bestehen die tragenden Innenwände ebenfalls aus Ziegel, in Variante 3 aus Kalksandstein. In allen Varianten werden leichte Innenwände aus einer Stahlkonstruktion mit Gipskarton errichtet. Die Geschossdecken bestehen im monolithischen und zweischaligen Massivbau aus Stahlbeton. In Bezug auf den Bodenaufbau wird mangels Alternativen in der Datengrundlage (siehe Abschnitt 2.1.3) in allen

Varianten eine Trittschalldämmung aus Mineralwolle eingesetzt und nur hinsichtlich des Estrichs variiert. Eine Übersicht der Varianten ist in Tabelle 15 dargestellt.

**Tabelle 15: Varianten der monolithischen Massivbauweisen nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien**

Bauteil	Bauteilkategorie	Variante 1: Porosierter Ziegel (0.09)	Variante 2: Porosierter Ziegel (0.07)	Variante 3: Porenbeton
Außenwand	Tragwerk	Porosierter Ziegel 0.09 (mit Dämmstoff gefüllt)	Porosierter Ziegel 0.07 (mit Dämmstoff gefüllt)	Porenbeton
Außenwand	Dämmstoff	Wärmedämmputz	Wärmedämmputz	Wärmedämmputz
Tragende Innenwände		Ziegel	Ziegel	Kalksandstein
Leichte Innenwände		Gipskarton- Stahlkonstruktion mit Mineralwolle	Gipskarton- Stahlkonstruktion mit Mineralwolle	Gipskarton- Stahlkonstruktion mit Mineralwolle
Geschoss- decke	Tragwerk	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton
Geschoss- decke	Trittschalldämmung	Mineralwolle	Mineralwolle	Mineralwolle
Geschoss- decke	Estrich	Zementestrich	Gussasphaltestrich	Fertigteilestrich aus Gipsfaserplatten

Quelle: Neufert (2022), Definition im Rahmen des Projektes

Die Massivbauweise in Kombination mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) oder einer Vorhangfassade wird im Folgenden als zweischalige Massivbauweise bezeichnet. In Variante 1 werden sowohl die Außenwand als auch die tragenden Innenwände aus Stahlbeton gefertigt. Die Außenwand wird durch ein WDVS mit Mineralwolle ergänzt. Grundsätzlich können in einem WDVS und einer Vorhangfassade alle Dämmstoffe eingesetzt werden. Die Außenwände und tragenden Innenwände in Variante 2 bestehen aus Kalksandstein. Es wird ebenfalls ein WDVS auf die Außenwand angebracht. Die leichten Innenwände werden in Variante 1 und 2 aus einer Stahlkonstruktion und Gipskarton zusammengestellt. In Variante 3 bestehen sowohl die Außenwände als auch die Innenwände vollständig aus Ziegeln. Variante 4 entspricht Variante 1, allerdings wird anstelle eines WDVS eine Vorhangfassade angebracht. Variante 5 entspricht analog Variante 2. Wie die Varianten in der monolithischen Massivbauweise bestehen die Geschossdecken aus Stahlbeton und der Bodenaufbau wird hinsichtlich des Estrichs variiert. Eine Übersicht der Varianten ist in Tabelle 16 dargestellt.

**Tabelle 16: Definierte Varianten in zweischaliger Massivbauweise nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien**

Bauteil	Bauteil-kategorie	Variante 1: Stahlbeton WDVS mit EPS	Variante 2: Kalksandstein WDVS mit EPS	Variante 3: Ziegel WDVS mit EPS	Variante 4: Stahlbeton Vorhangfassade mit Mineralwolle	Variante 5: Kalksandstein mit Vorhangfassade mit Mineralwolle
Außenwand	Tragwerk	Stahlbeton	Kalksandstein	Ziegel	Stahlbeton	Kalksandstein
Außenwand	Dämmstoff	WDVS mit EPS	WDVS mit EPS	WDVS mit EPS	Vorhangfassade mit Mineralwolle	Vorhangfassade mit Mineralwolle
Tragende Innenwände		Stahlbeton	Kalksandstein	Ziegel	Stahlbeton	Kalksandstein
Leichte Innenwände		Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle	Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle	Ziegel	Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle	Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle
Geschossdecke	Tragwerk	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton
Geschossdecke	Trittschalldämmung	Mineralwolle	Mineralwolle	Mineralwolle	Mineralwolle	Mineralwolle
Geschossdecke	Estrich	Zementestrich	Guss-Asphalt-estrich	Estrich aus Gipsfaserplatten	Zementestrich	Gussasphalt-estrich

Quelle: Neufert (2022), Definition im Rahmen des Projektes

In der Massivholzbauweise werden zwei verschiedene Varianten abgebildet. Die Außenwände beider Varianten werden aus Brettschichtholz konstruiert. In Variante 1 wird die Außenwand um ein WDVS mit Mineralwolle ergänzt. In Variante 2 wird eine Vorsatzschale Doppel-T-Trägern (TJI) ausgeblasen mit Zellulose vorgebaut. Die tragenden Innenwände werden in Variante 1 als Holzbauwände, ausgeblasen mit Mineralwolle, gebaut. Die leichten Innenwände sind eine Stahlkonstruktion mit Gipskarton. In Variante 2 werden die Innenwände auch als Holzbauwände konstruiert, die tragenden Innenwände in Holzmassivbauweise. Die Geschosdecken bestehen in der Massivholzbauweise aus Brettstapelholz. Wie zuvor wird der Bodenaufbau hinsichtlich des Estrichs variiert. Eine Übersicht der Varianten ist in Tabelle 17 dargestellt.

**Tabelle 17: Definierte Varianten in Massivholzbauweise nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien**

Bauteil	Bauteilkategorie	Variante 1: Brettschichtholz WDVS mit Mineralwolle	Variante 2: Brettschichtholz Vorsatzschale mit TJI mit Zellulose
Außenwand	Tragwerk	Brettsperrholz	Brettsperrholz
Außenwand	Dämmstoff	WDVS mit Mineralwolle	Vorsatzschale mit TJI ausgeblasen mit Zellulose
Tragende Innenwände		Holzleichtbauwände mit Mineralwolle	Holzbauwände Massivbau
Leichte Innenwände		Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle	Holzbauwände
Geschoss-decke	Tragwerk	Holzmassivdecke mit Brettstapelholz	Holzmassivdecke mit Brettstapelholz
Geschossdecke	Trittschalldämmung	Mineralwolle	Mineralwolle
Geschossdecke	Estrich	Gussasphaltestrich	Fertigteilestrich aus Holzspanplatten oder OSB- Platten

Quelle: Neufert (2022), Definition im Rahmen des Projektes

Die Außenwand in Variante 1 wird als Holzrahmenkonstruktion mit Doppel-T-Trägern (TJJ) definiert, die zur Dämmung mit Zellulose ausgeblasen wird. In Variante 2 wird eine Holzrahmenkonstruktion mit Brettschichtholz gefertigt, wobei Mineralwolle als Dämmstoff in der Konstruktion eingesetzt wird. In Variante 3 wird eine Holzrahmenkonstruktion mit Konstruktionsvollholz umgesetzt. Zusätzlich wird ein Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolle angebracht. Die tragenden Innenwände werden in allen Varianten als Holzbauwände mit Mineralwollmatten konstruiert. Die leichten Innenwände bestehen in Variante 1 aus einer Stahlkonstruktion mit Gipskarton und in Variante 2 und 3 aus Holzbauwänden. Die Geschossdecke wird in allen Varianten mit Brettstapelholz (BSH) gefertigt. Die Varianten der Holzleichtbauweise sind in Tabelle 18 dargestellt.

**Tabelle 18: Definierte Varianten in Holzleichtbauweise nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien**

Bauteil	Bauteilkategorie	Variante 1: TJI mit Zellulose	Variante 2: Brettschichtholz Mineralwolle in Konstruktion	Variante 3: Konstruktionsvollholz mit Zellulose
Außenwand	Tragwerk	Holzrahmen- konstruktion mit TJI	Holzrahmen- konstruktion mit Brettschichtholz	Holzrahmen mit Konstruktionsvollholz (KVH)
Außenwand	Dämmstoff	ausgeblasen mit Zellulose	Mineralwolle in der Konstruktion	ausgeblasen mit Zellulose
Tragende Innenwände		Holzbauwände mit Mineralwollmatten	Holzbauwände mit Mineralwollmatten	Holzbauwände mit Mineralwollmatten

Bauteil	Bauteilkategorie	Variante 1: TJI mit Zellulose	Variante 2: Brettschichtholz Mineralwolle in Konstruktion	Variante 3: Konstruktionsvollholz mit Zellulose
Leichte Innenwände	Tragwerk	Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle	Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle	Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle
Geschossdecke		Sichtbalkendecke mit Brettstapelholz und Furnierschichtholz	Sichtbalkendecke mit Brettstapelholz und Furnierschichtholz	Sichtbalkendecke mit Brettstapelholz und Furnierschichtholz
Geschossdecke	Trittschalldämmung	Mineralwolle	Mineralwolle	Mineralwolle
Geschossdecke	Estrich	Gussasphaltestrich	Fertigteilestrich aus Holzspanplatten oder OSB-Platten	Fertigteilestrich aus Holzspanplatten oder OSB-Platten

Quelle: Neufert (2022), Definition im Rahmen des Projektes

Für die Nichtwohngebäude werden zusätzlich zu den vier vorherigen Varianten noch weitere Varianten in Skelettbauweise definiert. Es wird eine Beton- und eine Holz-Skelettbauweise betrachtet.

Tabelle 19 zeigt die beiden Varianten im Beton-Skelettbau. Das Tragwerk in der Außenwand besteht aus einer Skelettkonstruktion aus Stahlbeton. In Variante 1 wird diese um Beton-Sandwich-Platten mit Polyurethan-Hartschaumplatten, in Variante 2 mit Mauersteinen aus Porenbeton und Wärmedämmputz ergänzt. Die tragenden Innenwände bestehen in beiden Varianten aus einer Skelettkonstruktion und Kalksandstein. Die leichten Innenwände bestehen wie bei Wohngebäuden aus einer Stahlkonstruktion mit Gipskarton. Die Geschossdecken sind eine Konstruktion aus Stahlbeton mit Unterzügen, Trittschalldämmung aus Mineralwolle und Zementestrich.

**Tabelle 19: Definierte Varianten in Beton-Skelettbauweise nach Bauteilen, Bauteilkategorien und mit relevanten Materialien**

Bauteil	Bauteilkategorie	Variante 1: Beton-Skelettbau mit Beton-Sandwich-Platten	Variante 2: Beton-Skelettbau mit Porenbeton
Außenwand	Tragwerk	Skelettkonstruktion aus Stahlbeton Ausfachung mit Beton-Sandwich-Platten	Skelettkonstruktion aus Stahlbeton Ausfachung mit Porenbeton
Außenwand	Dämmstoff	Polyurethan-Hartschaumplatten in der Sandwich-Konstruktion	Wärmedämmputz
Tragende Innenwände		Skelettkonstruktion aus Stahlbeton Ausfachung mit Kalksandstein	Skelettkonstruktion aus Stahlbeton Ausfachung mit Kalksandstein
Leichte Innenwände		Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle	Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle

Bauteil	Bauteilkategorie	Variante 1: Beton-Skelettbau mit Beton-Sandwich-Platten	Variante 2: Beton-Skelettbau mit Porenbeton
Geschossdecke	Tragwerk	Stahlbeton (mit Unterzügen)	Stahlbeton (mit Unterzügen)
Geschossdecke	Trittschalldämmung	Mineralwolle	Mineralwolle
Geschossdecke	Estrich	Zementestrich	Zementestrich

Quelle: Neufert (2022), Definition im Rahmen des Projektes

Für die Holz-Skelettbauweise ist nur eine Variante definiert, die in Tabelle 20 dargestellt ist. Die Außenwand besteht aus einer Skelettkonstruktion aus Brettschichtholz sowie einer Holzrahmenkonstruktion mit TJI, welche mit Mineralwolle ausgekleidet ist. Die tragenden Innenwände sind ebenso als Skelettkonstruktion mit Brettschichtholz definiert. Die auskleidende Konstruktion besteht ebenfalls aus Brettschichtholz in Kombination mit Gipsfaserplatten und Mineralwolle. Die Geschossdecke wird als Brettstapeldecke mit Mineralwolle als Trittschalldämmung und Zementestrich definiert.

**Tabelle 20: Definierte Varianten in Holz-Skelettbauweise nach Bauteilen und mit relevanten Materialien**

Bauteil	Bauteilkategorie	Holz-Skelettbau mit Brettschichtholz
Außenwand	Tragwerk	Skelettkonstruktion aus Brettschichtholz Holzrahmenkonstruktion mit TJI
Außenwand	Dämmstoff	Mineralwolle in der Holzrahmenkonstruktion
Tragende Innenwände		Skelettkonstruktion aus Brettschichtholz Brettschichtholz, Gipsfaser und Mineralwolle
Leichte Innenwände		Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle
Geschossdecke	Tragwerk	Brettstapeldecke
Geschossdecke	Trittschalldämmung	Mineralwolle
Geschossdecke	Estrich	Zementestrich

Quelle: Neufert (2022), Definition im Rahmen des Projektes

Neben Außenwänden, Innenwänden und Geschossdecken gibt es weitere Bauteile, deren Aufbau sich allerdings nicht zwischen den Bauweisen unterscheidet. Tabelle 21 zeigt den Aufbau der Bodenplatte nach Bauteilkategorien und Materialien.

**Tabelle 21: Bauteilkategorien und Materialien im Aufbau der Bodenplatte**

Bauteilkategorie	Materialien
Schotter	Schotter 16/32
Sauberkeitsschicht	Transportbeton C30/37
Dämmung	Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS)
Dampfbremse	Dampfbremse PE

Bauteilkategorie	Materialien
Tragwerk	Transportbeton C30/37
Bewehrung	Bewehrungsstahl
Dampfsperre	Bitumenbahnen V 60
Estrich	Zementestrich

Quelle: Neufert (2022), Definition im Rahmen des Projektes

In Tabelle 22 sind die Bauteilkategorien und Materialien von Kellerwänden und Kellerdecken dargestellt.

**Tabelle 22: Bauteilkategorien und Materialien im Aufbau des Kellers**

Bauteil	Bauteilkategorie	Materialien
Kellerwand	Putz	Kalkzement Putzmörtel
Kellerwand	Tragwerk	Transportbeton C20/25
Kellerwand	Bewehrung	Bewehrungsstahl
Kellerwand	Dampfsperre	Bitumenbahnen V 60
Kellerwand	Dämmung	Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS)
Kellerdecke	Putz	Kalk-Innenputz
Kellerdecke	Dämmung	Mineralwolle
Kellerdecke	Tragwerk	Transportbeton C30/37
Kellerdecke	Bewehrung	Bewehrungsstahl
Kellerdecke	Dampfbremse	Dampfbremse PE
Kellerdecke	Trittschalldämmung	Mineralwolle
Kellerdecke	Estrich	Zementestrich

Quelle: Neufert (2022), Definition im Rahmen des Projektes

Gebäudeübergreifend sind darüber hinaus noch der Aufbau der Dachkonstruktion festzulegen. Es werden insgesamt zwei unterschiedliche Dachkonstruktion betrachtet, die Konstruktion eines Satteldaches und eines Flachdaches. Tabelle 23 zeigt die Bauteilkategorien und Materialien.

**Tabelle 23: Bauteilkategorien und Materialien im Aufbau der Dachkonstruktionen**

Bauteilkategorie	Satteldach	Flachdach – Beton	Flachdach – Holzbau
Verkleidung	Gipsfaserplatte	Gipsfaserplatte	Gipsfaserplatte
Lattung	Konstruktionsvollholz	Konstruktionsvollholz	Konstruktionsvollholz
Tragwerk	Konstruktionsvollholz	Stahlbeton	Konstruktionsvollholz
Dämmung	Mineralwolle und Holzfaserdämmstoff	Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS)	Zellulosefaser-einblasdämmstoff und

Bauteilkategorie	Satteldach	Flachdach – Beton	Flachdach – Holzbau
Abdeckung	Dampfbremse und Dachziegel	Dichtbahn und Aluminiumblech	Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS) Konstruktionsvollholz, Dichtbahn und Aluminiumblech

Quelle: Neufert (2022), Definition im Rahmen des Projektes

### 3.3.3 Berechnungsannahmen

Zur Berechnung ist neben der Definition der Varianten auch die Festlegung von Annahmen notwendig.

Aufgrund erhöhter Anforderungen an die Statik im Geschosswohnungsbau werden in mittleren und großen Mehrfamilienhäusern sowie in den Nichtwohngebäuden sowohl höhere Bewehrungsanteile im Tragwerk als auch eine höhere Bauteildicke für tragende Bauteile angenommen. Wie in 2.1.3 erläutert, sind in der ÖKOBAUDAT hochverarbeitete Holzprodukte mit einem ähnlichen Primärenergieaufwand wie Stahlbeton verbunden, weshalb Annahmen zum Bewehrungsanteil tragender Bauteile und zur Flächenberechnung der inhomogenen Bauteile getroffen wurden.

Weiterhin sind Annahmen zur Berechnung der transparenten Bauteile zu treffen. In der Berechnung werden Fenster in Fensterglas und Fensterrahmen unterteilt. Die Berechnung der Fensterfläche erfolgt anteilig nach Himmelsrichtung an der Außenwandfläche. Auf der Südseite werden 30 %, auf der Nordseite 12 % und auf der Ost- und Westseite jeweils 18 % Fensterfläche angenommen. Für die Bestandteile der Fenster wird ein Anteil von 64 % für die Verglasung und ein Anteil von 36 % für den Rahmen angenommen. Da Fensterrahmen in der ÖKOBAUDAT in Metern angegeben sind, wird die Fensterfläche mit der Deckenhöhe multipliziert. In der Modellierung wird also angenommen, dass ein Fenster ein Meter breit ist.

Darüber hinaus werden die Innenwände mittels eines Faktors berechnet. Dieser wurde anhand des Grundrisses eines idealisierten Einfamilienhauses (siehe Tabelle 12) mittelt. Der Faktor stellt den Anteil der Fläche der Innenwände im Verhältnis zur Fläche der Außenwände dar und beträgt 0,5.

Darüber hinaus werden für inhomogene Bauteile, wie beispielsweise Holzrahmen oder Installationseben, Faktoren zur Berechnung der Bauteilfläche bzw. des Volumens angenommen. Diese Faktoren sind in Anhang A.5 dargestellt.

## 3.4 Referenzgebäude und Bauweisen im Gebäudebestand

In diesem Abschnitt wird die deutsche Gebäudetypologie in Ausschnitten, unterteilt nach Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden, vorgestellt. Diese dient als Grundlage zur Berechnung von Sanierungsvorhaben und den damit verbundenen Materialien. Die Referenzgebäudetypologie wird auf Basis der Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Diefenbach *et al.* 2010) und deren Aktualisierung für das Jahr 2016 (Cischinsky und Diefenbach 2018) abgebildet.

Die Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden (NWG) basiert auf den Daten und der Typologie aus dem Projekt dataNWG: Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (Hörner *et al.* 2022). Die Referenzgebäude sind in der Invert/ee-lab Datenbank über bauphysikalische Eigenschaften (Geometrien der Bauteile, U-Werte etc.) hinterlegt. Der Datenbestand dient auch als Grundlage für die Szenariomodellierung des Gebäudesektors im Projektionsbericht und ist parallel im

Rahmen der Erstellung des Projektionsberichts 2023 auf das Basisjahr 2018 aktualisiert worden<sup>8</sup>.

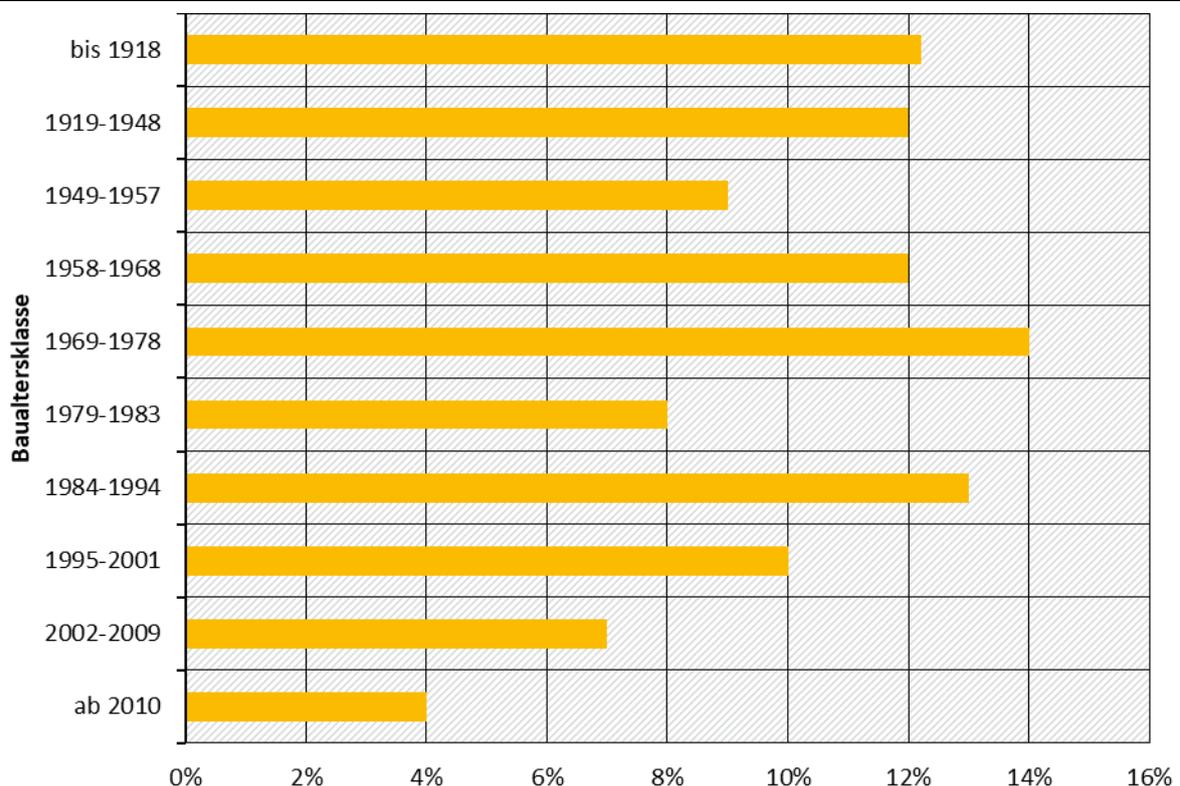
### 3.4.1 Wohn- und Nichtwohngebäudebestand in Deutschland

Vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU) wurde im Jahr 2010 der Wohngebäudebestand in Deutschland hinsichtlich (energetischem) Sanierungszustand abgeschätzt. Im Jahr 2016 wurde diese Auswertung um die Abschätzung von jährlichen Modernisierungsraten bis 2016 ergänzt. Die energetische Qualität und insbesondere die Struktur des Nichtwohngebäudebestands wurde 2022 durch ein weiteres Forschungsprojekt des IWU umfassend erhoben. In Invert/ee-Lab sind diese Gebäudetypologien als Berechnungsgrundlage enthalten.

#### Wohngebäudebestand

In Deutschland gibt es rund 18,8 Mio. Wohngebäude mit insgesamt rund 39,8 Mio. Wohnungen (Stand 2016). Abbildung 7 zeigt die Wohngebäude nach Baualter. Es wird deutlich, dass relativ betrachtet, die meisten Gebäude im Zeitraum 1968 bis 1978 gebaut wurden.

**Abbildung 7: Wohngebäude in Deutschland nach Baualter**

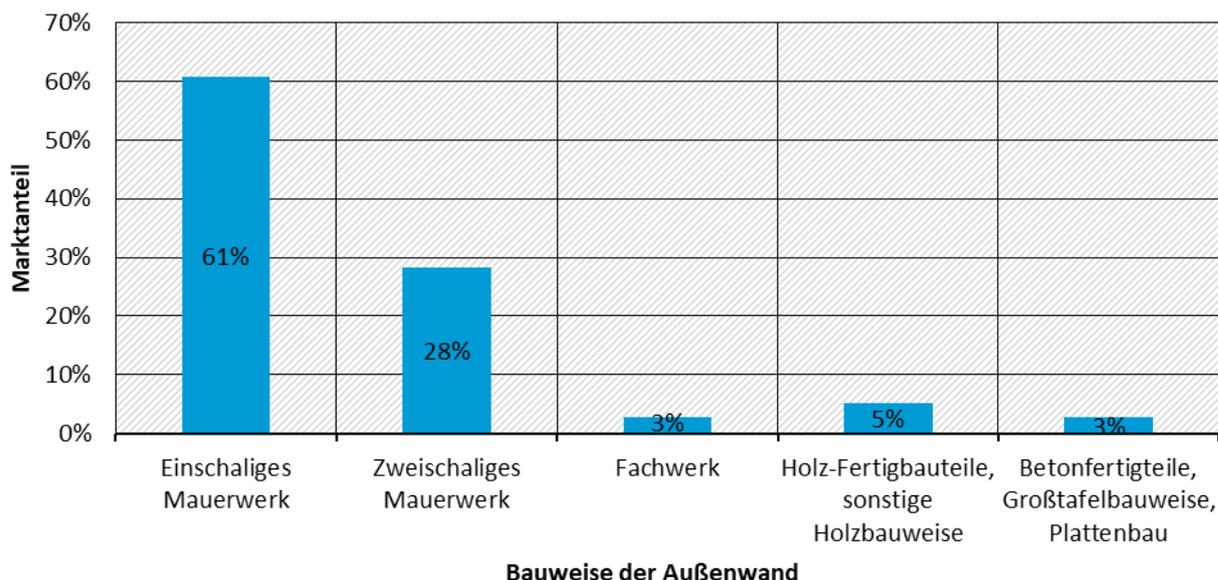


Quelle: Cischinsky und Diefenbach (2018)

Abbildung 8 zeigt darüber hinaus die Außenwandtypen von Wohngebäuden. Mit rund 61 % haben einschalige Außenwände den größten Anteil. Insgesamt sind rund 90 % der Außenwände Mauerwerkswände. Nur etwa 5 % der Außenwände lassen sich dem Holzbau zuordnen. Jeweils rund 3 % der Außenwände sind als Fachwerk und in Betonbauweise gebaut.

<sup>8</sup> Der Abbildung des Gebäudebestandes in Deutschland ist u.a für das Vorhaben Politikszenerarien X im Auftrag des Umweltbundesamtes (Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES) sowie für die von IREES koordinierten Studie „Auf dem Weg zum Klimaneutralen Gebäudebestand“ im Auftrag des BBSR erfolgt. Die Datengrundlage für die Abbildung des Gebäudebestandes ist im Anhang dargestellt.

**Abbildung 8: Außenwandtypen von Wohngebäuden in Deutschland**



Quelle: Cischinsky und Diefenbach (2018)

Die Betrachtung der Außenwandtypen ist entscheidend für die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen bzw. die eingesetzten Materialien. Darüber hinaus ist der aktuelle Sanierungszustand der Gebäude relevant.

Tabelle 24 zeigt die angebrachte Wärmedämmung in Wohngebäuden nach Außenwandtyp. Insgesamt sind rund 42 % aller Wandflächen gedämmt. Am höchsten ist der Anteil bei Wohngebäuden mit Betonfertigteilen, Großtafelbauweise, oder Platten hier sind nahezu 80 % der gesamten Wandfläche gedämmt. Bei Altbauten bis 1978 ist noch eine deutliche Modernisierungslücke festzustellen. Gerade einmal knapp 24 % der Außenwände mit einschaligem Mauerwerk wurden bis 2016 modernisiert.

**Tabelle 24: Wärmedämmung nach Außenwandtyp**

Außenwandtyp	Gedämmte Bauteilfläche von allen Wohngebäuden	Nachträglich gedämmte Bauteilfläche von Altbauten bis 1978
Alle Außenwandtypen	41,7 %	27,8 %
Einschaliges Mauerwerk	29,2 %	23,9 %
Zweischaliges Mauerwerk	58,5 %	34,2 %
Fachwerk	45,7 %	41,4 %
Holz-Fertigbauteile, sonstige Holzbauweise	78,2 %	17,4 %
Betonfertigteile, Großtafelbauweise, Plattenbau	79,4 %	55,2 %

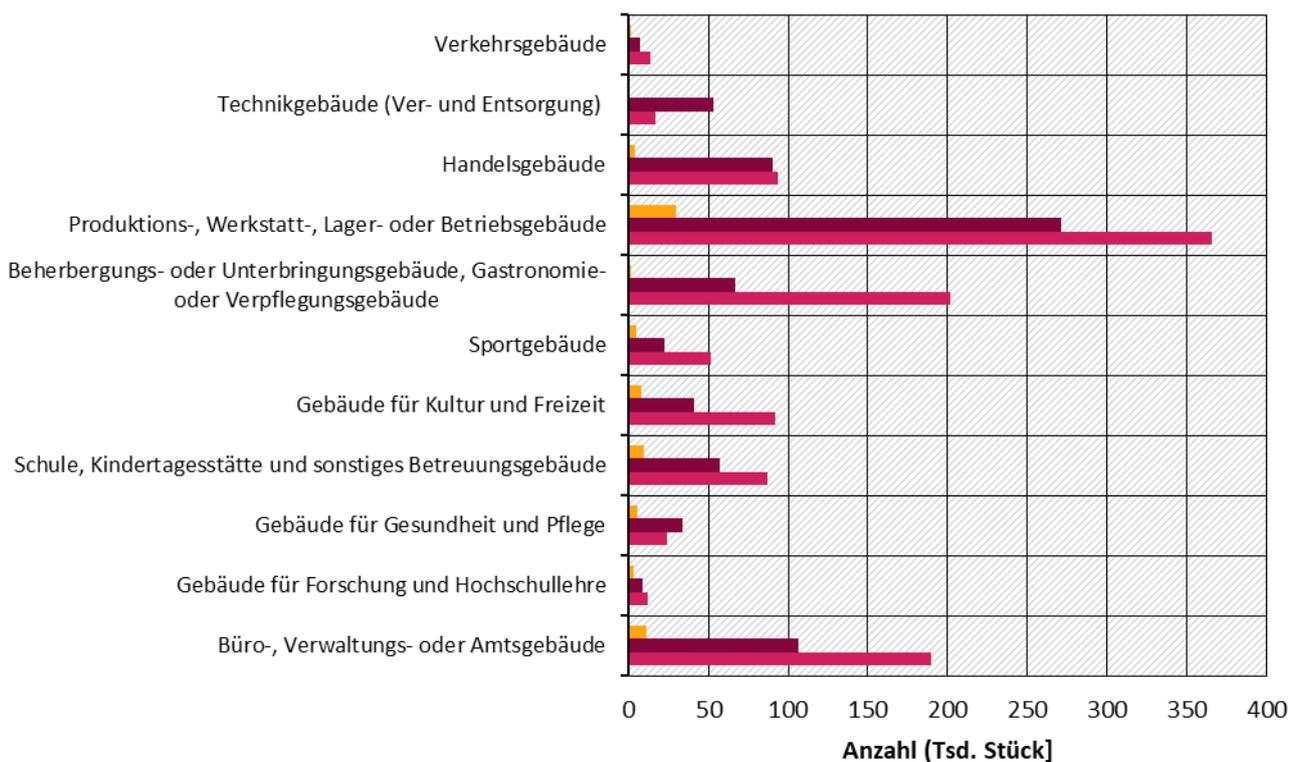
Quelle: Cischinsky und Diefenbach (2018)

### Nichtwohngebäudebestand

In Deutschland gibt es etwa 21 Mio. Nichtwohngebäude, wobei die Mehrzahl nicht thermisch konditionierte NWG (Garagen, Gartenhütten usw.) sind. Rund 2 Mio. NWG sind thermisch konditioniert und somit relevant für das GEG.

Es wird in 11 verschiedene Gebäudetypen unterschieden. Abbildung 9 zeigt die Anzahl der NWG in Deutschland nach Gebäudetypen und Baualter. Die meisten NWG sind mit rund 670.000 in der Kategorie Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude und mit rund 300.000 in der Kategorie Büro, Verwaltungs- oder Amtsgebäude zu finden. Weiterhin sind die meisten Gebäude vor 1978 errichtet. Weiterhin wird in fossile und elektrische Beheizung der Gebäude unterschieden. Knapp 90 % der NWG in Deutschland werden fossil beheizt. Nur etwa 11 % werden elektrisch beheizt.

**Abbildung 9: Anzahl der Nichtwohngebäude nach Gebäudetyp und Baualtersklasse**

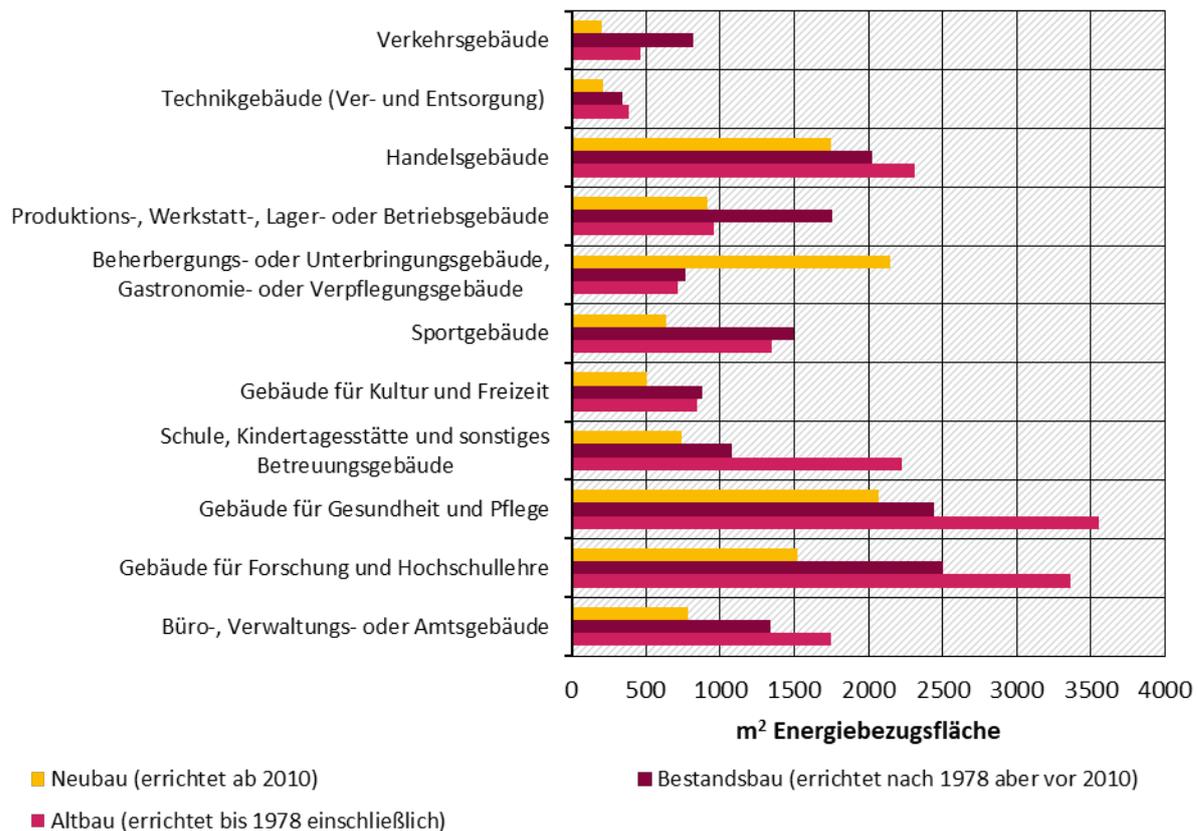


■ Neubau (errichtet ab 2010) ■ Bestandsbau (errichtet nach 1978 aber vor 2010) ■ Altbau (errichtet bis 1978 einschließlich)

Quelle: Bischof (2022)

Abbildung 10 zeigt ergänzend die mittlere Energiebezugsfläche (Nutzfläche) nach Gebäudetyp und Baualtersklasse. Es wird deutlich, dass abweichend von der Anzahl der Gebäude die Gebäude für Gesundheit und Pflege sowie Forschung und Hochschullehre die größte Fläche unter den NWG einnehmen. Analog zur Anzahl an Gebäuden wird die meiste Gebäudefläche von den Altbauten (errichtet bis 1978) beansprucht.

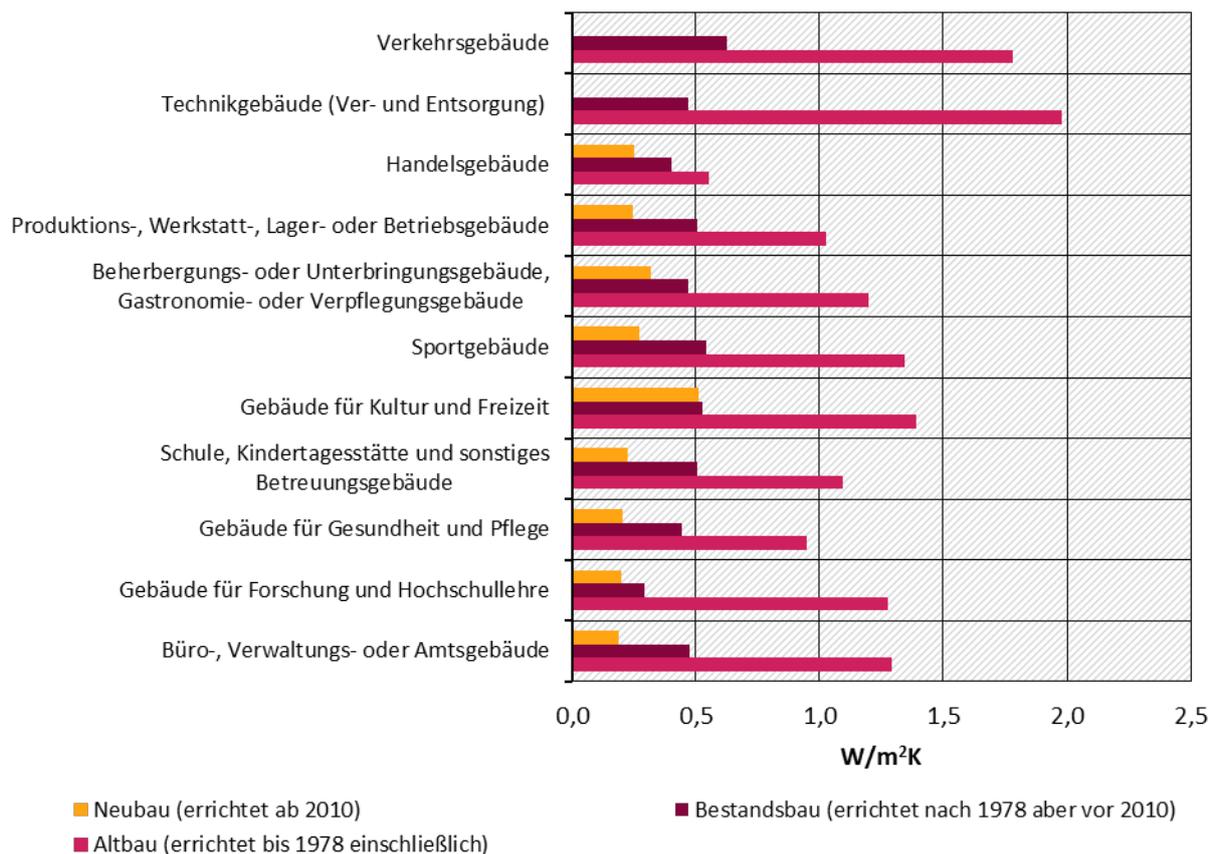
**Abbildung 10: Mittlere Energiebezugsfläche der Nichtwohngebäude nach Gebäudetyp und Baualtersklasse**



Quelle: Bischof (2022)

Abbildung 11 zeigt abschließend die mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der NWG nach Gebäudetyp und Baualtersklasse. Aufgrund der energetischen Qualität der neueren Gebäude sinkt der Wärmedurchgangskoeffizient nach Baualter. Weiterhin wird deutlich, dass Verkehrs- und Technikgebäude in Bestandsgebäuden mit 1,78 bzw. 1,98 W/m<sup>2</sup>K den höchsten mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen. Die Fallzahl im Neubau ist zu gering, um valide Aussagen zu treffen. Handelsgebäude haben dagegen im Altbau mit 0,55 W/m<sup>2</sup>K den geringsten mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten.

**Abbildung 11: Mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient der Nichtwohngebäude nach Gebäudtyp und Baualterklasse**



Quelle: Bischof (2022)

### 3.4.2 Untersuchte Referenzgebäudetypen im Gebäudebestand

Basierend auf den Daten zum Wohngebäude- und Nichtwohngebäudebestand sind in der Gebäudedatenbank von Invert/ee-lab Referenzgebäude zur Beschreibung des Gebäudebestandes hinterlegt. Im Wohngebäudebestand wird dabei zwischen Gebäudetypen, Baualterklassen und Sanierungszustand unterschieden (Tabelle 25). Beim Sanierungszustand wird unterschieden, welches Bauteil bereits nachträglich saniert wurde, wobei unterschieden wird, ob einzelne Bauteile bereits nachträglich saniert wurden oder eine Kombination aus mehreren Bauteilen. Ein Referenzgebäude repräsentiert somit einen bestimmten Gebäudtyp einer bestimmten Baualterklasse mit einem spezifischen Sanierungszustand.

**Tabelle 25: Unterscheidung der Referenzgebäude im Wohngebäudebereich**

Gebäudtyp	Baualterklasse		Nachträglich bereits sanierte Bauteile
Ein- und Zweifamilienhaus	bis	1918	Keine Nachträgliche Sanierung
Reihenhaus	1919	1948	Fenster
Kleines Mehrfamilienhaus	1949	1957	Dach / oberer Gebäudeabschluss

Gebäudetyp	Baualtersklasse		Nachträglich bereits sanierte Bauteile
	1958	1968	
Mittleres Mehrfamilienhaus	1958	1968	Außenwand
Großes Mehrfamilienhaus	1969	1978	Kellerdecke / unterer Gebäudeabschluss
-	1979	1983	Kombinationen aus mehreren Bauteilen
-	1984	1994	-
-	1995	2001	-
-	2002	2004	-
-	2005	2005	-
-	2006	2006	-
-	2007	2007	-
-	2008	2008	-
-	2009	2015	-
-	Ab	2016	-

Quelle: Cischinsky und Diefenbach (2018)

Im Nichtwohngebäudebereich ist die Datengrundlage mit Bezug auf nachträglich durchgeführte Sanierungsmaßnahmen nicht vorhanden, so dass nur unterschiedliche Gebäudetypen nach Baualtersklasse und dem energetischen Zustand im Erbauungsjahr unterschieden werden. Folgende Referenzgebäude werden betrachtet.

**Tabelle 26: Endenergiebedarf der Nichtwohngebäude nach Baualtersklassen [in kWh/m<sup>2</sup> Nutzfläche]**

Gebäudetyp	bis 1978	1978 - 2010	ab 2010
Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude	135	81	33
Gebäude für Forschung und Hochschullehre	409	341	80
Gebäude für Gesundheit und Pflege	179	147	102
Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude	241	202	161
Gebäude für Kultur und Freizeit	222	150	36
Sportgebäude	288	109	49
Beherbergungs- oder Unterbringungsgebäude, Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude	242	124	54
Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude	68	29	12
Handelsgebäude	129	97	68

Gebäudetyp	bis 1978	1978 - 2010	ab 2010
Technikgebäude (Ver- und Entsorgung)	362	192	0
Verkehrsgebäude	648	413	342

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Bischof (2022)

### 3.4.3 Betrachtete Bauweisen für die energetischen Sanierung

Für Sanierung von Bestandsgebäuden werden verschiedene Varianten für verschiedene Bauteile definiert. Invert/ee-Lab bildet die Sanierung von Außenwand, Steildach und Flachdach, Geschossdecke und Perimeter ab. Abbildung 12 zeigt verschiedene Varianten der energetischen Sanierung nach Bauteilen. Bei Außenwänden wird in Wärmedämmverbundsystem und Vorhangfassade unterteilt. Der detaillierte Aufbau ist in Anhang A.6 dargestellt.

Abbildung 12: Übersicht über die Varianten der energetischen Sanierung nach Bauteilen

Außenwand	WDVS	Mineralwolle	Holzfaserdämmplatten	Expandiertem Polystyrol (EPS)
	Vorhangfassade	Konstruktion aus Doppel-T-Trägern mit Baustroh		Konstruktion aus Brettschichtholz mit Baustroh
		Konstruktion aus Brettschichtholz mit Holzfaser-Einblasdämmstoff		Konstruktion aus Brettschichtholz mit Zellulosefasern
Komplettsanierung des Steildachs (inkl. Dachziegel)	Extrudiertes Polystyrol (XPS)	Holzfaserdämmplatten	Expandiertes Polystyrol (EPS)	
	Polyisocyanurat-Hartschaum (PIR)	Holzfaser-Einblasdämmstoff	Mineralwolle	
Komplettsanierung Flachdach	Schaumglas	Holzfaserdämmplatten	Extrudiertes Polystyrol (XPS)	
	Polyisocyanurat-Hartschaum (PIR)	Mineralwolle		
Geschossdecke	Holzfaser-Einblasdämmstoff	Mineralwolle	Flachs	
	Extrudiertes Polystyrol (XPS)	Hanf	Zellulose-Einblasdämmstoff	
Bodenplatte bzw. Keller	Extrudierter Polystyrol Dämmstoff		Schaumglas	

Quelle: Eigene Darstellung IREES

## 4 Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen im Neubau von Gebäuden

In diesem Kapitel erfolgt eine Darstellung des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen nach verschiedenen Energiestandards, Bauweisen und Gebäudetypen und für die Gebäudetechnik im Neubau.

Aufgrund der gewählten Bezugsgröße (siehe Kapitel 2.3) entsprechen der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen stets einem spezifischen Wert. Der Energieaufwand wird in kWh/(m<sup>2</sup>·a), die THG-Emissionen in kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a) angegeben. Der kumulierte Energieaufwand entspricht dabei jeweils der energetischen Primärenergie, sowohl erneuerbar (PERE) als auch nicht-erneuerbar (PENRE), die zur Bearbeitung der Baustoffe, technischen Komponenten und Gebäude eingesetzt wird. Die Primärenergie zur stofflichen Nutzung wird nicht dargestellt, da diese nur vorübergehend im Baustoff gespeichert wird: In der Herstellung der Baustoffe wird die Primärenergie gespeichert, bei Verbrennung am Lebensende wird die Primärenergie wieder freigesetzt. Aus diesem Grund werden die fossilen und biogenen THG-Emissionen separat dargestellt. In Bezug auf die Wärmeversorgung der Gebäude wird standardmäßig die Luft-Wasser-Wärmepumpe gewählt, da diese der Wärmepumpe mit dem größten Marktanteil entspricht (PI 2023). Die Besonderheiten beim Passivhaus sind in Kapitel 3.1 beschrieben. Die Unterschiede bei der technischen Gebäudeausrüstung in Bezug auf den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen sind in Kapitel 4.4 dargestellt.

Als Sensitivität wird zum einen dargestellt, welchen Einfluss die angenommenen Bauteilnutzungsdauern (siehe Kapitel 2.3) auf den kumulierten Energiebedarf und die THG-Emissionen haben. Zudem anderen wird berechnet, welcher spezifische Energieaufwand und welche spezifischen Treibhauspotenziale sich ergeben, wenn die Personenzahl als Bezugsgröße und nicht die Fläche und Nutzungsjahre verwendet werden.

### 4.1 Einfluss der Energiestandards auf den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen

Abbildung 13 zeigt den kumulierten Energieaufwand und die fossilen THG-Emissionen eines Einfamilienhauses nach verschiedenen Energiestandards<sup>9</sup>. Das Gebäude ist ein Massivbau aus Kalksandstein mit WDVS und Geschossdecken aus Stahlbeton. Der detaillierte Aufbau des Gebäudes ist unterhalb der Abbildung beschrieben.

Die Abbildung zeigt deutlich, dass der kumulierte Energieaufwand und die fossilen THG-Emissionen mit zunehmender Energieeffizienz des Gebäudes sinken. Dabei ist vor allem der Energieaufwand in der Nutzungsphase (B6) entscheidend. Das Modul umfasst den Energieaufwand für Raumwärme und Lüftung. In der Herstellungsphase (A1-A3) sind nur kleine Unterschiede zwischen den Energiestandards zu beobachten. Der kumulierte Energieaufwand in der Abfallbehandlung (C3) und das Recyclingpotenzial (D) steigen mit zunehmender Dämmdicke. Dabei ist zu beachten, dass für alle Materialien eine thermische Verwertung in Modul C angenommen wird.

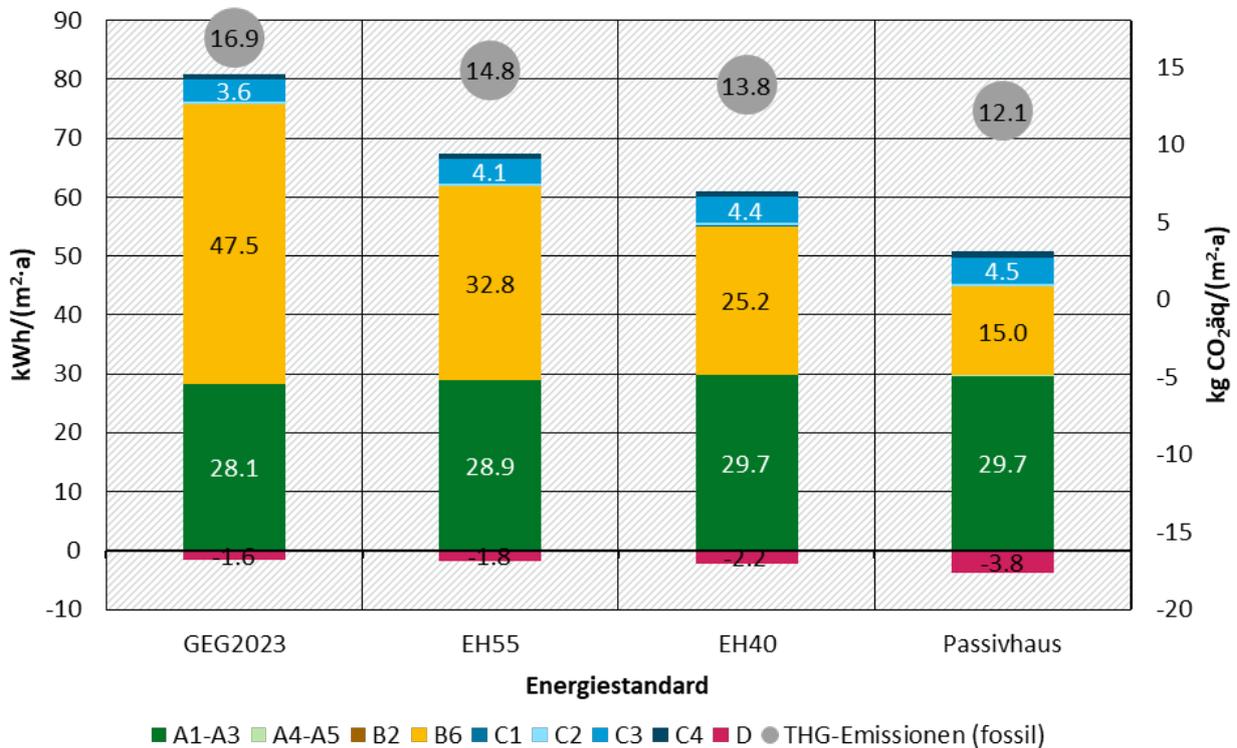
Für einen Neubau nach Gebäudeenergiegesetz resultieren über den Lebenszyklus etwa 80 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Davon entfallen auf die Herstellung der Bauprodukte und technischen

<sup>9</sup> Der kumulierte Energieaufwand ist nach den Modulen des Lebenszyklus unterteilt, die THG-Emissionen sind als Summe über die Module A1 bis C4 angegeben. Die Klimawirkungen in Modul D sind eine ergänzende Information, die nach DIN EN 15978 (2012-10) nicht mit den Modulen A1 bis C4 verrechnet werden dürfen.

Gebäudeausrüstung etwa 28 kWh/(m<sup>2</sup>·a), in der Nutzungsphase<sup>10</sup> resultieren dagegen rund 48 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Der Energieaufwand in den übrigen Modulen ist im Vergleich deutlich geringer.

In einem Einfamilienhaus, errichtet nach Effizienzhaus-Stufe 55, kann der kumulierte Energieaufwand im Vergleich zum GEG-Standard bereits reduziert werden. Über den Lebenszyklus resultieren etwa 67 kWh/(m<sup>2</sup>·a), davon rund 29 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Herstellungsphase und rund 33 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Nutzungsphase. Das gleiche Gebäude, errichtet nach Effizienzhaus-Stufe 40, hat einen kumulierten Energieaufwand von rund 61 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Auf die Herstellungsphase entfallen rund 30 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und auf die Nutzungsphase rund 25 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Im Passivhausstandard ist der kumulierte Energieaufwand in der Nutzungsphase noch niedriger als bei den Einfamilienhäusern mit Effizienzhaus-Stufen 40 und 55, da der Energieaufwand für die Wärmeversorgung geringer ausfällt. In Passivhäusern ist aufgrund der hohen Effizienz nur ein luftgeführtes System und damit keine Fußbodenheizung notwendig. In der Herstellungsphase resultieren rund 30 kWh/(m<sup>2</sup>·a), in der Nutzungsphase 15 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Die fossilen THG-Emissionen summieren sich für den GEG-Neubau über den gesamten Lebenszyklus auf rund 17 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a), für die Effizienzhaus-Stufe 55 auf rund 15 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a) und für die Effizienzhaus-Stufe 40 auf rund 14 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a). Im Passivhaus-Standard resultieren rund 12 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a).

**Abbildung 13: Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [Einfamilienhaus]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

Bauweise: Massivbau mit Kalksandstein und Wärmedämmverbundsystem

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

<sup>10</sup> Bei Verwendung der Wohnfläche als Bezugsgröße (siehe Kapitel 2.3). Würde die Nutzfläche nach GEG herangezogen werden, würde sich der Wert entsprechend reduzieren.

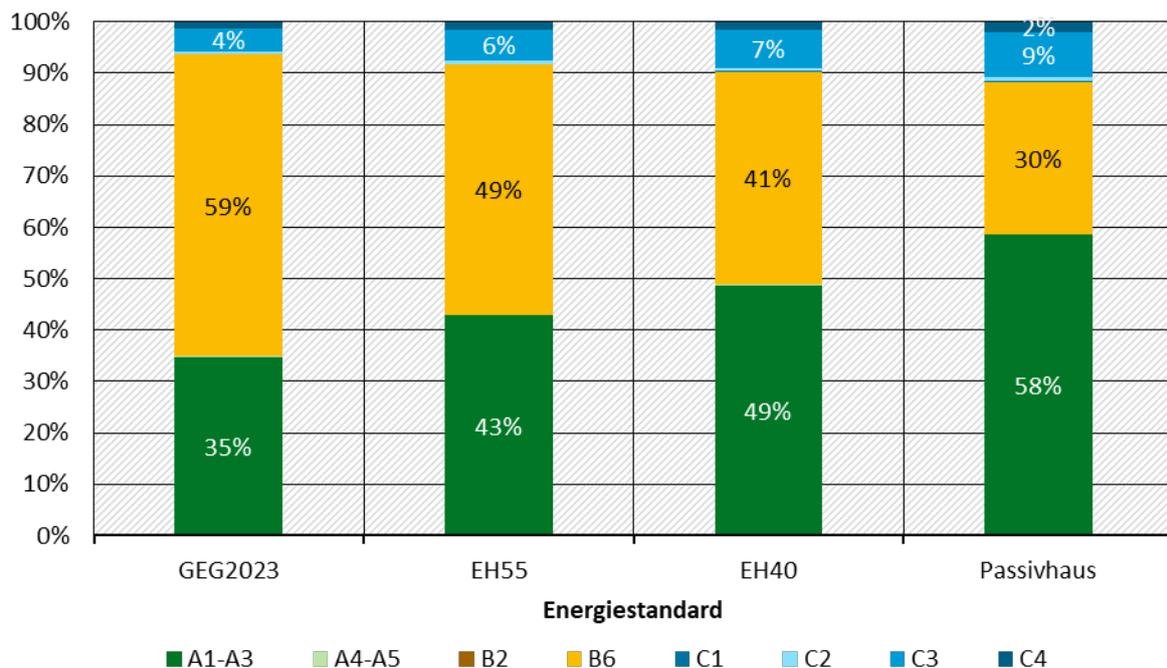
**Einfamilienhaus in Massivbauweise mit WDVS ohne Keller und mit Satteldach (ausführliche Beschreibung siehe Abschnitt 3.3.2)**

**Außenwand** aus Kalksandstein und WDVS mit EPS, **tragende Innenwände** aus Kalksandstein und **leichte Innenwände** aus einer Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle, **Geschossdecken** aus Stahlbeton mit Mineralwolle als Trittschalldämmung und Gussasphaltestrich, **Satteldach** aus Konstruktionsvollholz und mit Vollsparrendämmung aus Mineralwolle und Holzfaserdämmstoff sowie Abdeckung mit Dachziegeln, **Bodenplatte** mit Tragwerk aus Transportbeton C30/37 und Bewehrungsstahl sowie Dämmung mit XPS und Zementestrich

Abbildung 14 zeigt ergänzend zu Abbildung 13 die Anteile der Lebenswegmodule am gesamten kumulierten Energieaufwand. In der Variante GEG2023 entfallen rund 35 % auf die Herstellung der Bauprodukte und technischen Gebäudeausrüstung. Die Nutzungsphase trägt zu 59 % zum kumulierten Energieaufwand bei. In der Variante Effizienzhaus-Stufe 55 hat die Herstellungsphase einen Anteil von 43 % am kumulierten Energieaufwand und die Nutzungsphase 46 %. Unter den getroffenen Annahmen und Systemgrenzen wird bei Effizienzhaus-Stufe 40 das Verhältnis zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase umgedreht. Die Herstellungsphase hat einen Anteil von 49 % am kumulierten Energieaufwand, die Nutzungsphase dagegen 41 %. In den Einfamilienhäusern, errichtet nach Passivhaus-Standard reduziert sich der Anteil der Nutzungsphase nochmals deutlich. 58 % des Energieaufwands wird in der Herstellungsphase verursacht, in der Nutzungsphase nur 30 %.

Wie bereits in Abbildung 13 festgestellt, steigt der Anteil des Energieaufwands in Modul C3 bei steigender Dämmdicke. Ebenso verhält es sich mit Modul C4.

**Abbildung 14: Anteile des kumulierten Energieaufwands nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [Einfamilienhaus]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

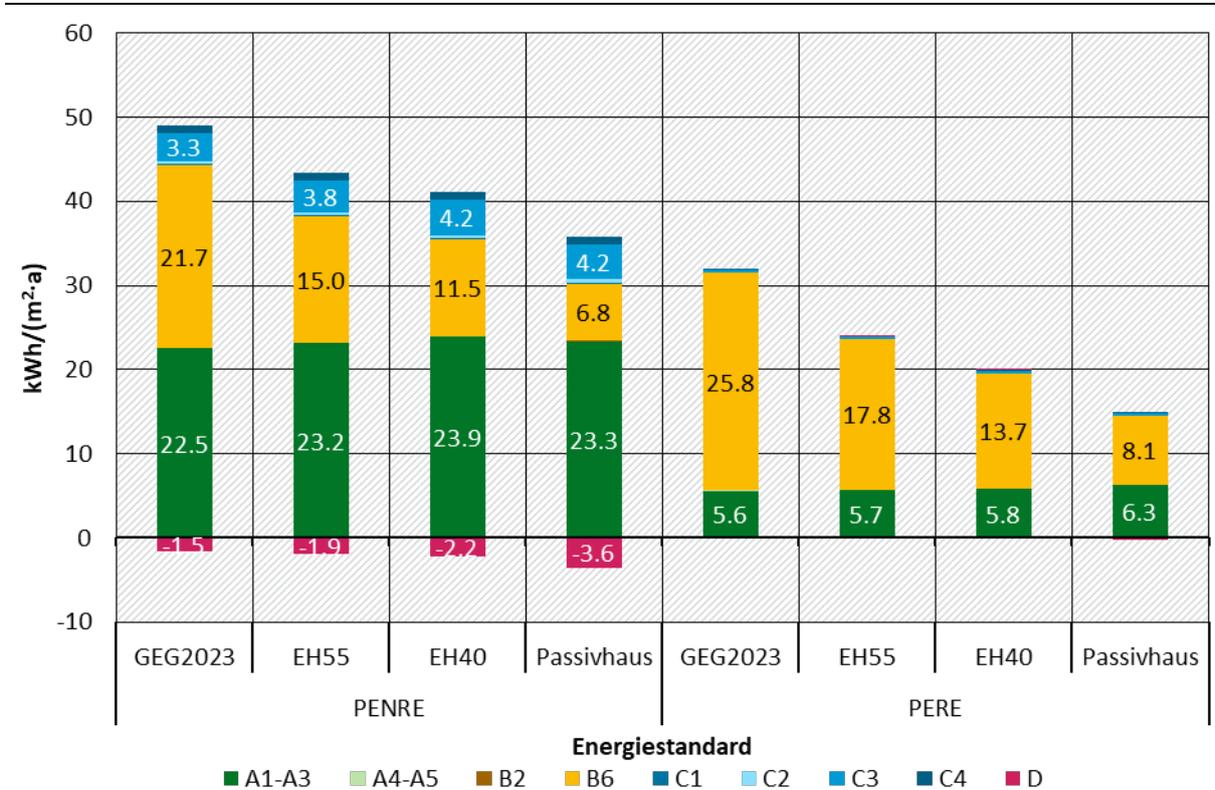
Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

Bauweise: Massivbau mit Kalksandstein und Wärmedämmverbundsystem

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Abbildung 15 zeigt ergänzend den kumulierten Energieaufwand, unterschieden nach erneuerbarem und nicht erneuerbarem Energieaufwand. Es wird deutlich, dass der Energieaufwand in der Herstellungsphase überwiegend nicht erneuerbar ist und in der Nutzungsphase überwiegend erneuerbar. Dies ist auf den unterstellten Strom-Mix im Jahre 2030 zurückzuführen (siehe Abschnitt 2.2.2). Der Energieaufwand für Abriss und Entsorgung ist ebenfalls überwiegend nicht erneuerbar.

**Abbildung 15: Anteile des kumulierten Energieaufwands (unterschieden nach erneuerbar und nicht erneuerbar) nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [Einfamilienhaus]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

Bauweise: Massivbau mit Kalksandstein und Wärmedämmverbundsystem

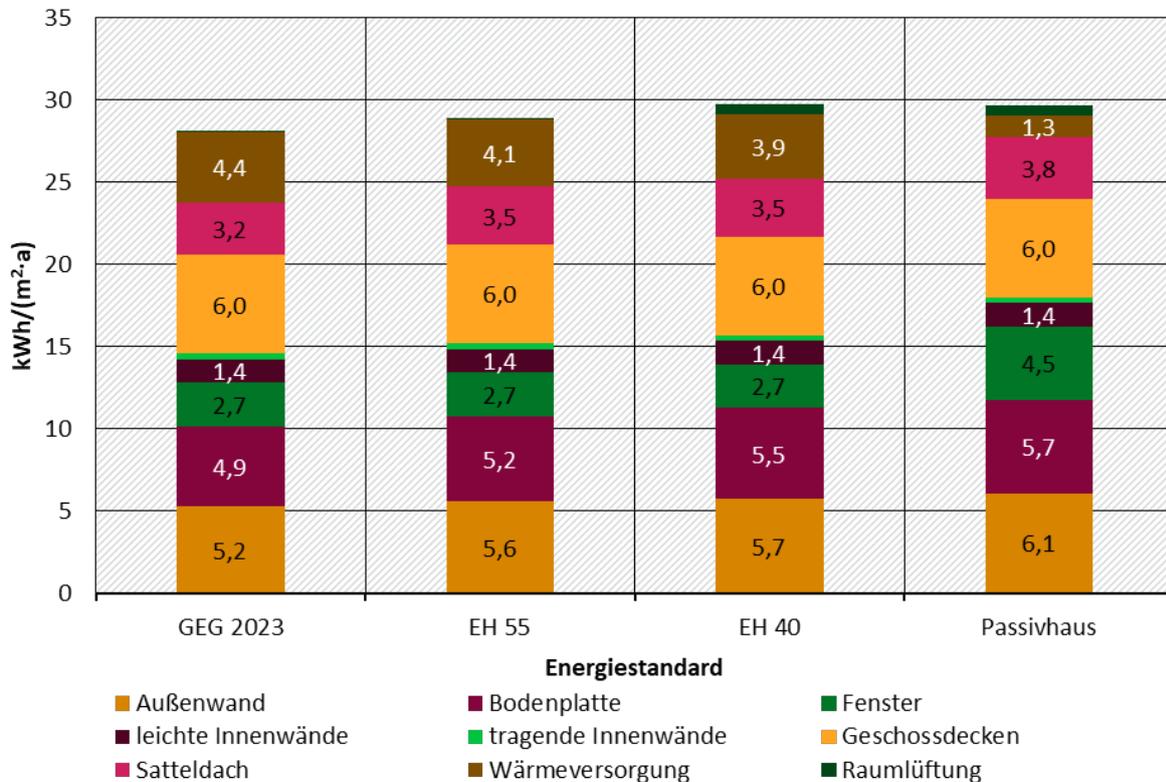
Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Weiterhin zeigt Abbildung 16 den kumulierten Energieaufwand nach Bauteilen für das bereits in Abbildung 13 dargestellte Gebäude. Dargestellt ist nur die Herstellungsphase (A1-A3). Wie bereits in Abbildung 13 ersichtlich, resultiert für das Passivhaus der höchste kumulierte Energieaufwand und für den GEG-Standard der niedrigste. Energieintensivstes Bauteil sind mit  $6 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  die Geschosdecken aus Stahlbeton, die unabhängig von der Hüllfläche und damit vom Energiestandard sind. Mit zunehmender Energieeffizienz steigt die Dämmdicke in der Außenwand, im Dach und in der Bodenplatte, wodurch sich der kumulierte Energieaufwand in diesen Bauteilen erhöht. Im Vergleich von GEG und Passivhaus-Standard ergibt sich bei Außenwänden eine Differenz von  $0,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , bei der Bodenplatte und beim Dach von  $0,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . Die Unterschiede bei Wärmeversorgung und Raumlüftung für die verschiedenen Energiestandards sind gering. Erst beim Passivhausstandard wird durch Verzicht auf ein klassisches Verteilsystem der kumulierte Energieaufwand auf  $1,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  reduziert. Dafür steigt der kumulierte Energieaufwand für die Raumlüftung für EH 40 und Passivhaus aufgrund

des zentralen Lüftungssystems. Im Passivhaus-Standard werden zudem Fenster mit höheren energetischen Anforderungen verwendet, was zu einem höheren Energieaufwand führt. Würden die gleichen Kunststoff-Fensterrahmen wie in den anderen Effizienzstandards angenommen, würde sich der Energieaufwand im Passivhaus-Standard um 1,8 kWh/(m<sup>2</sup>·a) reduzieren.

Es ist zu beachten, dass für die Energiestandards GEG2023, EH 55 und EH 40 die gleichen Fenster zugrunde gelegt werden. Es werden in allen drei Varianten Fenster mit Dreifachverglasung eingebaut.

**Abbildung 16: Kumulierter Energieaufwand nach Bauteilen und Effizienzstandards in der Herstellungsphase [Einfamilienhaus]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

Bauweise: Massivbau mit Kalksandstein und Wärmedämmverbundsystem

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

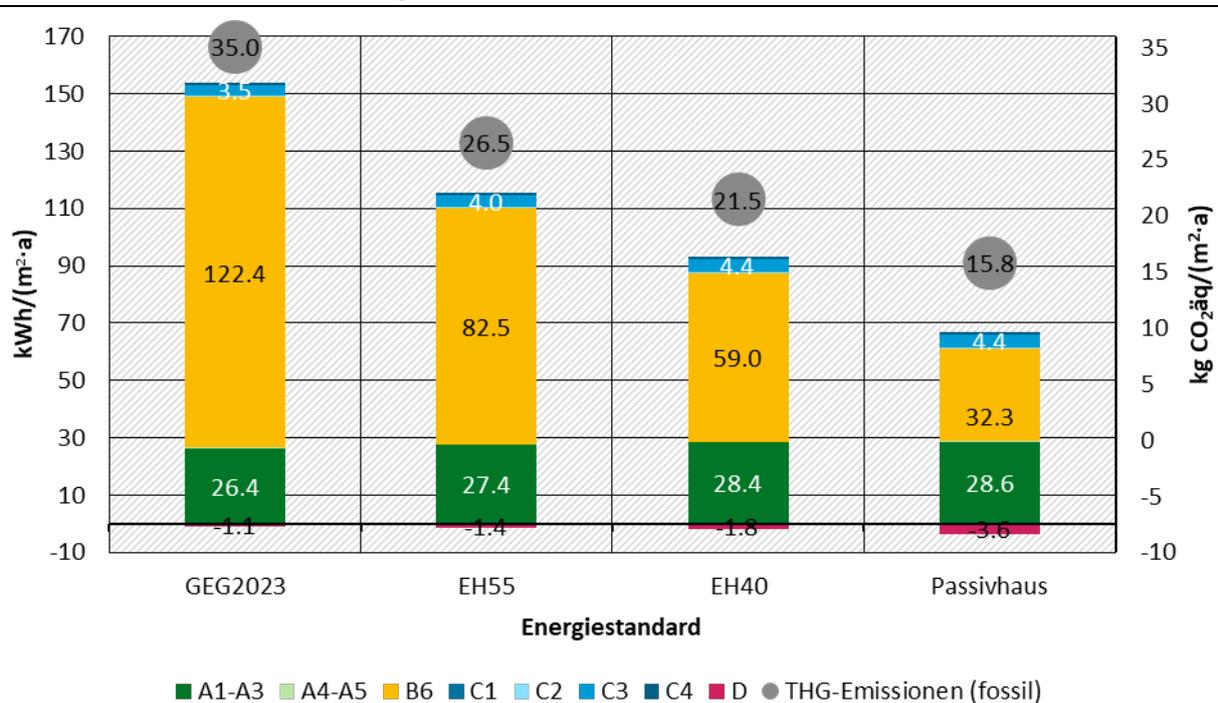
Die in Abbildung 13 bis Abbildung 16 dargestellten Varianten eines Einfamilienhauses sind jeweils mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ausgestattet. Nach GEG2023 ist die ausschließliche Nutzung eines Gas-Brennwertkessel ausgeschlossen. Nichtsdestotrotz zeigt Abbildung 17 den kumulierten Energieaufwand und die fossilen THG-Emissionen für den Vergleich mit einer Wärmepumpe.

In allen Energiestandards ist der Energieaufwand in der Herstellungsphase geringer als in den Varianten mit Luft-Wasser-Wärmepumpe. Allerdings ist der Energieaufwand in der Nutzungsphase deutlich höher, was auf die schlechtere Effizienz von Gas-Brennwertkesseln zurückzuführen ist. Aufgrund der genutzten Umweltwärme sind Wärmepumpen deutlich effizienter als Gas-Brennwertkessel. Während die Wärmepumpe den eingesetzten Strom in Kombination mit Umweltwärme zu nutzbarer Wärme umwandelt, wird in Gas-Brennwertkesseln maximal 98% der im Erdgas enthaltenen Energie in Wärme umgesetzt. (Meyer *et al.* 2024)

In der Variante GEG2023 resultieren über den Lebenszyklus etwa 150 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Davon entfallen auf die Herstellung der Bauprodukte und technischen Gebäudeausrüstung etwa 26 kWh/(m<sup>2</sup>·a), in der Nutzungsphase resultieren dagegen rund 122 kWh/(m<sup>2</sup>·a). In der Variante mit Effizienzhaus-Stufe 55 resultieren etwa 110 kWh/(m<sup>2</sup>·a), davon rund 27 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Herstellungsphase und rund 83 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Nutzungsphase. Das gleiche Gebäude, errichtet nach Effizienzhaus-Stufe 40, hat einen kumulierten Energieaufwand von rund 90 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Auf die Herstellungsphase entfallen rund 28 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und auf die Nutzungsphase rund 60 kWh/(m<sup>2</sup>·a). In der Variante Passivhaus resultieren rund 70 kWh/(m<sup>2</sup>·a), davon rund 29 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Herstellungsphase und rund 32 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Nutzungsphase.

Die fossilen THG-Emissionen summieren sich für den GEG-Neubau über den gesamten Lebenszyklus auf 35 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a), für die Effizienzhaus-Stufe 55 auf rund 27 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a) und für die Effizienzhaus-Stufe 40 auf rund 22 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a). Im Passivhaus-Standard resultieren rund 16 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a).

**Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [Einfamilienhaus, Gas-Brennwertkessel]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

Bauweise: Massivbau mit Kalksandstein und Wärmedämmverbundsystem

Wärmeversorgung: Gas-Brennwertkessel

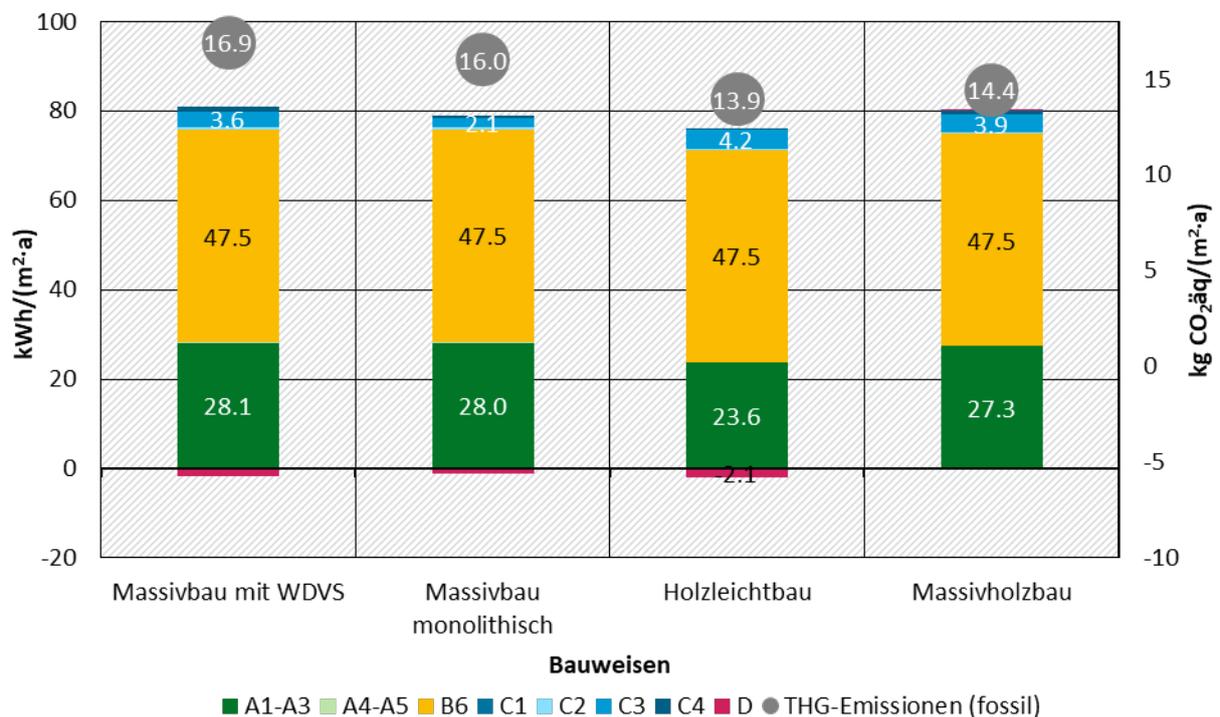
## 4.2 Einfluss der Bauweisen auf den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen

Abbildung 18 zeigt den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen für ein Einfamilienhaus in verschiedenen Bauweisen, errichtet nach den Anforderungen des GEG2023<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Der kumulierte Energieaufwand ist nach den Modulen des Lebenszyklus unterteilt, die THG-Emissionen sind als Summe über die Module A1 bis C4 angegeben

Dargestellt sind die Massivbauweise mit WDVS, die monolithische Massivbauweise, die Holzleichtbauweise und die Massivholzbauweise. Der detaillierte Aufbau der Gebäude ist unterhalb der Abbildung beschrieben.

**Abbildung 18: Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Bauweisen [Einfamilienhaus]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Energieeffizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

In der Abbildung wird ersichtlich, dass Unterschiede im kumulierten Energieaufwand zwischen den verschiedenen Bauweisen bestehen, die auf die Herstellungsphase zurückzuführen sind. Der Energieaufwand in der Nutzungsphase unterscheidet sich nicht da, da alle Varianten dem gleichen Energieeffizienzstandard unterliegen. Der Massivbau mit WDVS hat mit rund 28 kWh/(m²·a) den höchsten Energieaufwand für die Phasen A1-A3, der Holzleichtbau ist mit rund 24 kWh/(m²·a) die Bauweise mit dem niedrigsten Energieaufwand. In der Massivbauweise mit WDVS hat die Nutzungsphase damit einen Anteil von rund 59 % am kumulierten Energieaufwand, in der Holzleichtbauweise einen Anteil von 60 %. Im Vergleich der Herstellungsphase erreicht der Holzleichtbau einen etwa 17 % niedrigeren Energieaufwand als die Massivbauweise mit WDVS.

Bei Betrachtung der fossilen THG-Emissionen sind die Unterschiede zwischen den Bauweisen deutlicher, da diese nur den fossilen kumulierten Energieaufwand berücksichtigen. Die dargestellte Variante in Holzleichtbauweise hat fossile THG-Emissionen von rund 14 kg CO₂äq/(m²·a), die Massivbauweise mit WDVS von rund 17 kg CO₂äq/(m²·a). Der Energieaufwand in der Herstellungsphase der monolithischen Massivbauweise summiert sich auf rund 28 kWh/(m²·a). Es resultieren rund 15 kg CO₂äq/(m²·a) über den gesamten Lebenszyklus. Der Massivholzbau erreicht in der Herstellung einen Energieaufwand von rund 27 kWh/(m²·a) und liegt damit unten der Massivbauweise, aber über dem Holzleichtbau. Es resultieren rund 13 kg CO₂äq/(m²·a) über den Lebenszyklus. In der monolithischen Massivbauweise hat die

Nutzungsphase einen Anteil von rund 56 % am kumulierten Energieaufwand, in der Holzmassivbauweise einen Anteil von 55 %.

**Einfamilienhaus in monolithischer Massivbauweise ohne Keller und mit Satteldach (ausführliche Beschreibung siehe Abschnitt 3.3.2)**

**Außenwand** aus porosiertem Ziegel 0.09 (mit Dämmstoff gefüllt) mit Wärmedämmputz, **tragende Innenwände** aus Ziegeln und **leichte Innenwände** aus einer Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle, **Geschossdecken** aus Stahlbeton mit Mineralwolle als Trittschalldämmung und Zementestrich, **Satteldach** aus Konstruktionsvollholz und mit Vollsparrendämmung aus Mineralwolle und Holzfaserdämmstoff sowie Abdeckung mit Dachziegeln, **Bodenplatte** mit Tragwerk aus Transportbeton C30/37 und Bewehrungsstahl, Dämmung mit XPS, Zementestrich

**Einfamilienhaus in Holzleichtbauweise ohne Keller und mit Satteldach**

**Außenwand** mit Holzrahmenkonstruktion aus Brettschichtholz und Mineralwolle in der Konstruktion, **tragende Innenwände** als Holzbauwände mit Mineralwolle und **leichte Innenwände** aus einer Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle, **Geschossdecken** als Sichtbalkendecke mit Brettstapelholz und Furnierschichtholz und mit Mineralwolle als Trittschalldämmung sowie Fertigteilstrich aus Holzspanplatten, **Satteldach** aus Konstruktionsvollholz und mit Vollsparrendämmung aus Mineralwolle und Holzfaserdämmstoff sowie Abdeckung mit Dachziegeln, **Bodenplatte** als Tragwerk aus Transportbeton C30/37 und Bewehrungsstahl sowie Dämmung mit XPS und Zementestrich

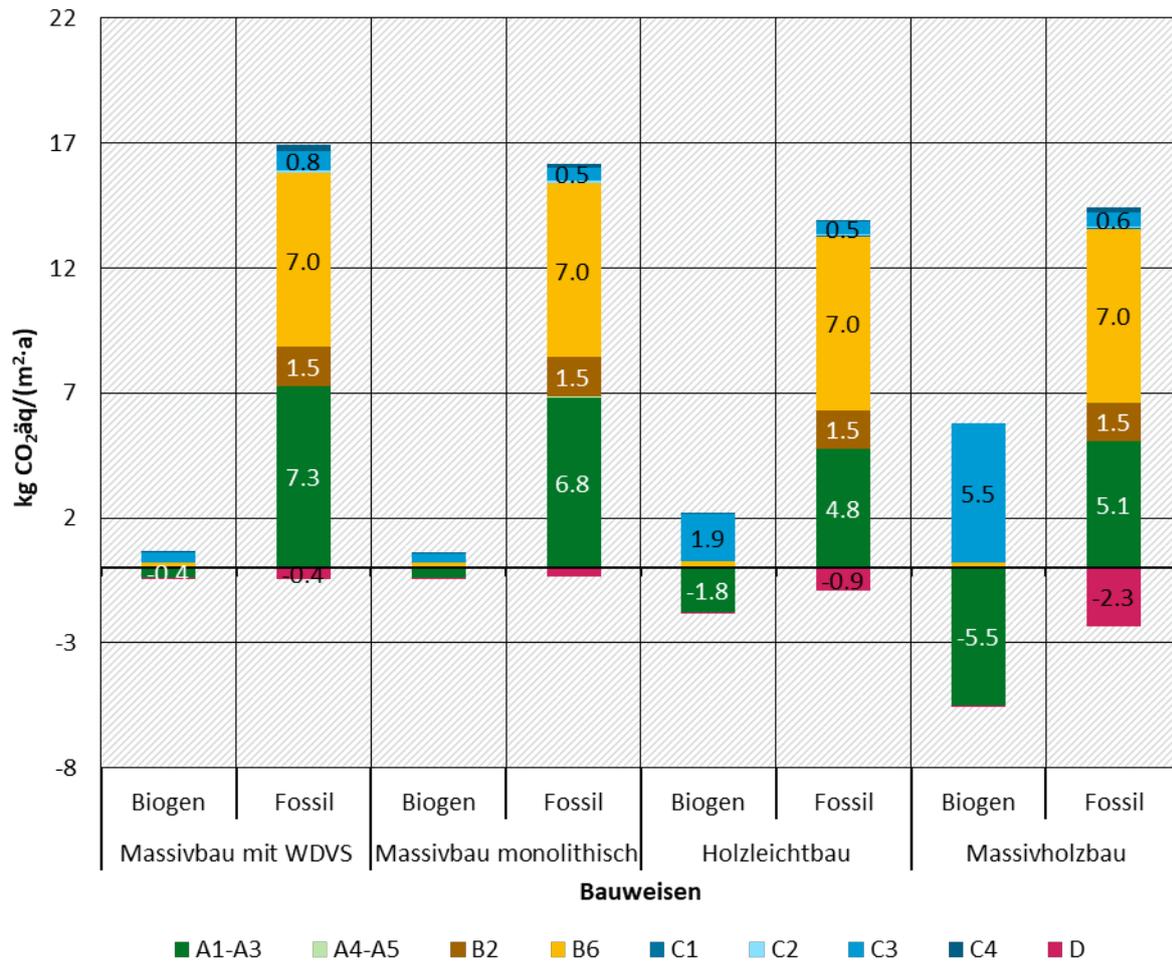
**Einfamilienhaus in Massivholzbauweise ohne Keller und mit Satteldach**

**Außenwand** aus Brettspertholz mit Vorsatzschale aus Doppel-T-Trägern (ausgeblasen mit Zellulose), **tragende Innenwände** aus Massivholz und **leichte Innenwände** in Holzleichtbauweise, **Geschossdecken** als Holzmassivdecke mit Brettstapelholz sowie mit Mineralwolle als Trittschalldämmung und Fertigteilstrich aus Holzspanplatten, **Satteldach** aus Konstruktionsvollholz und mit Vollsparrendämmung aus Mineralwolle und Holzfaserdämmstoff sowie Abdeckung mit Dachziegeln, **Bodenplatte** aus Transportbeton C30/37 und Bewehrungsstahl sowie Dämmung mit XPS und Zementestrich

Ergänzend zu Abbildung 18 zeigt Abbildung 19 die fossilen und biogenen THG-Emissionen der Bauweisen in den unterschiedlichen Lebenswegmodulen. In Holz und anderen pflanzenbasierten Materialien werden CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgenommen und bis zur Freisetzung im Baustoff gespeichert. Insbesondere im Holzbau resultieren deshalb negative THG-Emissionen in der Herstellungsphase (Module A1-A3), die allerdings in Modul C3 wieder ausgeglichen werden.

Daneben resultieren biogene THG-Emissionen durch die Verwendung von Biomasse in der Stromerzeugung (Modul B6). Fossile THG-Emissionen umfassen die Herstellung der Baustoffe und technischer Gebäudeausrüstung, den eingesetzten Strom im Gebäudebetrieb sowie die Instandhaltung der Wärmepumpen (Kältemittel). Aufgrund des hohen Einsatzes von Vollholz im Massivholzbau resultieren mit 5,5 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a) die höchsten negativen THG-Emissionen im Massivholzbau. Im Holzleichtbau werden 1,8 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a) eingelagert.

**Abbildung 19: Treibhausgasemissionen (biogen und fossil) nach Lebenswegmodulen und Bauweisen [Einfamilienhaus]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

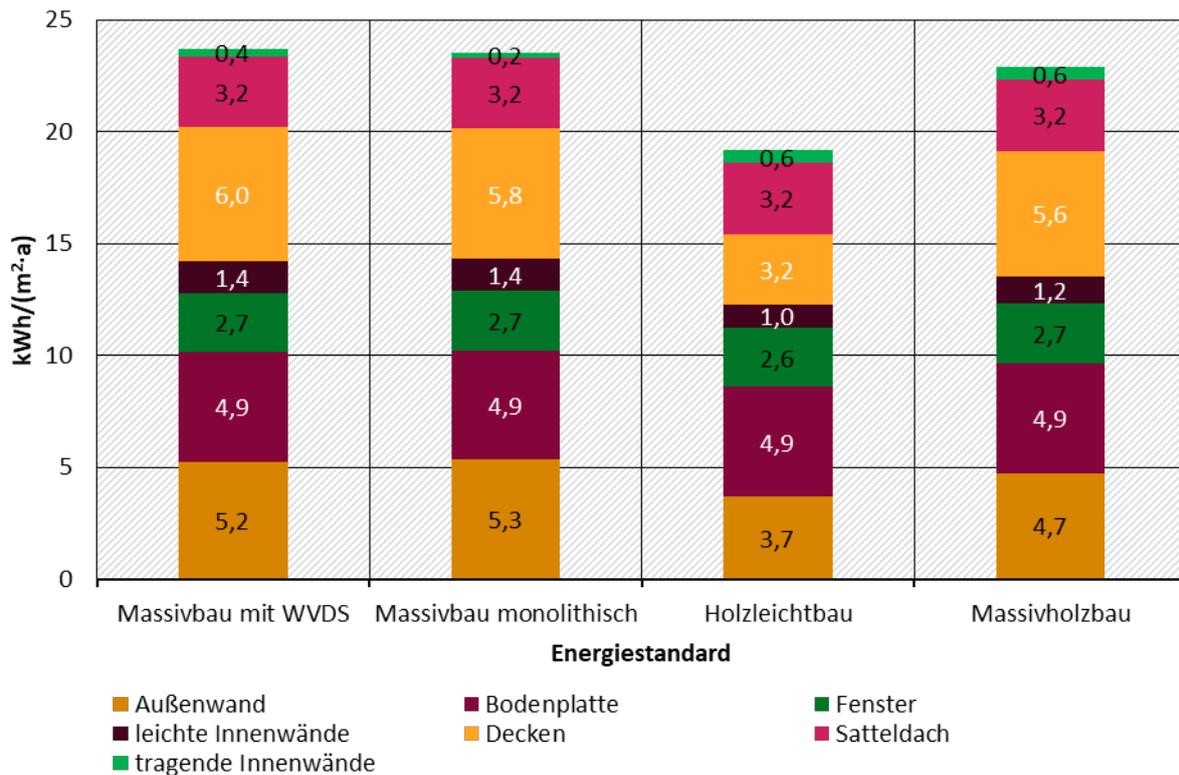
Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Energieeffizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

Weiterhin zeigt Abbildung 20 den kumulierten Energieaufwand nach Bauteilen in der Herstellungsphase für die zuvor dargestellten Bauweisen. Unterschiede bestehen analog zum Aufbau der Bauweise in den Außenwänden, Innenwänden und Geschossdecken. Im Massivbau mit WDVS und im monolithischen Massivbau bestehen die Geschossdecken aus Stahlbeton und sind somit stark vom Bewehrungsgrad abhängig. Im Vergleich dazu liegen im Holzleichtbau die Vorteile in der Balkenkonstruktion, die neben den Geschossdecken auch in der Außenwand besteht.

**Abbildung 20: Kumulierter Energieaufwand nach Bauteilen und Bauweisen in der Herstellungsphase [Einfamilienhaus, ohne Wärmeversorgung und Raumlüftung]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

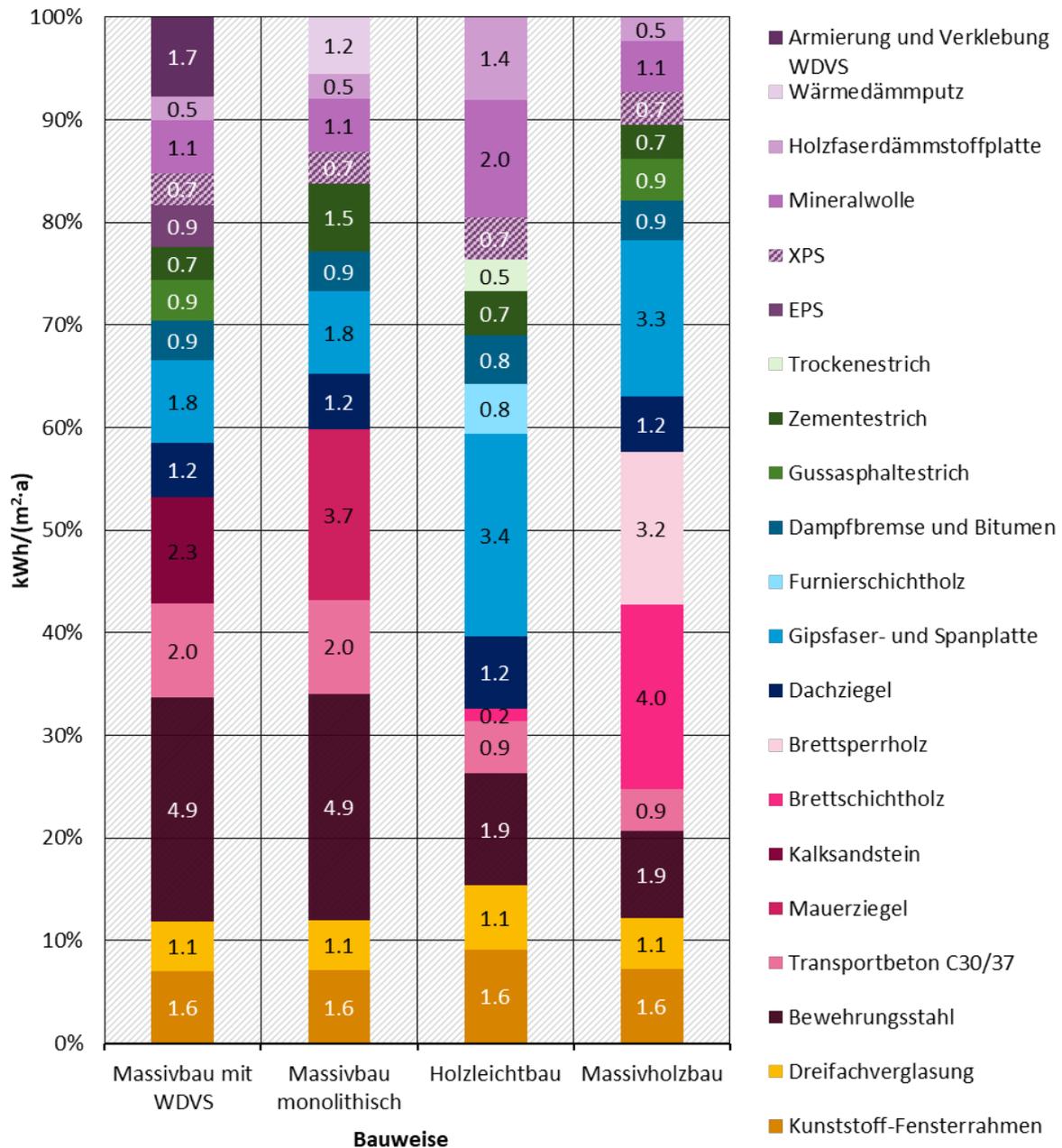
Energieeffizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

Abbildung 21 zeigt den kumulierten Energieaufwand in der Herstellungsphase verschiedener Materialien für die verschiedenen Bauweisen. Dargestellt ist nur die Baukonstruktion, die Wärmeversorgung und die Lüftungsanlage sind ausgenommen. Materialien von unter 2 % am kumulierten Energieaufwand sind ausgenommen.

In den Massivbauweisen (Massivbauweise mit WVDs, monolithischer Massivbau und Massivholzbau) wird der Energieaufwand zu mehr als 50 % von den tragenden Bauteilen (pinke Farben) bestimmt. Der große Anteil ist zum einem auf den Primärenergieaufwand in der Herstellung der Materialien, aber auch ihrem Anteil am Volumen der Baustoffe zurückzuführen. In der Holzleichtbauweise hat das Tragwerk dagegen nur einen Anteil von etwa 20 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Bewehrungsstahl und Transportbeton ausschließlich in der Bodenplatte eingesetzt werden. Im Massivbau mit WVDs hat der in den Geschossdecken und der Bodenplatte eingesetzte Bewehrungsstahl mit 4,9 kWh/(m<sup>2</sup>·a) den größten Anteil am gesamten kumulierten Energieaufwand. Weiterhin hat der Transportbeton in diesen Bauteilen mit 2 kWh/(m<sup>2</sup>·a) einen relevanten Anteil. Der in den Außenwänden verwendete Kalksandstein in Kombination mit der Armierung und Verklebung des WVDs hat einen Primärenergieaufwand von 4 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Relevant sind mit 1,8 kWh/(m<sup>2</sup>·a) weiterhin die Gipsfaser- und Spanplatten. In der monolithischen Massivbauweise sind neben dem Bewehrungsstahl und dem Transportbeton insbesondere die Mauerziegel der Außen- und Innenwand bedeutend. Mit einem kumulierten Energieaufwand von 3,7 kWh/(m<sup>2</sup>·a) haben diese einen Anteil von rund 15 %. Im Massivholzbau sind vor allem die tragenden Elemente aus Brettschicht- und Brettsperrholz entscheidend. Diese haben mit 7,2 kWh/(m<sup>2</sup>·a) einen Anteil von 30 % am kumulierten Energieaufwand.

Der Kunststoff-Fensterrahmen und die Dreifachverglasung (gelbe Farben) bestimmen in den Massivbauweisen etwa 12 % des kumulierten Energieaufwands. Wie in Abbildung 18 dargestellt, hat die Holzleichtbauweise insgesamt einen geringeren kumulierten Energieaufwand in der Herstellungsphase, weshalb die Komponenten der Fenster einen höheren Anteil haben.

**Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand nach Materialien und Bauweisen in der Herstellungsphase [Einfamilienhaus, ohne Wärmeversorgung und Raumlüftung]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES  
 Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach  
 Energieeffizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

Die Abdeckungen und Abdichtungen (blaue Farben) haben in der Holzleichtbauweise dagegen mit rund 30 % einen bedeutenden Anteil am kumulierten Energieaufwand. Entscheidend ist

dabei vor allem die Gipsfaser- und Spanplatten mit  $3,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . Weiterhin bestehen die Geschossdecken bestehen aus Konstruktionsvollholz und Furnierschichtholz. Im Massivholzbau haben die Abdeckungen und Abdichtungen einen Anteil von etwa 20 % am kumulierten Energieaufwand, was insbesondere auf die Gipsfaserplatten in der Außenwand zurückzuführen ist.

Der Estrich (grüne Farben) hat in allen Bauweisen einen Anteil von 5 bis 10 %. Dabei hat der Gussasphaltestrich, bezogen auf die Bezugseinheit, einen etwas höheren Energieaufwand.

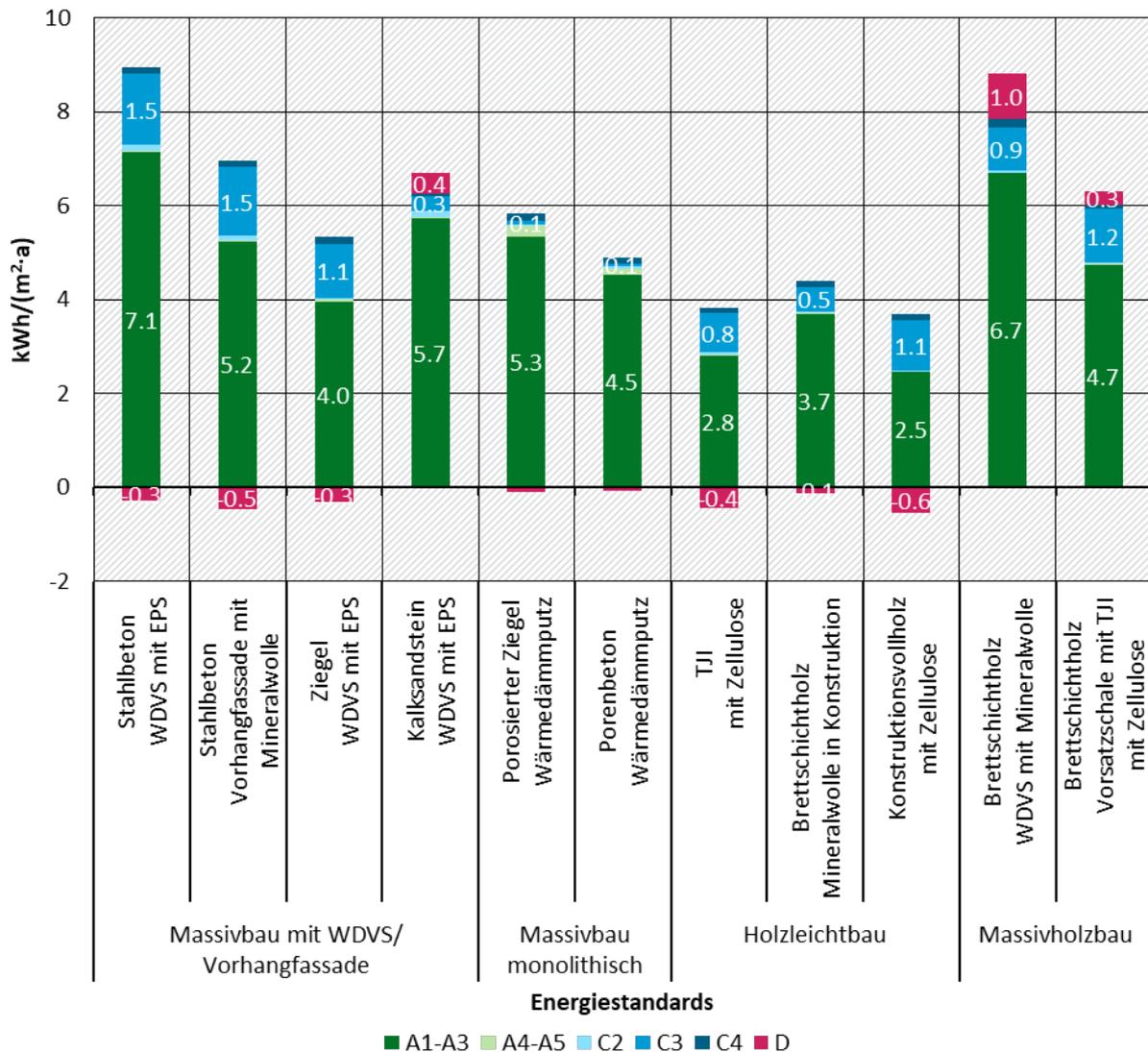
Die Dämmstoffe (violette Farben) schwanken die Anteile am kumulierten Energieaufwand zwischen 10 und rund 15 %. Im Massivbau mit WDVS wird eine Kombination aus Dämmstoff (EPS), Armierung und Verklebung eingesetzt, die einen Energieaufwand von  $2,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  verursacht. Daneben haben die Dämmstoffe aus XPS sowie Mineralwolle und Holzfaser geringere Anteile am kumulierten Energieaufwand

In der Holzleichtbauweise kommen vor allem Mineralwolle und Holzfaserdämmstoffplatten zum Einsatz, die zusammen einen Anteil von 20 % am kumulierten Energieaufwand haben. In der monolithischen Massivbauweise hat der Wärmedämmputz mit  $1,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  den größten Anteil am Energieaufwand der Dämmstoffe. Im Massivholzbau hat die Mineralwolle mit  $1,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  den größten Anteil. Die in der Außenwanddämmung eingesetzte Zellulose hat einen Anteil von weniger als 2 % und ist deshalb nicht aufgeführt.

In Abbildung 20 werden die verschiedenen Anteile der Bauteile am kumulierten Energieaufwand verschiedener Bauweisen in der Herstellungsphase gezeigt. Diese Unterschiede bestehen nicht nur zwischen den Bauweisen, sondern auch innerhalb der Bauweisen. Insbesondere unterscheidet sich der Aufbau der Außenwände, wie in Abschnitt 3.3.2 dargestellt. Abbildung 22 zeigt deshalb den kumulierten Energieaufwand für alle berechneten Außenwand-Konstruktionen nach Bauweise. In allen Varianten hat die Herstellungsphase den größten Anteil am kumulierten Energieaufwand. Der Energieaufwand in der Abfallbehandlung (C3) ist stark von den eingesetzten Materialien abhängig, im Vergleich aber deutlich geringer als der Energieaufwand der Herstellung.

Die Abbildung vergleicht vier Varianten in der Massivbauweise mit WDVS bzw. Vorhangfassade. Die Variante Stahlbeton mit WDVS mit EPS hat dabei mit rund  $9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  den größten kumulierten Energieaufwand, die Variante mit Ziegel mit rund  $5,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  den geringsten. Durch die thermische Verwertung des WDVS resultiert ein Energieaufwand von 1,1 bzw. 1,5  $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . In der monolithischen Massivbauweise werden zwei Varianten verglichen, wobei die Variante mit Porenbeton einen niedrigeren kumulierten Energieaufwand als die Variante mit porosiertem Ziegel hat. Da die Materialien am Lebensende nicht thermisch verwertet werden, ist der Energieaufwand in C3 marginal.

**Abbildung 22: Kumulierter Energieaufwand nach Lebenswegmodulen und Konstruktionen der Außenwand [Einfamilienhaus]**



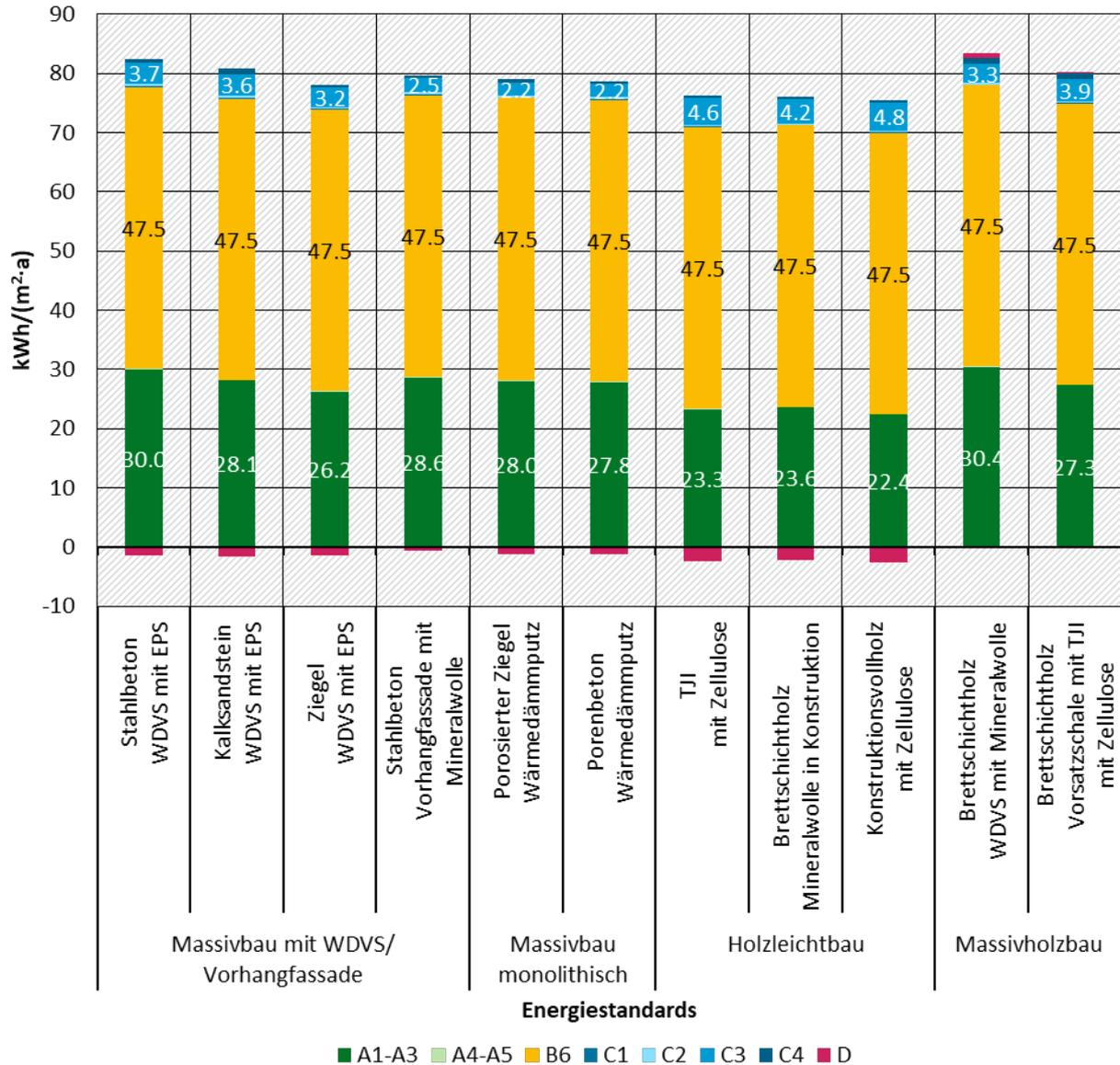
Quelle: Eigene Berechnungen IREES  
 Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach  
 Energieeffizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

Bei den Varianten der Holzleichtbauweise sind vor allem die Dämmstoffe entscheidend. Die Varianten mit Zellulose haben mit knapp 4 kWh/(m²·a) einen deutlich niedrigeren Energieaufwand als Mineralwolle. Durch die thermische Verwertung von Zellulose und Holzprodukten resultiert in Modul C3 in der Variante mit Zellulose und TJI ein Energieaufwand von 0,8 kWh/(m²·a), von 0,5 kWh/(m²·a) in der Variante mit Mineralwolle und 1,1 in der Variante mit Konstruktionsvollholz und Zellulose. In den Holzmassivbauweisen ist auch das Dämmsystem entscheidend. Das WDVS mit Mineralwolle führt zu einem kumulierten Energieaufwand von rund 8 kWh/(m²·a). Der Einsatz von Brettsperrholz führt allerdings zu einer potenziellen Gutschrift von rund 1 kWh/(m²·a) in Modul D. Durch die thermische Verwertung des WVDS entsteht ein Energieaufwand von 0,9 kWh/(m²·a). Die Variante mit Vorsatzschale und Zellulose hat mit 6 kWh/(m²·a) im Vergleich einen geringeren kumulierten Energieaufwand.

Abbildung 23 zeigt ergänzend den kumulierten Energieaufwand nach Lebenswegmodulen und Bauweisen. Im Vergleich zu Abbildung 22 ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Holzleichtbauweisen

haben insgesamt den geringsten kumulierten Energieaufwand. Innerhalb der Bauweisen gibt es je nach verwendeten Materialien deutliche Unterschiede. Die Massivholzbauweise mit Brettschichtholz und WDVS hat mit rund 85 kWh/(m<sup>2</sup>·a) den größten kumulierten Energieaufwand.

**Abbildung 23: Kumulierter Energieaufwand nach Lebenswegmodulen und Bauweisen [Einfamilienhaus]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES  
 Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach  
 Energieeffizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

In Abbildung 24 sind die Unterschiede zwischen den Skelettbauweisen von Nichtwohngebäuden abgebildet. Die Abbildung zeigt den kumulierten Energieaufwand für ein Verwaltungsgebäude in drei verschiedenen Bauweisen<sup>12</sup>. Der detaillierte Aufbau der Gebäude ist unterhalb der Abbildung aufgeführt. Der kumulierte Energieaufwand in der Nutzungsphase des Gebäudes übersteigt den kumulierten Energieaufwand in der Herstellungsphase um ein Vielfaches, was

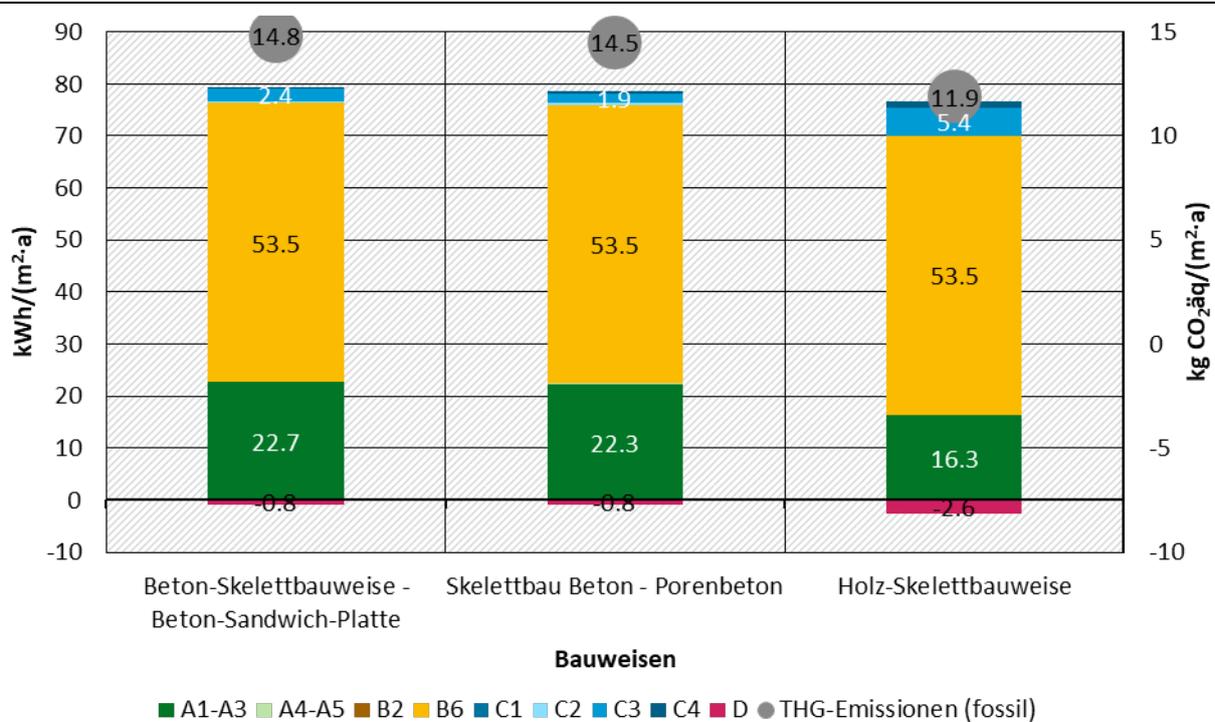
<sup>12</sup> Der KEA ist nach den Modulen des Lebenszyklus unterteilt, die THG-Emissionen sind als Summe über die Module A1 bis C4 angegeben

vor allem auf den Strombedarf der Lüftungsanlage zurückzuführen ist. Die Nutzungsphase hat einen Anteil von etwa 70 % am kumulierten Energieaufwand. Unabhängig vom Energieeffizienzstandard entfallen rund 23 kWh/(m<sup>2</sup>·a) auf die Wärmeversorgung und 31 kWh/(m<sup>2</sup>·a) auf die Lüftungsanlage. Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wird für Verwaltungsgebäude ein Zentrales Zu- und Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung berücksichtigt. Es wird eine Luftwechselrate von 5 und eine Betriebszeit von 9 Stunden täglich, über das ganze Jahr, angenommen.

Insgesamt sind der kumulierte Energieaufwand und die fossilen THG-Emissionen der Holz-Skelettbauweise mit rund 75 kWh/(m<sup>2</sup>·a) etwas niedriger als bei den Beton-Skelettbauweisen. In der Beton-Skelettbauweise mit Beton-Sandwich-Platten resultiert ein kumulierter Energieaufwand von 89 kWh/(m<sup>2</sup>·a), in der Variante mit Porenbeton wird ein Wert von rund 87 kWh/(m<sup>2</sup>·a) erreicht. Bei Betrachtung der fossilen THG-Emissionen sind die Unterschiede zwischen den Bauweisen deutlicher, da diese nur den fossilen kumulierten Energieaufwand berücksichtigen. Die Holz-Skelettbauweise verursacht über den Lebenszyklus rund 12 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a), die Betonskelettbauweise mit Porenbeton und die Variante mit Beton-Sandwich-Platten rund 15 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a).

Im Vergleich zu den zuvor vorgestellten Varianten eines Einfamilienhauses ist der Energieaufwand in der Herstellungsphase bei Verwaltungsgebäuden bzw. den Skelettbauweisen geringer. Dies ist auf das abnehmende A/V-Verhältnis<sup>13</sup> bei größeren Gebäuden zurückzuführen. Dieser Effekt wird in Kapitel 4.3 genauer beschrieben.

**Abbildung 24: Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und Bauweisen [Verwaltungsgebäude]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Verwaltungsgebäude ohne Keller und mit Flachdach

Wärmeversorgungssystem: Luft-Wasser-Wärmepumpe Energieeffizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

13 Das Oberflächen (A) zu Volumen (V)-Verhältnis bezeichnet die Relation von Gebäudehüllfläche zu umschlossenen Volumen von Gebäuden (Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.a)

**Verwaltungsgebäude in Beton-Skelettbauweise mit Beton-Sandwich-Platten mit Flachdach (ausführliche Beschreibung siehe Abschnitt 3.3.2)**

**Außenwand** als Skelettkonstruktion aus Stahlbeton mit Beton-Sandwich-Platten und Polyurethan-Hartschaum in der Sandwich-Konstruktion, **tragende Innenwände** als Skelettkonstruktion aus Stahlbeton mit Kalksandstein, **leichte Innenwände** aus einer Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle, **Geschossdecken** aus Stahlbeton mit Unterzügen und Mineralwolle als Trittschalldämmung und Zementestrich, **Flachdach** aus Stahlbeton mit Unterzügen gedämmt mit XPS und Abdichtung mit Aluminiumblech, **Bodenplatte** mit Tragwerk aus Transportbeton C30/37 und Bewehrungsstahl sowie Dämmung mit XPS und Zementestrich

**Verwaltungsgebäude in Beton-Skelettbauweise mit Porenbeton mit Flachdach**

**Außenwand** als Skelettkonstruktion aus Stahlbeton und Porenbeton mit Wärmedämmputz, tragende Innenwände als Skelettkonstruktion aus Stahlbeton und Kalksandstein, **leichte Innenwände** aus einer Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle, **Geschossdecken** aus Stahlbeton mit Unterzügen mit Mineralwolle als Trittschalldämmung und Zementestrich, **Flachdach** aus Stahlbeton mit Unterzügen gedämmt mit XPS und Abdichtung mit Aluminiumblech, **Bodenplatte** mit Tragwerk aus Transportbeton C30/37 und Bewehrungsstahl sowie Dämmung mit XPS und Zementestrich

**Verwaltungsgebäude in Holz-Skelettbauweise mit Flachdach**

**Außenwand** als Skelettkonstruktion aus Brettschichtholz und Holzrahmenkonstruktion mit TJI und Mineralwolle in der Holzrahmenkonstruktion, **tragende Innenwände** als Skelettkonstruktion aus Brettschichtholz und Holzrahmenkonstruktion aus Brettschichtholz, Gipsfaser und Mineralwolle, **leichte Innenwände** aus einer Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle, **Geschossdecken** als Brettstapeldecke mit Unterzügen und Mineralwolle als Trittschalldämmung und Zementestrich, **Flachdach** aus Konstruktionsvollholz mit Unterzügen, Zellulosefasereinblasdämmstoff und XPS, **Bodenplatte** mit Tragwerk aus Transportbeton C30/37 und Bewehrungsstahl sowie Dämmung mit XPS und Zementestrich

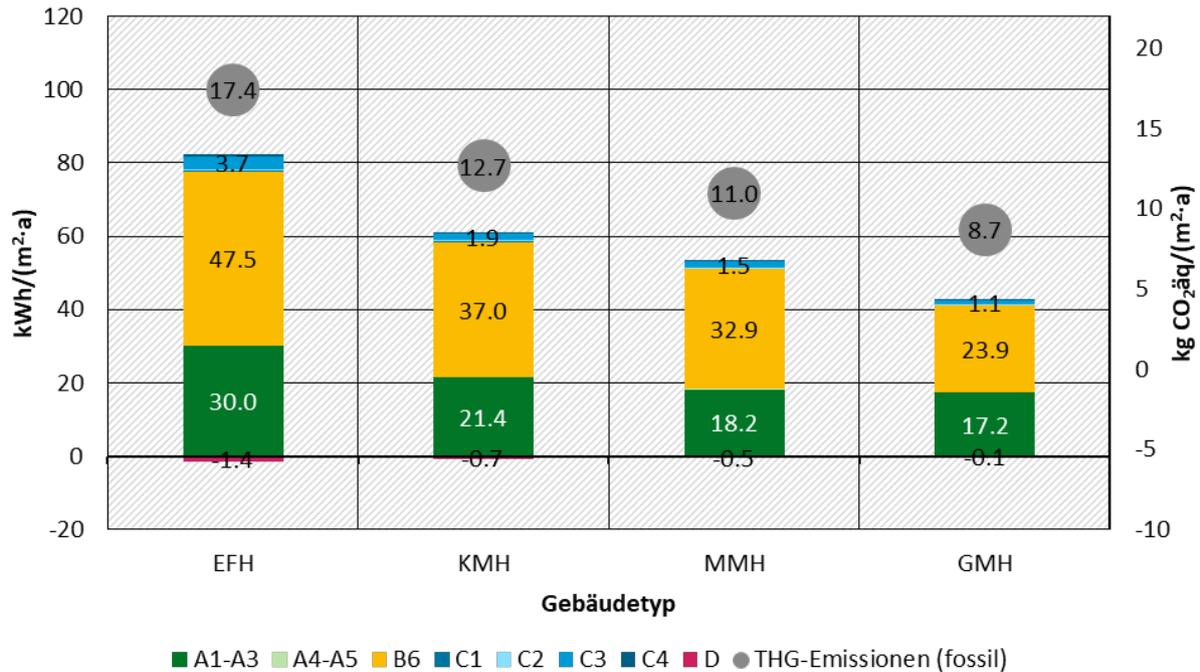
### 4.3 Einfluss der Gebäudetypen auf den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen

Neben den Unterschieden, die sich durch Energiestandards und Bauweisen in Bezug auf den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen ergeben, bestehen weitere Unterschiede durch Gebäudetypen. Abbildung 25 zeigt den kumulierten Energieaufwand und die fossilen THG-Emissionen für ein Einfamilienhaus (EFH), kleines Mehrfamilienhaus (KMH), mittleres Mehrfamilienhaus (MMH) und großes Mehrfamilienhaus (GMH)<sup>14</sup>. Das Gebäude ist ein Massivbau aus Stahlbeton mit WDVS. Der detaillierte Aufbau des Gebäudes ist unterhalb der Abbildung beschrieben.

Der kumulierte Energieaufwand sinkt mit zunehmender Gebäudegröße bzw. steigender Wohnfläche. Dies ist auf das abnehmende A/V-Verhältnis bei größeren Gebäuden zurückzuführen. Der Flächenbezug der gewählten Methode (siehe Kapitel 2.3) begünstigt deshalb Gebäude mit großer Fläche bzw. einem hohem Energieaufwand. Somit resultieren für GMH der niedrigste kumulierte Energieaufwand und die geringsten fossilen THG-Emissionen.

<sup>14</sup> Der kumulierte Energieaufwand ist nach den Modulen des Lebenszyklus unterteilt, die THG-Emissionen sind als Summe über die Module A1 bis C4 angegeben

**Abbildung 25: Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen nach Lebenswegmodulen und Gebäudetypen**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Bauweise: Massivbau mit Stahlbeton und Wärmedämmverbundsystem

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

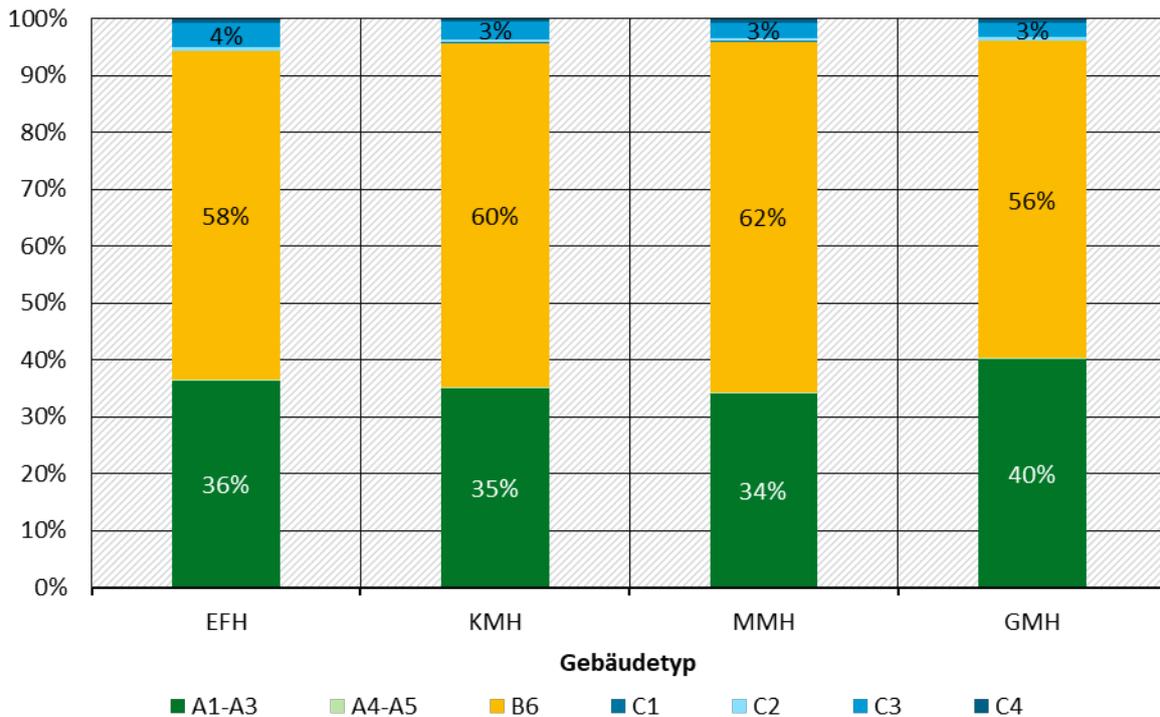
Effizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

**Massivbauweise mit WDVS (ausführliche Beschreibung siehe Abschnitt 3.3.2)**

**Außenwand** aus Stahlbeton mit WDVS mit EPS, **tragende Innenwände** aus Stahlbeton und **leichte Innenwände** aus einer Gipskarton-Stahlkonstruktion mit Mineralwolle, **Geschossdecken** aus Stahlbeton mit Mineralwolle als Trittschalldämmung und Zementestrich, **Satteldach** aus Konstruktionsvollholz und mit Vollsparrendämmung aus Mineralwolle und Holzfaserdämmstoff sowie Abdeckung mit Dachziegeln, **Bodenplatte** mit Tragwerk aus Transportbeton C30/37 und Bewehrungsstahl sowie Dämmung mit XPS und Zementestrich

Ergänzend zeigt Abbildung 26 die Anteile der Lebenswegmodule am gesamten kumulierten Energieaufwand. Im Einfamilienhaus entfallen 36 % auf die Herstellung der Bauprodukte und technischen Gebäudeausrüstung. Die Nutzungsphase trägt zu 58 % zum kumulierten Energieaufwand bei. Im kleinen Mehrfamilienhaus hat die Herstellungsphase einen Anteil von 35 % am kumulierten Energieaufwand, die Nutzungsphase dagegen 60 %. Im mittleren Mehrfamilienhaus hat die Herstellungsphase einen Anteil von 34 % am kumulierten Energieaufwand, die Nutzungsphase 62 %. Im großen Mehrfamilienhaus hat die Herstellungsphase einen Anteil von 40 % und die Nutzungsphase einen Anteil von 56 % am kumulierten Energieaufwand, Im Vergleich zu den anderen Gebäudetypen ist der Anteil in C4 im großen Mehrfamilienhaus mit 3 % am höchsten.

**Abbildung 26: Anteile des kumulierten Energieaufwands nach Lebenswegmodulen und Gebäudetypen**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Bauweise: Massivbau mit Stahlbeton und Wärmedämmverbundsystem

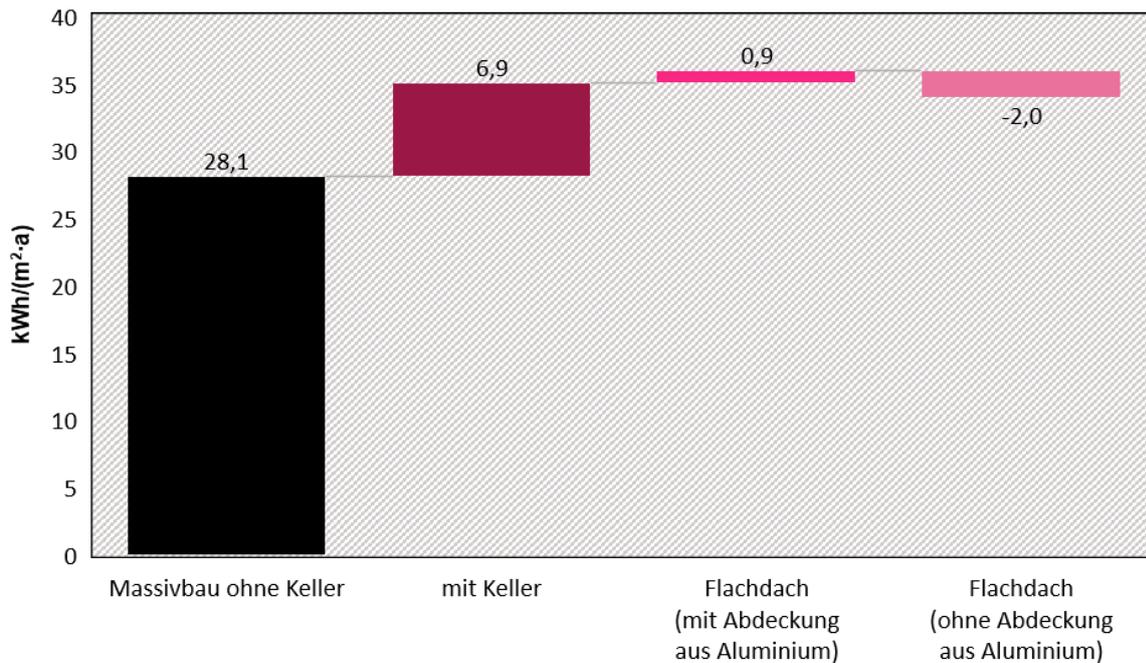
Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Effizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

Abbildung 27 zeigt weiterhin die Veränderungen, die sich hinsichtlich des kumulierten Energieaufwands beim Bau eines Kellers und eines Flachdaches anstelle eines Satteldaches ergeben. Alle betrachteten Gebäudetypen wurden auch mit Keller und Flachdach berechnet. Es wird angenommen, dass die Art des Daches keine Auswirkungen auf die Wohnfläche hat und sich durch Errichtung eines Kellers die Wohn- bzw. Nutzfläche erhöht.

Die Abbildung zeigt, dass der Bau eines Kellers zu einer Erhöhung des kumulierten Energieaufwands von rund 7 kWh/(m<sup>2</sup>·a) führt, was auf den eingesetzten Stahlbeton zurückzuführen ist. Durch den Bau eines Flachdaches anstelle eines Satteldachs erhöht sich der Primärenergieaufwand um 0,9 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Insgesamt ist das Flachdach durch Verwendung von Stahlbeton energieintensiver als ein Satteldach, allerdings wird keine oberste Geschossdecke benötigt, was sich positiv auf den kumulierten Energieaufwand auswirkt. Entscheidend ist beim Flachdach allerdings das Aluminiumblech zur Abdichtung am Rand. Wird auf das Aluminiumblech verzichtet, reduziert sich der kumulierte Energieaufwand um 2 kWh/(m<sup>2</sup>·a).

**Abbildung 27: Einfamilienhaus - Veränderung des kumulierten Energieaufwands bei Bau eines Kellers und Flachdaches**



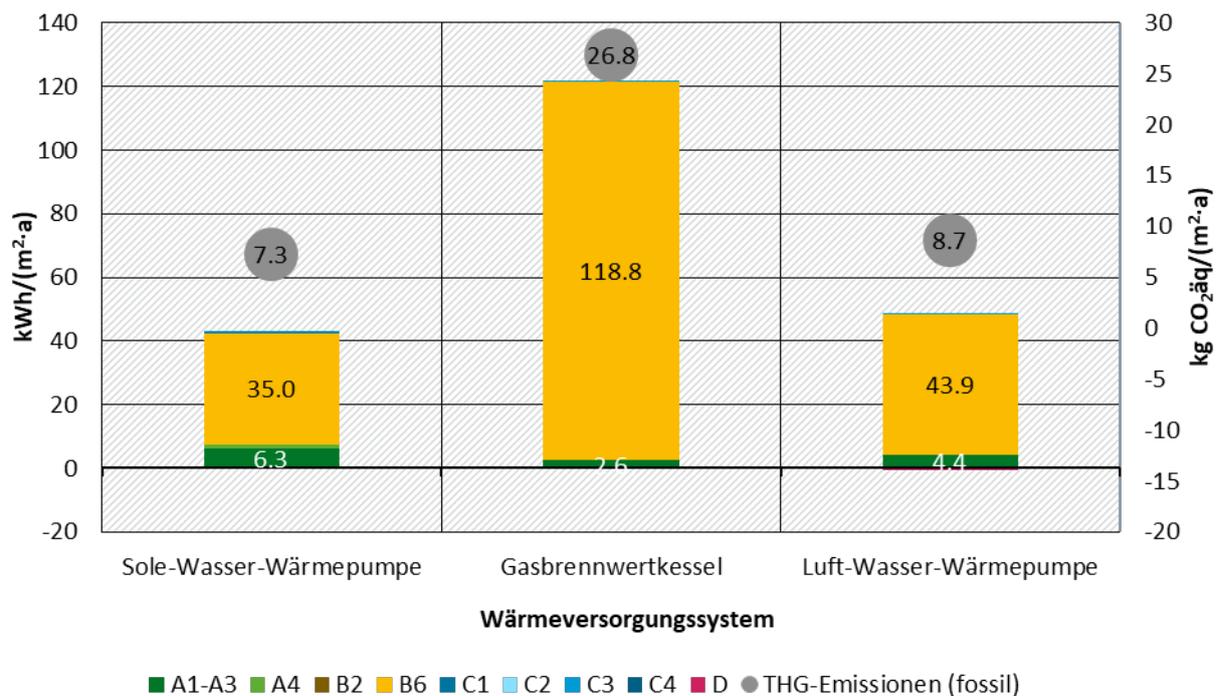
Quelle: Eigene Berechnungen IREES  
 Gebäudetyp: Einfamilienhaus  
 Bauweise: Massivbau mit Stahlbeton und Wärmedämmverbundsystem  
 Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe  
 Effizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

#### 4.4 Einfluss der Gebäudetechnik auf den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen

Aufgrund der Anforderungen im GEG an den Primärenergiebedarf von Gebäuden fokussieren sich die zuvor dargestellten Ergebnisse hinsichtlich der Gebäudetechnik auf Wärmepumpen. Zusätzlich zur Luft-Wasser-Wärmepumpe wurden im Rahmen des Projektes allerdings auch Sole-Wasser-Wärmepumpen und Gasbrennwertkessel betrachtet. Für eine nähere Betrachtung werden in diesem Kapitel der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen der Gebäudetechnik über den gesamten Lebenszyklus dargestellt.

Abbildung 28 zeigt den kumulierten Energieaufwand und die fossilen THG-Emissionen verschiedener Wärmeversorgungssysteme, die den Anforderungen des GEG 2023 und einem Einfamilienhaus entsprechen. Die Abbildung zeigt damit einen Anteil des kumulierten Energieaufwands für das gesamte Einfamilienhaus in Abbildung 13. Der dort dargestellte Energieaufwand in der Nutzungsphase enthält neben der Wärmeversorgung auch die Lüftungsanlage.

**Abbildung 28: Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen verschiedener Wärmeversorgungssysteme [Erzeugung und Verteilung]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus

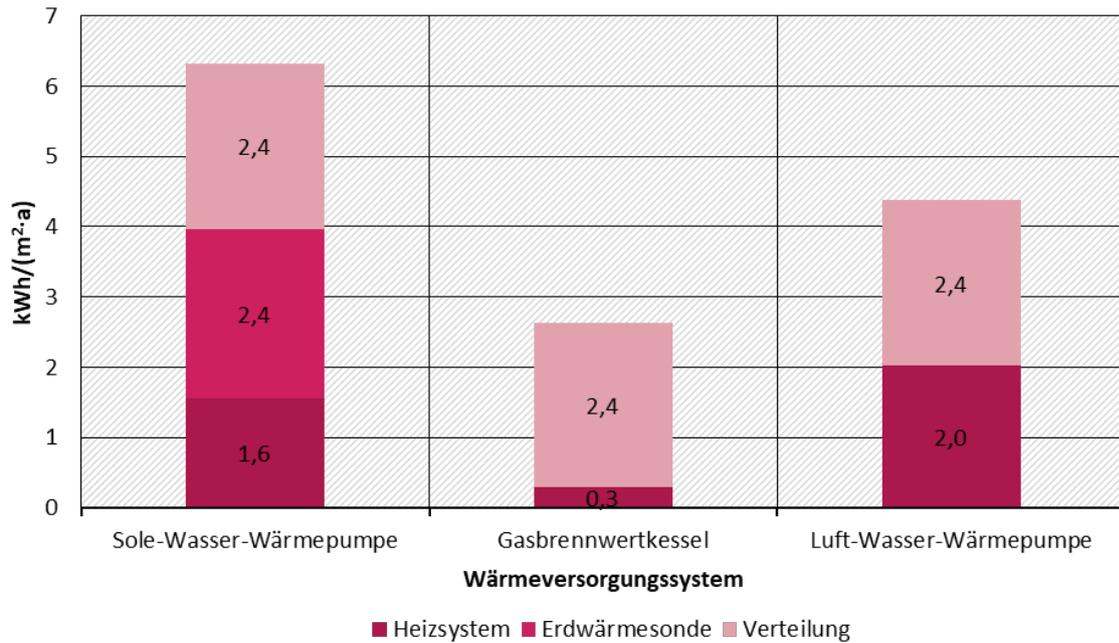
Bauweise: Massivbau mit Stahlbeton und Wärmedämmverbundsystem

Effizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

Es wird deutlich, dass der Primärenergieaufwand von Wärmepumpen aufgrund der höheren Effizienz während der Nutzungsphase deutlich niedriger ist als beim Gasbrennwertkessel. Andererseits ist der Primärenergieaufwand des Gasbrennwertkessels in der Herstellungsphase niedriger als bei Wärmepumpen. Für den Gasbrennwertkessel resultieren über den Lebenszyklus ein kumulierter Energieaufwand von rund 120 kWh/(m²·a) und THG-Emissionen von rund 27 kg CO₂äq/(m²·a). Der Anteil der Herstellungsphase beträgt dabei nur 2 % am kumulierten Energieaufwand. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe hat einen kumulierten Energieaufwand von rund 40 kWh/(m²·a) und THG-Emissionen von rund 7 kg CO₂äq/(m²·a). Im Vergleich zu den anderen Wärmeversorgungssystemen ist der kumulierte Energieaufwand in der Herstellungsphase bei Sole-Wasser-Wärmepumpen durch die benötigte Erdwärmesonde mit 6,3 kWh/(m²·a) am höchsten. Die Herstellungsphase hat damit einen Anteil von etwa 15 %. Da Sole-Wasser-Wärmepumpen im Schnitt eine höhere JAZ aufweisen, ist der kumulierte Energieaufwand in der Nutzungsphase geringer. (Berkel 2021) Die Luft-Wasser-Wärmepumpe hat einen kumulierten Energieaufwand von rund 49 kWh/(m²·a) und THG-Emissionen von rund 9 kg CO₂äq/(m²·a). Die Herstellungsphase hat damit einen Anteil von etwa 9 %.

Weiterhin zeigt Abbildung 29 den Energieaufwand in der Herstellungsphase der Wärmeversorgungssysteme nach den verschiedenen Komponenten. Bei der Sole-Wasser-Wärmepumpe hat die Erdwärmesonde mit 2,4 kWh/(m²·a) den höchsten Anteil am kumulierten Energieaufwand. Beim Gasbrennwertkessel beträgt der Primärenergieaufwand zur Herstellung des Heizsystems nur 0,3 kWh/(m²·a). Das Verteilsystem hat mit 2,4 kWh/(m²·a) einen Anteil von fast 90 % am kumulierten Energieaufwand. In allen Wohngebäuden wird eine Vorlauftemperatur von 35 °C angenommen und deshalb eine Flächenheizung installiert.

**Abbildung 29: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Wärmeversorgungssysteme in der Herstellungsphase (A1-A3) nach Komponenten**



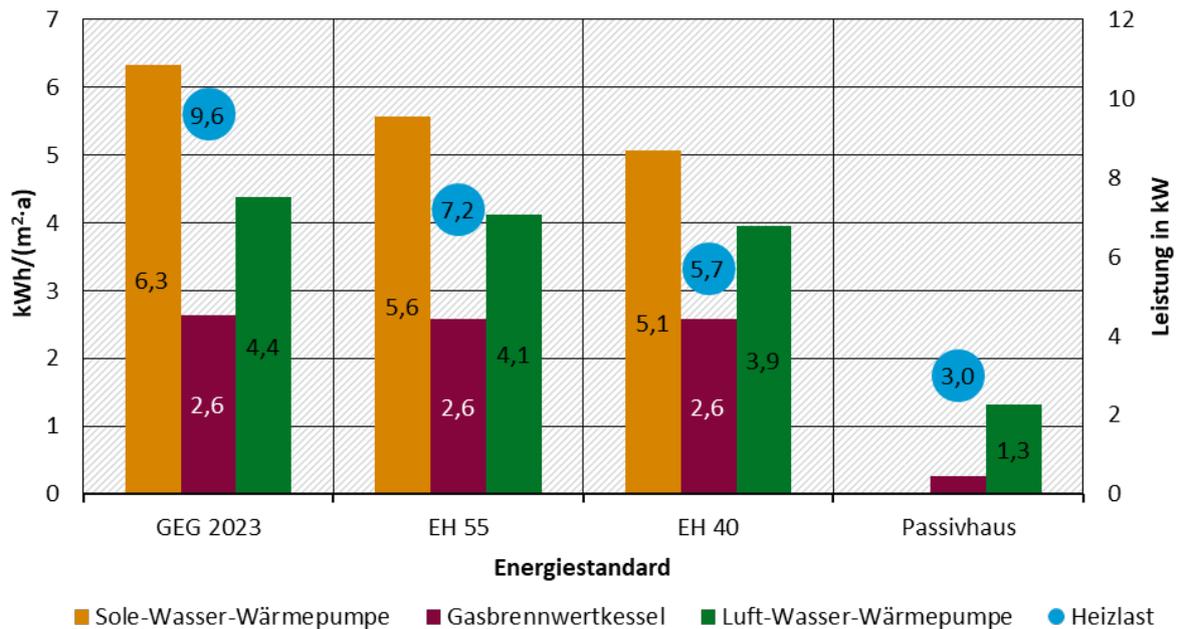
Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Bauweise: Massivbau mit Stahlbeton und Wärmedämmverbundsystem

Effizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

Abbildung 30 zeigt abschließend den kumulierten Energieaufwand in der Herstellungsphase der Wärmeversorgungssysteme für verschiedene Energiestandards in Kombination mit der installierten Leistung. Wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, wird für den Passivhaus-Standard ein luftgeführtes Verteilsystem unterstellt, weshalb auf eine Sole-Wasser-Wärmepumpe verzichtet wird.

**Abbildung 30: Kumulierter Energieaufwand in der Herstellungsphase der Wärmeversorgungssysteme und installierte Leistung nach verschiedenen Energiestandards**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Bauweise: Massivbau mit Stahlbeton und Wärmedämmverbundsystem

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Effizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

Es wird deutlich, dass mit sinkendem Heizwärmebedarf aufgrund höherer Energieeffizienz die installierte Leistung zur Wärmeerzeugung sinkt. Da der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung der Wärmeversorgungssysteme an die installierte Leistung gekoppelt ist, sinkt dieser mit steigender Energieeffizienz.

## 4.5 Sensitivitäten

### 4.5.1 Veränderung des kumulierten Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen bei Bezugnahme auf Haushaltsgröße

Wie in Kapitel 2.3 dargestellt ist, wird der berechnete kumulierte Energieaufwand auf die Wohn- bzw. Nutzfläche der Gebäude bezogen, um einen besseren Vergleich zwischen dem Energieaufwand zur Herstellung der Materialien und dem Heizwärmebedarf in der Betriebsphase zu ermöglichen. Dadurch wird allerdings die Nutzung großer Flächen begünstigt. Deshalb wird an dieser Stelle anstelle der Wohn- bzw. Nutzfläche die Anzahl an Personen pro Gebäude als Bezugsgröße verwendet.

Die durchschnittliche Anzahl der Haushaltsmitglieder in Deutschland beträgt rund 2 Personen (BIB - Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung 2022). Diese Zahl unterscheidet sich allerdings je nach Gebäudegröße. In den Zusatzerhebungen zum Mikrozensus aus dem Jahr 2010 wird die Anzahl Personen in der Wohnung nach Gebäudetyp aufgeführt. In Tabelle 27 wird den verschiedenen Gebäudetypen eine Anzahl an Wohnungen und die durchschnittliche Anzahl an Personen in der Wohnung nach Mikrozensus 2010 zugeordnet. Für das kleine Mehrfamilienhaus werden vier Wohnungen, für das mittlere Mehrfamilienhaus 11 Wohnungen und für das große Mehrfamilienhaus 55 Wohnungen angenommen. Daneben wird dargestellt, welcher kumulierte Energieaufwand sich bei Verdoppelung der statistischen Anzahl an Personen ergibt.

**Tabelle 27: Durchschnittliche Anzahl an Wohnungen und Personen nach Gebäudetypen**

Gebäudetyp	Anzahl Wohnungen	Durchschnittliche Anzahl Personen in der Wohnung	Durchschnittliche Fläche pro Person in der Wohnung
Einfamilienhaus	1	2,5	51,3
Kleines Mehrfamilienhaus	4	1,9	41
Mittleres Mehrfamilienhaus	11	1,8	37,8
Großes Mehrfamilienhaus	55	1,6	36,3

Quelle: Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt (2012)

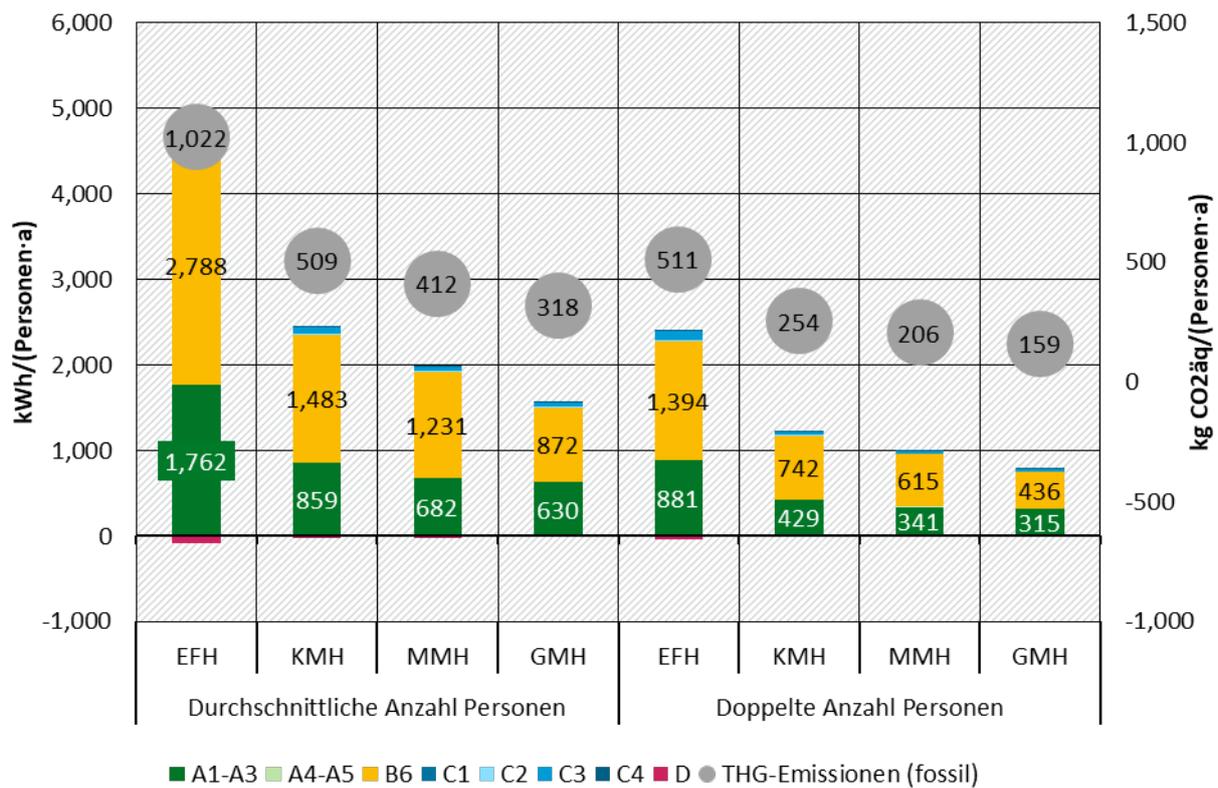
Abbildung 31 zeigt den kumulierten Energieaufwand und die fossilen THG-Emissionen nach Personen und Jahr für die verschiedenen Gebäudetypen. Im Vergleich zu Abbildung 25 ist der kumulierte Energieaufwand deutlich höher, da die Bezugsgröße Personen deutlich geringer als die Fläche ist. Allerdings sinkt analog zu Abbildung 25 mit steigender Wohnfläche bzw. größeren Gebäuden der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen. Während für ein Einfamilienhaus mit durchschnittlich 2,5 Personen noch knapp 4.800 kWh/(Person·a) und 1.022 kg CO<sub>2</sub>äq/ (Person·a) resultieren, sinkt dieser Wert auf rund 1.600 kWh/(Person·a) und 318 kg CO<sub>2</sub>äq/ (Person·a) für ein großes Mehrfamilienhaus mit ca. 88 Personen.

Die Abbildung zeigt weiterhin, dass der kumulierte Energieaufwand mit einer höheren Anzahl an Personen pro Gebäude deutlich reduziert wird. Für ein Einfamilienhaus summiert sich der kumulierte Energieaufwand bei 5 anstatt 2,5 Personen auf rund 2.400 kWh/(Person·a) und die THG-Emissionen auf 511 kg CO<sub>2</sub>äq/ (Person·a). Für ein großes Mehrfamilienhaus mit 176 Personen sinkt der kumulierte Energieaufwand auf rund 780 kWh/(Person·a) und die THG-Emissionen auf rund 160 kg CO<sub>2</sub>äq/ (Person·a).

Die Wohn- bzw. Nutzfläche als Bezugsgröße ist unabhängig von der Anzahl an Personen, die in einem Gebäude leben. Es ist somit kein Vergleich der CO<sub>2</sub>-Äquivalente, die aus dem Bedürfnis Wohnen resultieren mit dem gesamten Pro-Kopf-Budget möglich. Nach Angaben von Statista betragen die Pro-Kopf-Emissionen in Deutschland im Durchschnitt 11,2 t CO<sub>2</sub>äq (Stand 2021). Der Anteil des Bedürfnisses beläuft sich auf 2 t CO<sub>2</sub>äq (Statista 2024). Nach Angaben des Umweltbundesamt wäre ein weltweiter Pro-Kopf-Ausstoß von weniger als 1 t CO<sub>2</sub>äq für das Einhalten des 1,5 ° C notwendig (UBA - Umweltbundesamt 2023).

Die Abbildung macht somit deutlich, dass das Bedürfnis Wohnen einen großen Anteil an den Pro-Kopf-Emissionen hat. Je weniger Wohnfläche pro Person in Anspruch genommen wird, desto geringer sind auch die Pro-Kopf-Emissionen.

**Abbildung 31: Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen bei Bezugnahme auf Haushaltsgröße nach Lebenswegmodulen und Gebäudetypen**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES  
 Bauweise: Massivbau mit Stahlbeton und Wärmedämmverbundsystem  
 Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe  
 Effizienzstandard: Gebäudeenergiegesetz

#### 4.5.2 Veränderung des kumulierten Energieaufwands und Treibhausgasemissionen bei Erhöhung der Bauteilnutzungsdauer

Zur Darstellung des Einflusses der Nutzungsdauern von Baustoffen werden in diesem Kapitel der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen bei optimierten Nutzungsdauern dargestellt. Dafür wird, wie in Tabelle 28 dargestellt, die Nutzungsdauer aller nicht-tragenden Bauteile auf 60 Jahre erhöht. Dazu gehören neben den nicht-tragenden Elementen auch der Putz, die Wärmedämmung, Dachziegel und Fenster. Die Nutzungsdauer tragender Bauteile wird auf 100 Jahre erhöht. Die Nutzungsdauer der Wärmeversorgung auf 30 Jahre.

**Tabelle 28: Verlängerte Nutzungsdauern von Bauteilen in Gebäuden**

Bauteile	Nutzungsdauer [Jahre]
Putz	60
Tragende Bauteile	100
Nicht-tragende Elemente	60
Wärmedämmung	60
Dachziegel	60

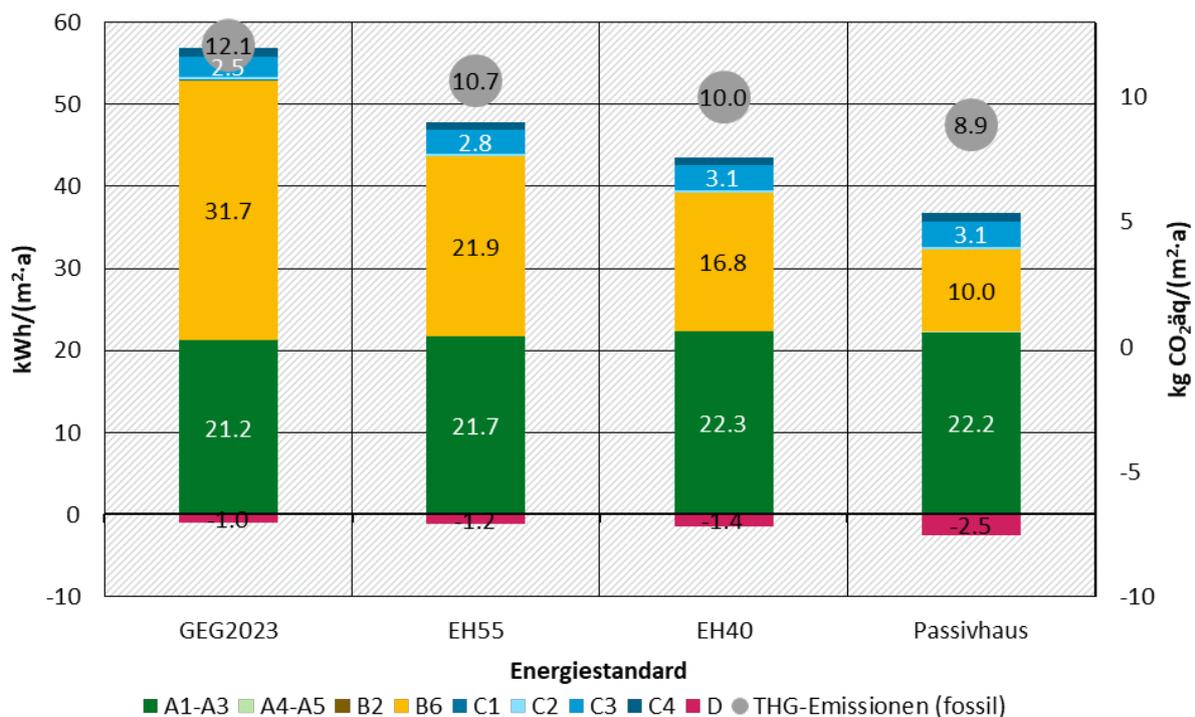
Bauteile	Nutzungsdauer [Jahre]
Fenster	60
Wärmeversorgung und Lüftung	30

Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 32 zeigt schließlich den kumulierten Energieaufwands und die fossilen THG-Emissionen bei Erhöhung der spezifischen Nutzungsdauer von Bauteilen und der technischen Gebäudeausrüstung im Vergleich zu standardisierten Nutzungsdauern (siehe Tabelle 7). Im Vergleich zu Abbildung 13 wird der Energieaufwand durch die höheren Nutzungsdauern deutlich reduziert.

Für einen Neubau nach Gebäudeenergiegesetz resultieren über den Lebenszyklus nur noch rund 57 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Davon entfallen auf die Herstellung der Bauprodukte und technischen Gebäudeausrüstung etwa 21 kWh/(m<sup>2</sup>·a), in der Nutzungsphase resultieren nur noch 32 kWh/(m<sup>2</sup>·a). In der Herstellungsphase (A1-A3) kann der Energieaufwand damit um rund 7 kWh/(m<sup>2</sup>·a) reduziert werden. Im Gebäude mit Effizienzhaus-Stufe 55 resultieren etwa 48 kWh/(m<sup>2</sup>·a), davon rund 22 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Herstellungsphase und rund 22 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Nutzungsphase. Das Gebäude, errichtet nach Effizienzhaus-Stufe 40, hat noch einen kumulierten Energieaufwand von rund 44 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Auf die Herstellungsphase entfallen rund 22 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und auf die Nutzungsphase rund 17 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Der kumulierte Energieaufwand im Passivhaus beträgt nur noch rund 37 kWh/(m<sup>2</sup>·a), davon rund 22 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Herstellungsphase und 10 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Nutzungsphase.

**Abbildung 32: Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen bei Erhöhung der Nutzungsdauer nach Lebenswegmodulen und Energiestandards**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

Bauweise: Massivbau mit Kalksandstein und Wärmedämmverbundsystem

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

## 4.6 Zwischenfazit

Dieses Kapitel zeigt den kumulierten Energieaufwand und die (fossilen) THG-Emissionen von verschiedenen Varianten von Wohn- und Nichtwohngebäuden im Neubau. Die Darstellungen zeigen den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen nach verschiedenen Energiestandards, Bauweisen und Gebäudetypen. Weiterhin wird auf den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen von verschiedenen Wärmeversorgungssystemen eingegangen. Darüber hinaus werden die Veränderungen des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen bei Bezugnahme auf Haushaltsgröße und bei veränderten Nutzungsdauern von Bauteilen und technischen Geräten betrachtet.

Es wird deutlich, dass der gewählte Energiestandard eine entscheidende Bedeutung für den kumulierten Energieaufwand im Lebenszyklus hat. Unter Berücksichtigung des Energiebedarfs für Raumwärme und Lüftung ist der kumulierte Energieaufwand in der Nutzungsphase eines Gebäudes, errichtet nach den Anforderungen des GEG, deutlich höher als der Energieaufwand in der Herstellungsphase. Der Energiebedarf für Warmwasser wurde in dieser Analyse nicht berechnet, würde den Energieaufwand in der Nutzungsphase allerdings noch weiter erhöhen. Im Vergleich zum GEG-Standard sinkt der Energieaufwand im Lebenszyklus mit steigendem Energiestandard (siehe Abbildung 13), da der Betriebsenergiebedarf mit höherer Effizienz sinkt, der Herstellungsenergiebedarf jedoch annähernd gleichbleibt.

Weiterhin wird deutlich, dass der Energieaufwand in der Herstellungsphase und im Abriss und der Entsorgung überwiegend nicht erneuerbar ist und in der Nutzungsphase überwiegend erneuerbar (Abbildung 15). Dies ist insbesondere auf den unterstellten Strom-Mix im Jahre 2030 zurückzuführen, der bereits einen hohen Anteil erneuerbarer Energien aufweist.

Eine geringere, aber auch nicht zu vernachlässigende Bedeutung für den kumulierten Energieaufwand haben die betrachteten Bauweisen (siehe Abbildung 18). Es gibt deutliche Unterschiede, wobei die Holzleichtbauweise bei gleichen Energiestandards den geringsten und die Massivbauweise mit Wärmedämmverbundsystem den höchsten kumulierten Energieaufwand vorweist. Dazwischen liegen die monolithische Massivbauweise und der Massivholzbau. Die Unterschiede zwischen den Bauweisen liegen insbesondere im Aufbau der Außenwände und Geschossdecken (siehe Abbildung 20). Die Vorteile des Holzleichtbaus liegen insbesondere in der Balken- und Rahmenkonstruktion. Durch den punktuellen Einsatz von tragenden Elementen kann der kumulierte Energieaufwand reduziert werden. Im Gegensatz dazu resultieren in den Massivbauweisen, auch für den Massivholzbau, aufgrund des flächendeckenden Materialeinsatzes höhere Energieaufwände.

Weiterhin bestehen Unterschiede zwischen verschiedenen Bauteilaufbauten innerhalb der gleichen Bauweise. Unter anderem resultiert bei Verwendung von Doppel-T-Trägern als tragende Elemente ein niedrigerer kumulierter Energieaufwand als bei Verwendung von Vollholz. Deutliche Unterschiede bestehen zudem innerhalb der verschiedenen Mauerwerksarten (Kalksandstein, Mauerziegel und Kalksandstein) sowie Stahlbeton (siehe Abbildung 22).

Bei Betrachtung der THG-Emissionen werden weitere Unterschiede zwischen den Bauweisen sichtbar. Die betrachteten THG-Emissionen umfassen sowohl fossile als auch biogene Emissionen. Fossile THG-Emissionen entstehen durch den Einsatz fossiler Energieträger in Herstellung, Betrieb und Entsorgungsphase und orientieren sich damit am kumulierten Energieaufwand. Biogene THG-Emissionen resultieren in Form von Speicherung von Kohlenstoff (CO<sub>2</sub>) in Holz und pflanzlichen Baustoffen und in Form Emissionen beim Einsatz von Biomasse als Energieträger sowie bei der Verbrennung der Baustoffe. Negative biogene THG-Emissionen resultieren vor allem im Holzbau, durch die Speicherung von CO<sub>2</sub> in der Herstellungsphase, am

Lebensende (Modul C3) werden diese wieder freigesetzt. Der Zeitpunkt der Freisetzung ist dabei von der Nutzungsdauer der Materialien abhängig.

Bei der Betrachtung unterschiedlicher Gebäudetypen wird deutlich, dass der kumulierte Energieaufwand mit steigender Wohnfläche sinkt (siehe Abbildung 25). Dies ist auf das abnehmende A/V-Verhältnis bei größeren Gebäuden zurückzuführen. Relativ betrachtet sinkt bei steigender Gebäudegröße der kumulierte Energieaufwand allerdings stärker, wenn anstelle der Wohnfläche die Anzahl an Bewohner und Bewohnerinnen als Bezugsgröße verwendet wird. Absolut ist der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen bei Berücksichtigung aktueller Haushaltsgrößen allerdings deutlich höher als bei Bezug auf die Wohnfläche, da die Wohn- bzw. Nutzfläche unabhängig von der Anzahl an Personen ist, die in einem Gebäude leben (siehe Abbildung 31). Die Anzahl an Personen als Bezugsgröße ermöglicht einen Vergleich der CO<sub>2</sub>-Äquivalente, die aus dem Bedürfnis Wohnen resultieren mit dem gesamten Pro-Kopf-Budget. Beispielsweise summiert sich in einem Einfamilienhaus der kumulierte Energieaufwand auf knapp 4.800 kWh/(Person·a) und rund 1.000 kg CO<sub>2</sub>äq/ (Person·a). Bei Verdopplung der Anzahl an Bewohnerinnen und Bewohner sinkt dieser Wert auf rund 2.400 kWh/(Person·a) und die THG-Emissionen auf 511 kg CO<sub>2</sub>äq/ (Person·a). Je weniger Wohnfläche pro Person in Anspruch genommen wird, desto geringer sind auch die Pro-Kopf-Emissionen. Zur Reduktion der Pro-Kopf-Emissionen ist zu empfehlen, Bauweisen und Gebäudetypen zu fördern, die das Zusammenleben vieler Menschen ermöglichen und dabei weniger Ressourcen benötigen.

Neben der Wohn- bzw. Nutzfläche der Gebäudetypen basieren die Ergebnisse in diesem Kapitel auf mittleren Nutzungsdauern der Baustoffe. Bei Erhöhung dieser Nutzungsdauern können der kumulierte Energieaufwand und die fossilen THG-Emissionen signifikant reduziert. Das bedeutet, dass in der Praxis eine möglichst lange Lebensdauer von Bauteilen angestrebt werden sollte. Dies setzt wiederum die ständige Instandsetzung und Sanierung von Gebäuden oder die Weiternutzung von Bauprodukten voraus.

## 5 Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen bei der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden

In diesem Kapitel wird zum einen dargestellt, wie sich der kumulierte Energieaufwand durch energetische Sanierung der Bestandsgebäude reduziert. Dabei werden verschiedene Baualtersklassen, Gebäudetypen und ursprüngliche Sanierungszustände dargestellt. Zum anderen werden der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen verschiedener Sanierungsoptionen nach Bauteilen dargestellt.

Die einzelnen Module des Lebenszyklus werden in diesem Kapitel in die übergeordneten Module A, B, C und D zusammengefasst.

Analog zu Kapitel 4 werden nur die Primärenergie zur Bearbeitung der Baustoffe (PENRE und PERE) und nur der Primärenergieaufwand und die fossilen THG-Emissionen dargestellt.

### 5.1 Einfluss des energetischen Ausgangszustands auf den kumulierten Energieaufwand

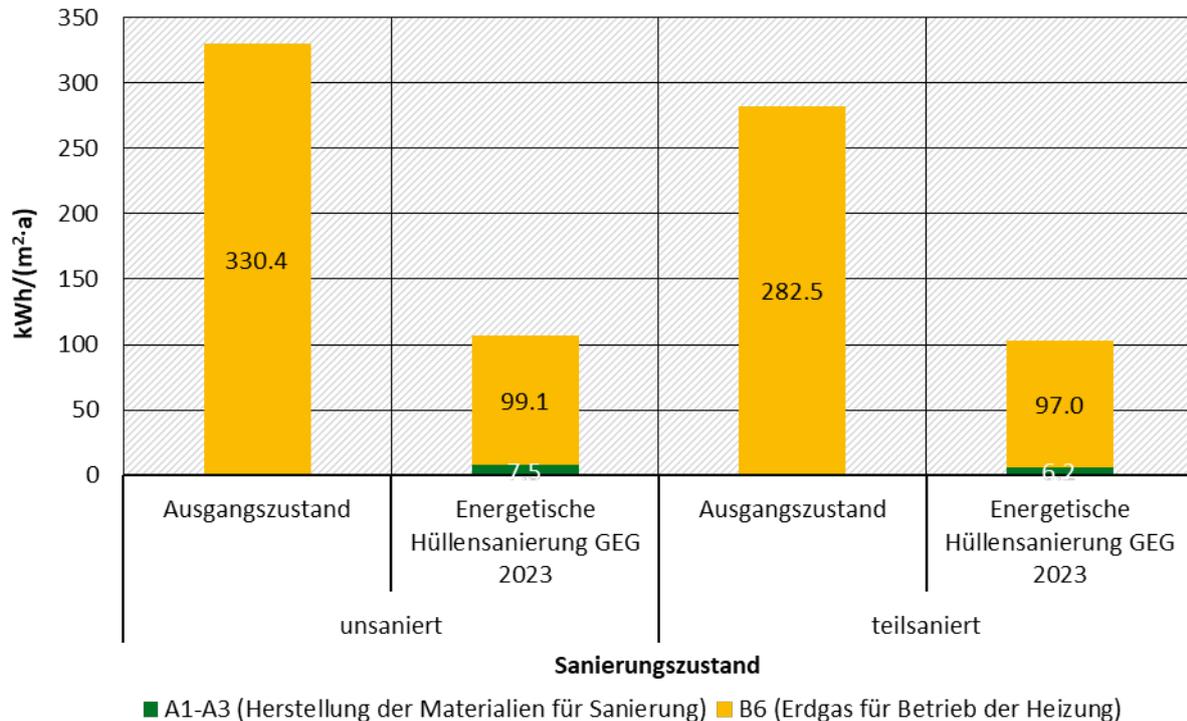
Abbildung 33 zeigt den kumulierten Energieaufwands in der Betriebsphase eines Einfamilienhauses bei Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard und den kumulierten Energieaufwand in der Herstellungsphase der Materialien für die Sanierung. Dargestellt ist ein Einfamilienhaus, welches zwischen 1919 und 1948 erbaut wurde, je in unsaniertem und teilsaniertem Zustand.

Der Primärenergieaufwand in der Nutzungsphase des unsanierten Gebäudes sinkt von 330 kWh/(m<sup>2</sup>·a) auf rund 99 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Der Energieaufwand zur Herstellung der Materialien für die energetische Sanierung beträgt dagegen 7,5 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und entspricht damit nur 3 % des Primärenergieaufwands, welcher durch die Sanierung reduziert wird. Um den GEG-Standard zu erreichen, werden das Dach, die Außenwand und die Bodenplatte bzw. der Keller energetisch saniert. Die Komplettsanierung des Steildaches mit Mineralwolle verursacht 1,4 kWh/(m<sup>2</sup>·a), die Dämmung von Perimeter mit XPS rund 2,4 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und die Dämmung der Außenwand mit EPS im Wärmedämmverbundsystem rund 3,6 kWh/(m<sup>2</sup>·a).

Im teilsanierten Gebäude wurden bereits das Steildach und die Fenster saniert, weshalb der Primärenergieaufwand in der Nutzungsphase im Ausgangszustand rund 283 kWh/(m<sup>2</sup>·a) beträgt. Durch die Sanierung auf GEG-Standard sinkt der kumulierte Energieaufwand auf 97 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Der Energieaufwand zur Herstellung der Materialien für die energetische Sanierung beträgt rund 6,2 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und entspricht damit ebenfalls 3 % des Primärenergieaufwands, welcher durch die Sanierung reduziert wird. Saniert werden analog zum unsanierten Gebäude der Perimeter und die Außenwand.

Da im teilsanierten Gebäude bereits in der Vergangenheit energetische Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden, ist die erzielte Einsparung im Vergleich zum unsanierten Gebäude geringer.

**Abbildung 33: Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] eines unsanierten und teilsanierten Einfamilienhauses im Ausgangszustand und bei energetischer Hüllensanierung**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus

Baujahr: 1919 bis 1948

Energiestandard: Gebäudeenergiegesetz 2023

Sanierungsmaßnahmen: Perimeterdämmung mit XPS, Komplettsanierung des Steildaches mit Mineralwolle, Dämmung der Außenwand mit EPS

## 5.2 Einfluss des erzielten Energiestands auf den kumulierten Energieaufwand

Abbildung 34 zeigt den kumulierten Energieaufwand in der Betriebsphase eines Einfamilienhauses bei Sanierung der Gebäudehülle auf verschiedene Effizienzhaus-Stufen und den kumulierten Energieaufwand in der Herstellungsphase der Materialien für die Sanierung. Zudem sind die benötigten Dämmdicken der Außenwand, des Steildaches und des Perimeters abgebildet. Dargestellt ist das unsanierte Einfamilienhaus aus der Baualtersklasse 1919 bis 1948 aus Abbildung 33.

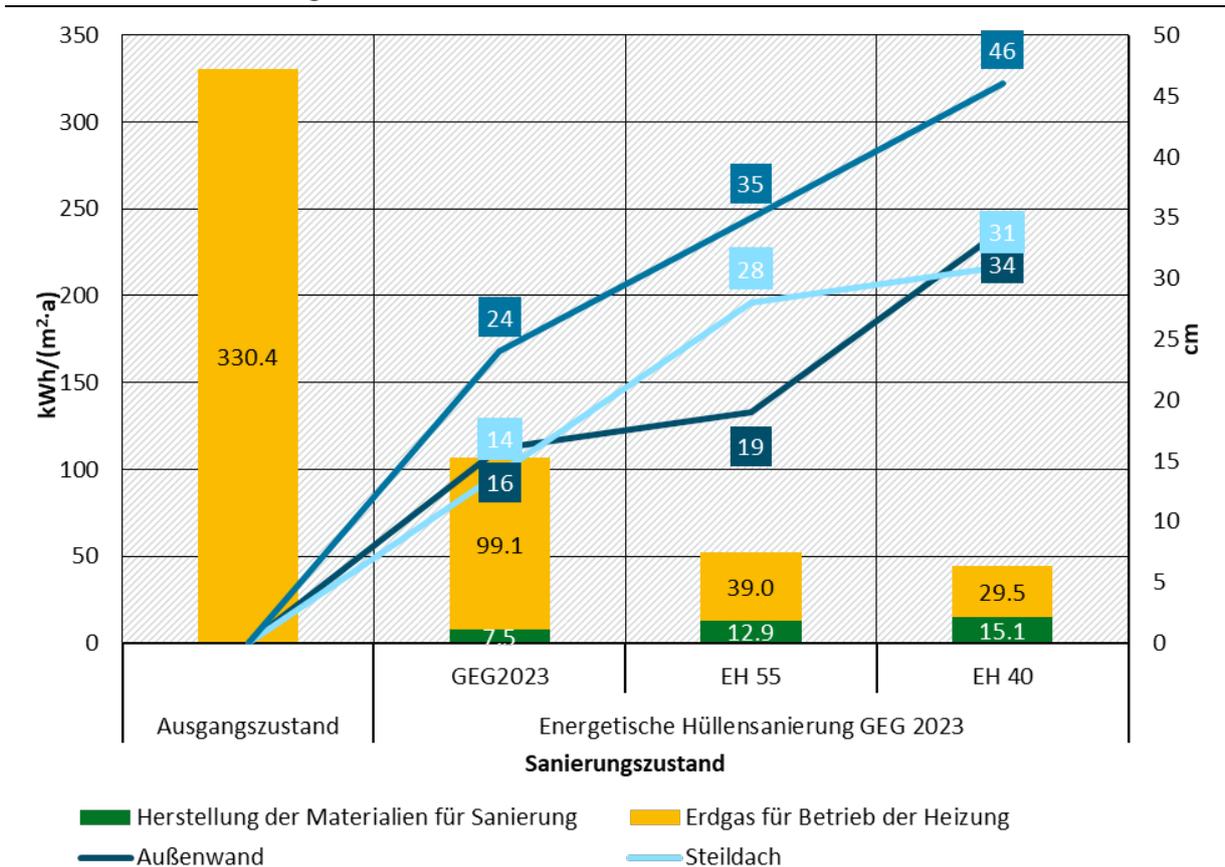
Bei einer Sanierung auf EH 55 reduziert sich der kumulierte Energieaufwand im Betrieb durch die höheren Anforderungen an den Transmissionswärmeverlust auf rund 39 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Dafür steigt allerdings der Energieaufwand zur Herstellung der Materialien. Während bei einer Sanierung auf GEG-Standard der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung der Materialien 7,5 kWh/(m<sup>2</sup>·a) beträgt, sind es bei einer Sanierung auf EH 55 bereits rund 13 kWh/(m<sup>2</sup>·a).

Die Komplettsanierung des Steildaches mit Mineralwolle verursacht rund 2 kWh/(m<sup>2</sup>·a), die Dämmung von Perimeter mit XPS rund 3,2 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und die Dämmung der Außenwand mit EPS im Wärmedämmverbundsystem rund 3,8 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Zusätzlich werden die Fenster getauscht, wofür rund 4 kWh/(m<sup>2</sup>·a) anfallen.

Wird der Energieeffizienzstandard EH 40 erreicht, reduziert sich der kumulierte Energieaufwand im Betrieb auf rund 30 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung der Materialien beträgt rund 15 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Die Komplettsanierung des Steildaches mit Mineralwolle verursacht rund 2 kWh/(m<sup>2</sup>·a), die Dämmung von Perimeter mit XPS rund 4 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und die Dämmung der Außenwand mit EPS im Wärmedämmverbundsystem rund 5 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Zusätzlich werden die Fenster getauscht, wofür rund 4 kWh/(m<sup>2</sup>·a) anfallen.

Unterschiede zwischen den Effizienzhäusern bestehen bei der Dämmdicke der Außenwand und des Steildaches. Während für ein EH 55 etwa 19 cm Dämmstoff (in der Variante WDVS mit EPS) auf die Außenwand aufgebracht werden müssen, sind es für ein EH 40 ca. 34 cm. Zum Vergleich, für den GEG-Standard werden rund 16 cm benötigt. Zur Dämmung des Steildaches werden für ein EH 55 etwa 28 cm Mineralwolle und für ein EH 40 ca. 31 cm benötigt. Für den GEG-Standard sind es ca. 14 cm. Die Varianten der Sanierung sind in Abbildung 12 dargestellt.

**Abbildung 34: Dämmdicke und kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] für verschiedene Energiestandards im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus

Ausgangszustand: Unsanert

Baujahr: 1919 bis 1948

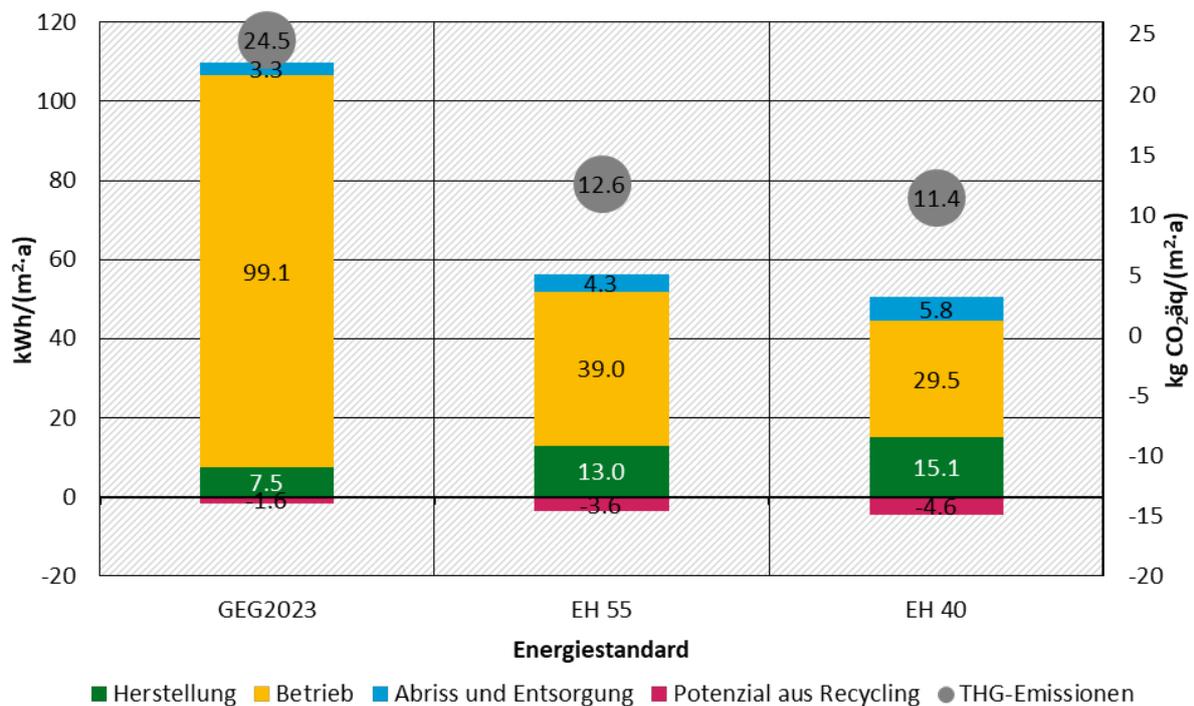
Sanierungsmaßnahmen: Perimeterdämmung mit XPS, Komplettsanierung des Steildachs mit Mineralwolle, Dämmung der Außenwand mit EPS, Fenstertausch bei EH 55 und EH 40

Ergänzend zu Abbildung 34 zeigt Abbildung 35 den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen der sanierten Gebäudehülle des Einfamilienhauses über den gesamten Lebenszyklus. Die Darstellung aus Abbildung 34 wird damit um den Abriss und Entsorgung sowie das Potenzial aus Recycling ergänzt. Zudem sind die (fossilen) THG-Emissionen über den

gesamten Lebenszyklus dargestellt. Analog zu Abbildung 34 sinkt der kumulierte Energieaufwand mit steigender Energieeffizienz des Gebäudes. Allerdings ist festzustellen, dass der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen in den Effizienzhaus-Stufen 40 und 55 im Vergleich zum GEG-Standard deutlich reduziert werden. Der Unterschied zwischen den Effizienzhaus-Stufen 55 und 40 ist allerdings gering, was auf den erhöhten Materialbedarf und den damit verbundenen Energieaufwand im EH-40-Gebäude zurückzuführen ist. Darüber hinaus steigt auch der kumulierte Energieaufwand am Lebensende (Abriss und Entsorgung).

Für ein Einfamilienhaus, saniert nach GEG-Standard resultieren über den gesamten Lebenszyklus 110 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und 25 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a). Für die Effizienzhaus-Stufe 55 ergibt sich ein kumulierter Energieaufwand von 56 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und THG-Emissionen von rund 13 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a). Die Effizienzhaus-Stufe 40 erreicht einen kumulierten Energieaufwand von rund 51 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und THG-Emissionen von 11 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a).

**Abbildung 35: Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen für die energetische Sanierung der Gebäudehülle nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus

Ausgangszustand: Unsanier

Baujahr: 1919 bis 1948

Sanierungsmaßnahmen: Perimeterdämmung mit XPS, Komplettsanierung des Steildachs mit Mineralwolle, Dämmung der Außenwand mit EPS, Fenstertausch bei EH 55 und EH 40

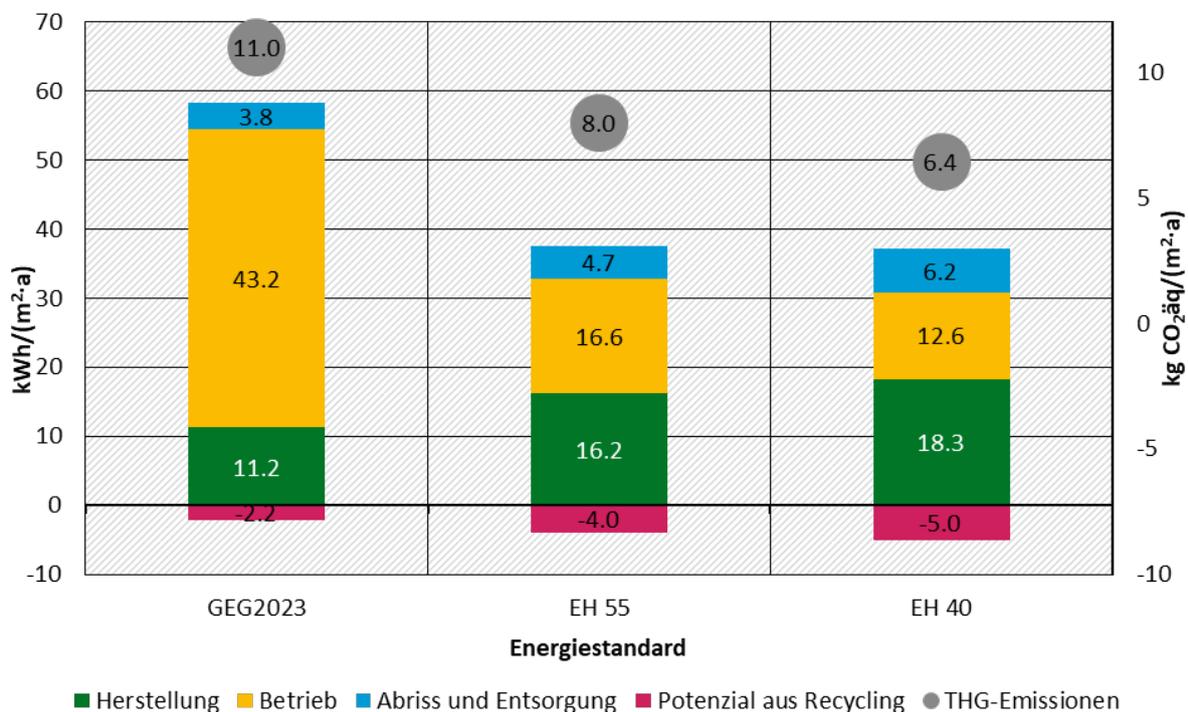
Darüber hinaus zeigt Abbildung 36 den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus mit zusätzlichem Tausch der Wärmeversorgung. Während Abbildung 35 ausschließlich den kumulierten Energieaufwand des Einfamilienhauses bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle abbildet, ist in dieser Abbildung der kumulierte Energieaufwand nach Komplettsanierung des Einfamilienhauses (Gebäudehülle und Wärmepumpe mit neuem Verteilsystem) dargestellt.

Im Vergleich zu Abbildung 35 ist der kumulierte Energieaufwand in allen Energiestandards mit Installation einer Luft-Wasser-Wärmepumpe niedriger als bei ausschließlicher Sanierung der Gebäudehülle. Der Energieaufwand in der Herstellungsphase steigt im GEG-Standard um rund 4 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und in den Effizienzhaus-Stufen um ca. 3 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Der Energieaufwand im Betrieb kann dafür im GEG-Standard um ca. 35 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und in der Effizienzhaus-Stufe 55 um rund 18 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und in der Effizienzhaus-Stufe 40 um rund 14 kWh/(m<sup>2</sup>·a) reduziert werden.

Für ein Einfamilienhaus, saniert nach GEG-Standard und mit Erneuerung der Wärmeversorgung resultieren über den gesamten Lebenszyklus rund 50 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und 10 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a). Für die Effizienzhaus-Stufe 55 ergibt sich ein kumulierter Energieaufwand von rund 34 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und THG-Emissionen von rund 8 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a). Die Effizienzhaus-Stufe 40 erreicht einen kumulierten Energieaufwand von 35 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und THG-Emissionen von 6 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a).

Über den gesamten Lebenszyklus ist der kumulierte Energieaufwand für ein Gebäude mit Effizienzhaus-Stufe 40 durch die Installation der Wärmepumpe und Erneuerung des Verteilsystems damit höher als bei einem Gebäude mit Effizienzhaus-Stufe 55.

**Abbildung 36: Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen für die energetische Sanierung nach Lebenswegmodulen und verschiedenen Energiestandards [mit Tausch des Wärmeversorgungssystem]**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus

Ausgangszustand: Unsaniert

Baujahr: 1919 bis 1948

Sanierungsmaßnahmen: Installation Wärmepumpe, Perimeterdämmung mit XPS, Komplettsanierung des Steildachs mit Mineralwolle, Dämmung der Außenwand mit EPS, Fenstertausch bei EH 55 und EH 40

### 5.3 Einfluss der Baualterklasse auf den kumulierten Energieaufwand

Weiterhin zeigt Abbildung 37 den kumulierten Energieaufwand im Betrieb eines unsanierten Einfamilienhauses mit verschiedenen Baualterklassen und den kumulierten Energieaufwand in

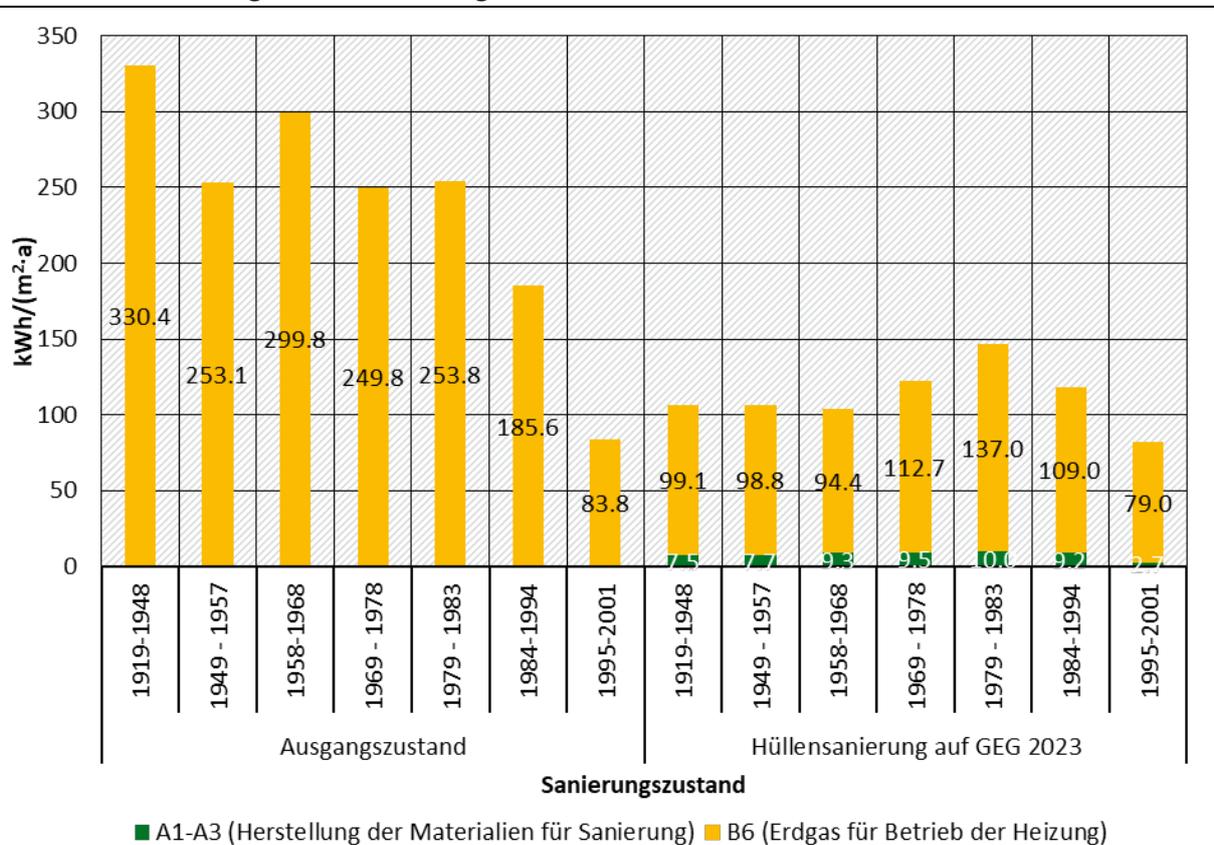
der Herstellungsphase der Materialien für die Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard. Die gewählte Variante pro Bauteil entspricht dabei Abbildung 33.

Bei unsanierten Einfamilienhäusern, erbaut vor 1983, variiert der Primärenergieaufwand im Betrieb nach Gebäudefläche, liegt jedoch immer deutlich über 200 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Eine energetische Sanierung auf GEG-Standard führt deshalb zu einer deutlichen Reduktion des kumulierten Energieaufwands. Der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung der Materialien für die Sanierung ist dabei mit 7 bis 10 kWh/(m<sup>2</sup>·a) vergleichsweise gering. Da die Wohnfläche der Gebäude mit Baualtersklasse 1979 bis 1994 mit rund 87 m<sup>2</sup> (siehe Tabelle 31) geringer ist, ist der kumulierte Energieaufwand höher als bei den anderen Baualtersklassen.

Mit Einführung der WSchVO im Jahr 1977 wurde durch Festlegung maximaler Wärmedurchgangskoeffizienten der Energieverbrauch von Gebäuden erstmals gesetzlich beschränkt (Bundesgesetzblatt 1977). Das Einfamilienhaus erbaut zwischen 1984 bis 1994 hat im Ausgangszustand deshalb einen Primärenergieaufwand von 186 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Durch Sanierung auf GEG-Standard reduziert sich der Primärenergieaufwand um rund 41 % auf 110 kWh/(m<sup>2</sup>·a).

Durch die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen kann der kumulierte Energieaufwand in allen Baualtersklassen reduziert werden. Wegen der höheren energetischen Anforderungen in jüngeren Gebäuden, nimmt die Reduktion in den neueren Gebäuden allerdings ab.

**Abbildung 37: Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] eines Einfamilienhauses in verschiedenen Baualtersklassen im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus

Ausgangszustand: Unsaniert

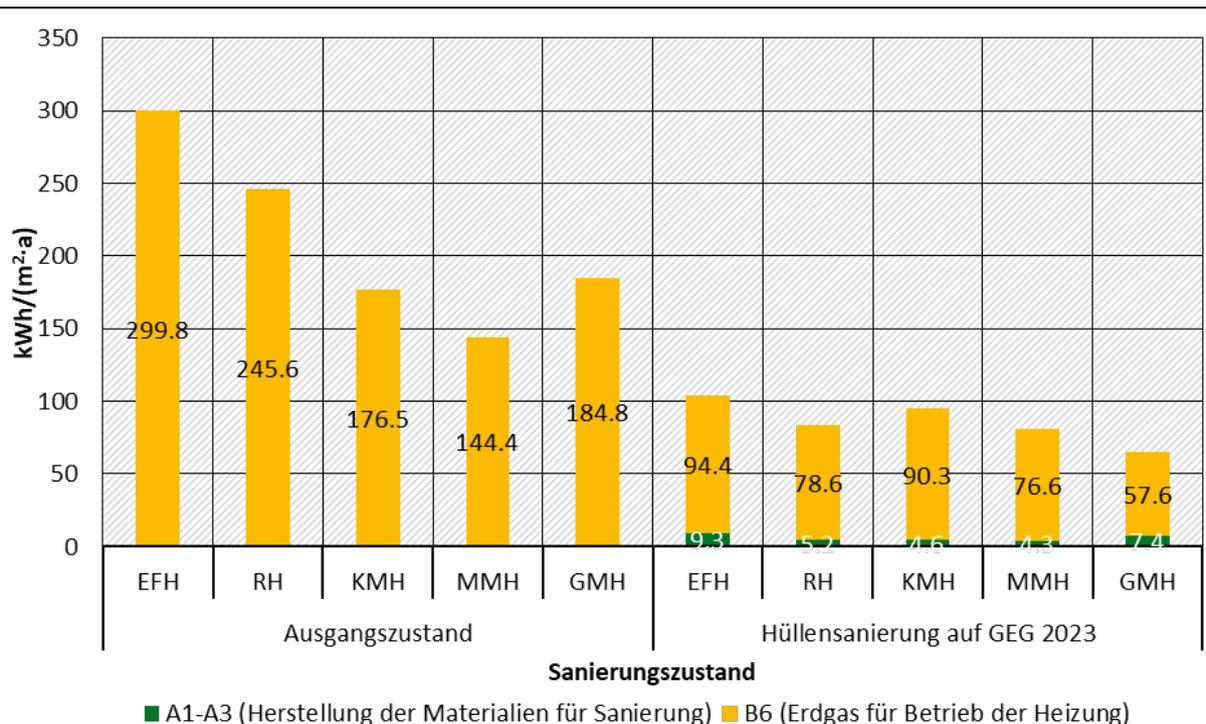
Energiestandard: Gebäudeenergiegesetz 2023

Sanierungsmaßnahmen: Perimeterdämmung mit XPS, Komplettsanierung des Steildachs mit Mineralwolle, Dämmung der Außenwand mit EPS

## 5.4 Einfluss der Gebäudetypen auf den kumulierten Energieaufwand

Abbildung 38 zeigt den kumulierten Energieaufwand im Betrieb verschiedener Wohngebäudetypen und den kumulierten Energieaufwand in der Herstellungsphase der Materialien für die Sanierung auf GEG-Standard. Die Abbildung zeigt unsanierte Referenzgebäude aus der Baualtersklasse 1958 bis 1968.

**Abbildung 38: Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] verschiedener Wohngebäudetypen im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Ausgangszustand: Unsanziert

Energiestandard: Gebäudeenergiegesetz 2023

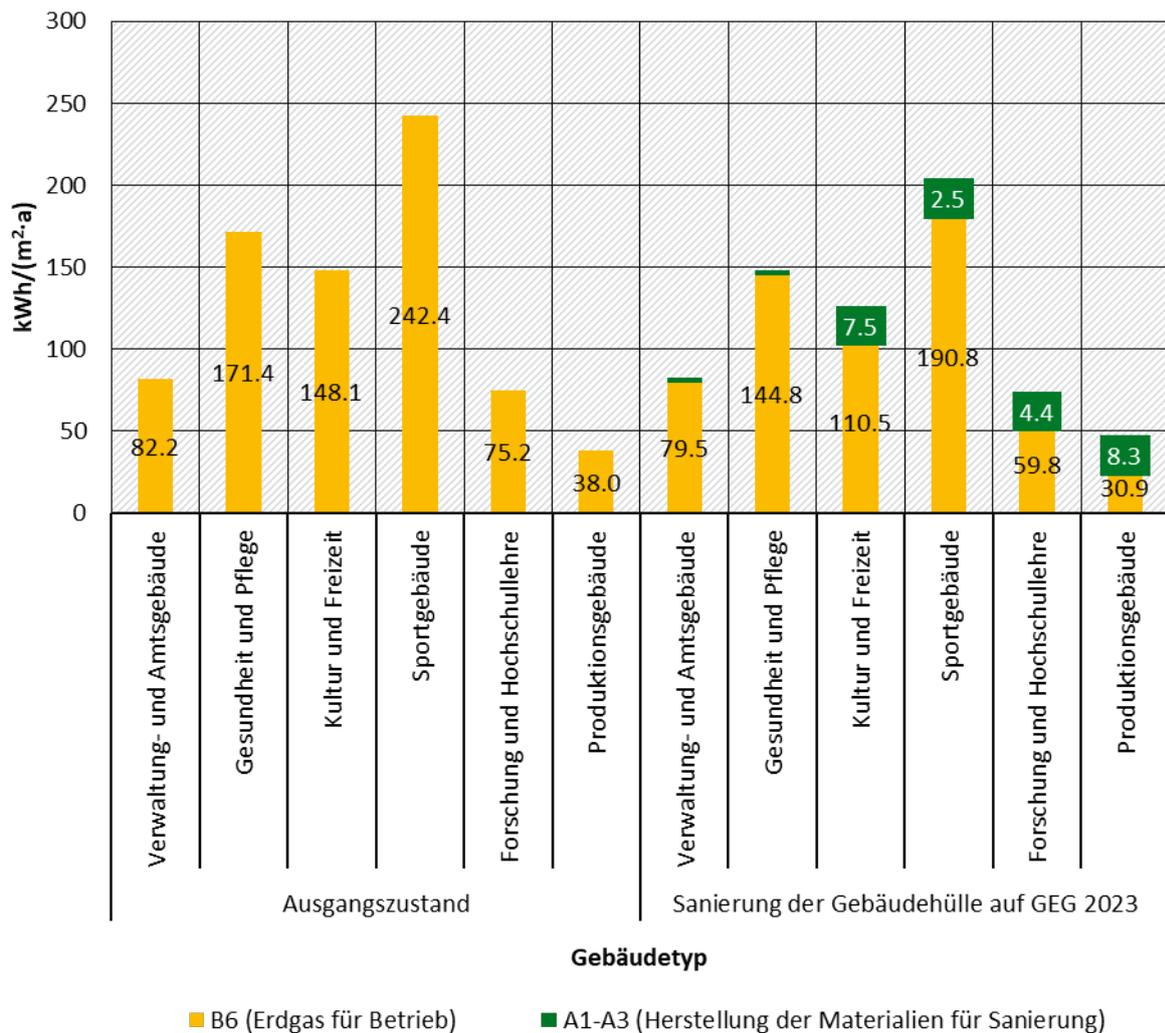
Baualtersklasse: 1958 bis 1968

Analog zur Darstellung in Abbildung 25 sinkt auch bei Bestandsgebäuden mit zunehmender Fläche der Energieaufwand in der Nutzungsphase. Ausgenommen ist das große Mehrfamilienhaus, welches einen höheren Energieaufwand als das kleine und mittlere Mehrfamilienhaus vorweist. Dies ist auf das schlechtere A/V-Verhältnis des Referenzgebäudes zurückzuführen. Bei Sanierung auf GEG-Standard kann der kumulierte Energieaufwand in allen Gebäudetypen deutlich reduziert werden. Das unterschiedliche Niveau in der Herstellung der Materialien ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass unterschiedliche Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Im EFH werden der Keller bzw. der untere Gebäudeabschluss und die Außenwand gedämmt sowie die Fenster getauscht, was zu einem Energieaufwand von 9,3 kWh/(m<sup>2</sup>·a) führt. Durch die Sanierung kann der Energieaufwand im Betrieb dafür um rund 70 % auf 94,4 kWh/(m<sup>2</sup>·a) reduziert werden. Im Reihenhaus sowie im KMH und MMH werden keine Fenster getauscht, dafür aber die obere Geschossdecke gedämmt. Durch die Sanierung kann im Reihenhaus der Energieaufwand im Betrieb ebenfalls um rund

70 % auf 78,6 kWh/(m<sup>2</sup>·a) gesenkt werden. Im KMH und MMH wird eine Reduktion von 50 % auf rund 90 bzw. 76,6 kWh/(m<sup>2</sup>·a) erreicht. Im GMH werden die Außenwand und die oberste Geschosdecke gedämmt sowie die Fenster getauscht, wodurch der Energieaufwand im Betrieb um 70 % auf 57,6 kWh/(m<sup>2</sup>·a) gesenkt wird.

Abbildung 39 zeigt den kumulierten Energieaufwand im Betrieb verschiedener Nichtwohngebäudetypen und den kumulierten Energieaufwand in der Herstellungsphase der Materialien für die Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard. Die Abbildung zeigt unsanierte Referenzgebäude aus der Baualtersklasse 1978 bis 2010.

**Abbildung 39: Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] verschiedener Nichtwohngebäudetypen im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard**



Quelle: Eigene Berechnungen IREE

Ausgangszustand: Unsanziert

Energiestandard: Gebäudeenergiegesetz 2023

Baualtersklasse: 1978 bis 2010

Wie bei den Wohngebäuden sind für die energetische Sanierung unterschiedliche Sanierungsmaßnahmen notwendig. Dabei kann der kumulierte Energieaufwand bei Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nicht in allen Gebäudetypen reduziert werden, weil die Gebäudehülle bereits die Anforderungen des GEG 2023 erreicht. In Abbildung 40 ist deshalb der

kumulierte Energieaufwand im Betrieb verschiedener Nichtwohngebäudetypen und der kumulierte Energieaufwand in der Herstellungsphase der Materialien für die Sanierung der Gebäudehülle auf Effizienzhaus-Stufe 55 abgebildet.

Im Verwaltungs- und Amtsgebäude werden der Keller bzw. der untere Gebäudeabschluss (in der Variante XPS) und die Außenwand (in der Variante EPS mit Mineralwolle) gedämmt, was zu einem Energieaufwand von 2,8 kWh/(m<sup>2</sup>·a) führt. Durch die Sanierung kann der Energieaufwand im Betrieb auf rund 80 kWh/(m<sup>2</sup>·a) gesenkt werden. In Summe erhöht sich aber der kumulierte Energieaufwand durch die Sanierung.

Beim Produktionsgebäude kann der kumulierte Energieaufwand durch die Sanierung auch nicht gesenkt werden. Es werden der Keller bzw. der untere Gebäudeabschluss (in der Variante XPS) und die Außenwand (in der Variante EPS mit Mineralwolle) gedämmt, was zu einem Energieaufwand von rund 8 kWh/(m<sup>2</sup>·a) führt. Durch die Sanierung kann der Energieaufwand im Betrieb aber nur auf rund 31 kWh/(m<sup>2</sup>·a) gesenkt werden. In Summe wird nach der energetischen Sanierung damit ein kumulierter Energieaufwand von rund 39 kWh/(m<sup>2</sup>·a) erreicht.

Im Gebäude für Gesundheit und Pflege kann der Energieaufwand im Betrieb um etwa 15 % von rund 171 auf 145 kWh/(m<sup>2</sup>·a) gesenkt werden. Dafür werden die Fenster getauscht und die Außenwand (in der Variante EPS mit Mineralwolle) gedämmt. In Summe wird nach der energetischen Sanierung ein kumulierter Energieaufwand von rund 150 kWh/(m<sup>2</sup>·a) erreicht.

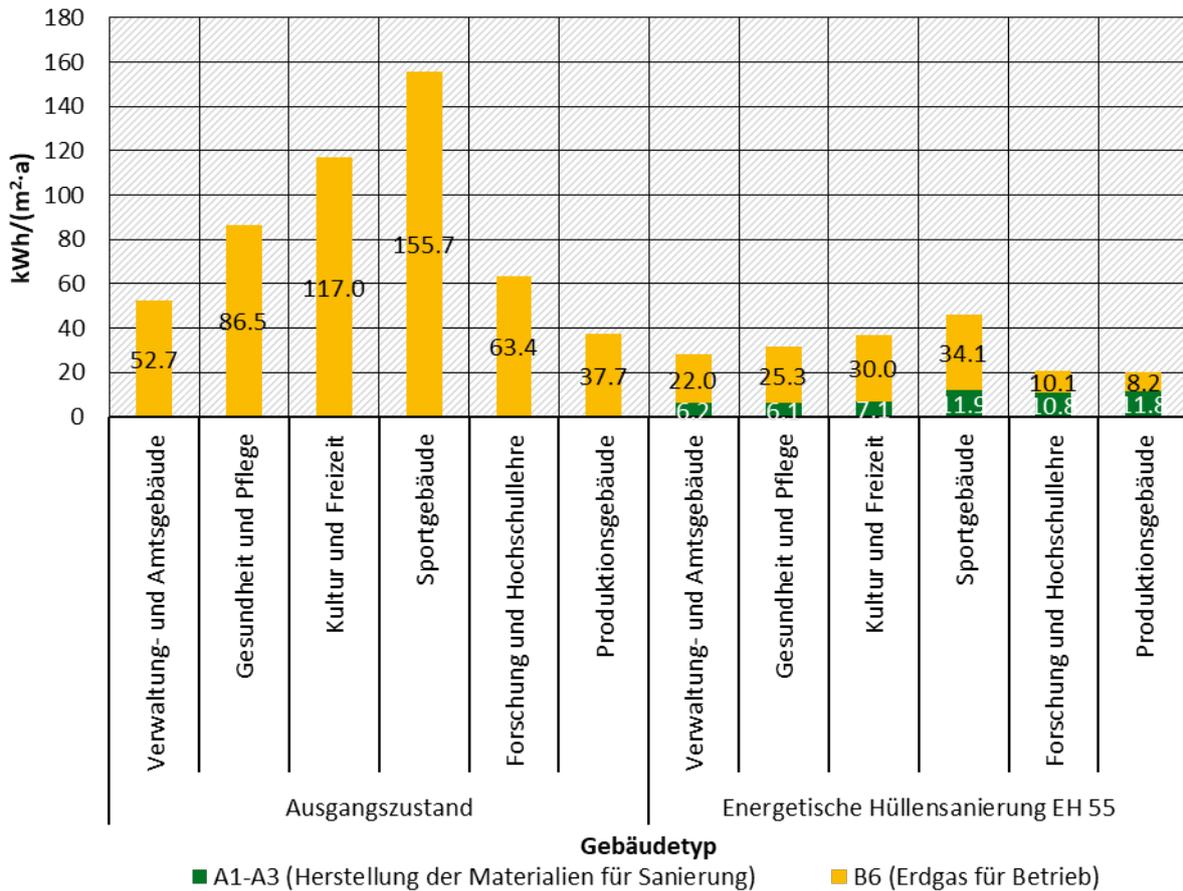
Im Gebäude für Kultur und Freizeit kann der Energieaufwand im Betrieb um etwa 25 % von rund 148 auf 111 kWh/(m<sup>2</sup>·a) gesenkt werden. Dafür werden die Fenster getauscht sowie der Keller bzw. der untere Gebäudeabschluss (in der Variante XPS) und die Außenwand (in der Variante EPS mit Mineralwolle) gedämmt. In Summe wird nach der energetischen Sanierung ein kumulierter Energieaufwand von 118 kWh/(m<sup>2</sup>·a) erreicht.

Im Sportgebäude kann der Energieaufwand im Betrieb um etwa 22 % von rund 156 auf 121 kWh/(m<sup>2</sup>·a) gesenkt werden, wobei ein Fenstertausch ausreichend ist. In Summe wird nach der energetischen Sanierung ein kumulierter Energieaufwand von rund 124 kWh/(m<sup>2</sup>·a) erreicht.

Im Gebäude für Forschung und Hochschullehre kann der Energieaufwand im Betrieb um etwa 22 % von rund 242 auf 191 kWh/(m<sup>2</sup>·a) gesenkt werden. Dafür werden die Fenster getauscht sowie der Keller bzw. der untere Gebäudeabschluss und die Außenwand (in der Variante EPS mit Mineralwolle) gedämmt. In Summe wird nach der energetischen Sanierung ein kumulierter Energieaufwand von ca. 193 kWh/(m<sup>2</sup>·a) erreicht.

Wie oben bereits angemerkt, wird in Abbildung 40 der kumulierte Energieaufwand im Betrieb verschiedener Nichtwohngebäudetypen und der kumulierte Energieaufwand in der Herstellungsphase der Materialien für die Sanierung der Gebäudehülle auf Effizienzhaus-Stufe 55 dargestellt. Im Vergleich zu Abbildung 39 kann der kumulierte Energieaufwand in allen Gebäudetypen im Vergleich zum Ausgangszustand deutlich reduziert werden.

**Abbildung 40: Kumulierter Energieaufwand [Herstellungs- und Betriebsphase] verschiedener Nichtwohngebäudetypen im Ausgangszustand und bei energetischer Sanierung der Gebäudehülle auf Effizienzhaus-Stufe 55**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Ausgangszustand: Unsaniert

Energiestandard: Effizienzhaus 55

## 5.5 Unterschiede bei verschiedenen Sanierungsoptionen

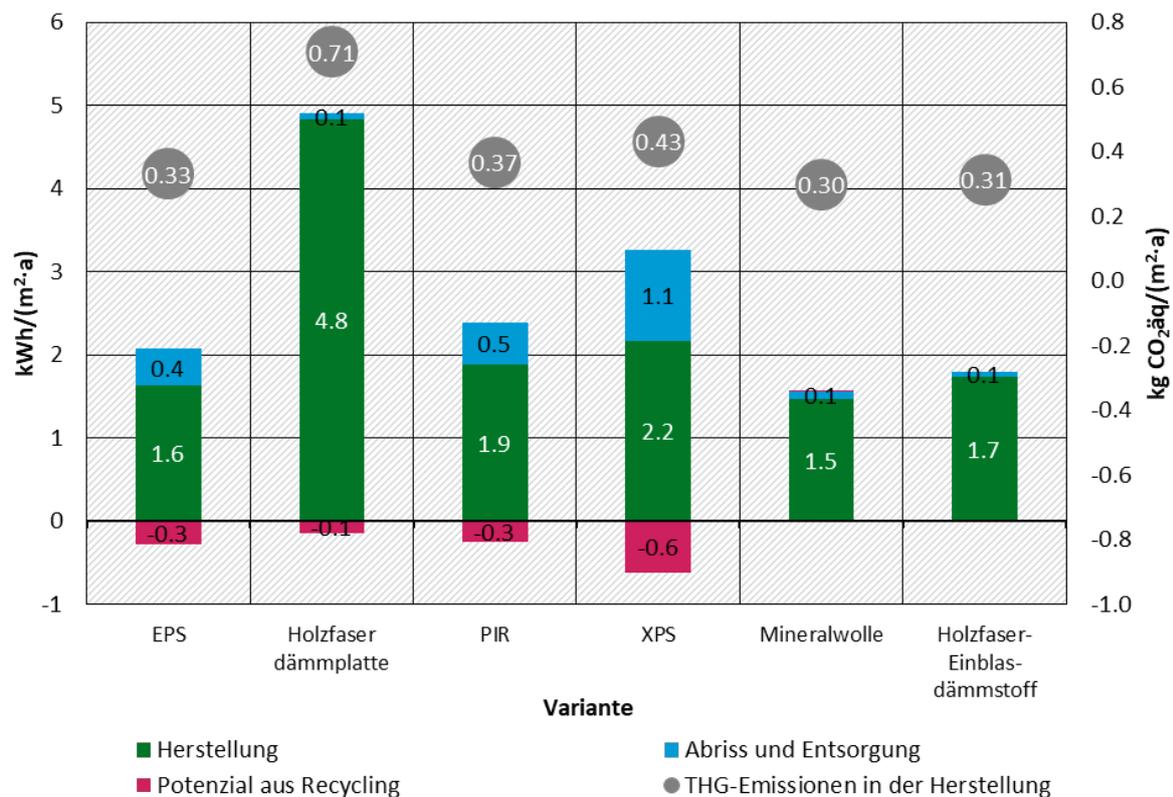
In den vorherigen Kapiteln wird der Fokus auf den Vergleich des kumulierten Energieaufwands hinsichtlich Energiestandard, Baualterklassen und Gebäudetypen gelegt. Dabei wird stets eine Kombination von Sanierungsmaßnahmen betrachtet. Zum besseren Vergleich verschiedener Varianten werden in diesem Kapitel die Sanierungsoptionen nach Bauteilen verglichen.

Abbildung 41 zeigt den kumulierten Energieaufwand für alle Module des Lebenszyklus und die fossilen THG-Emissionen in der Herstellungsphase verschiedener Optionen bei Komplettsanierung eines Steildaches auf GEG-Standard. Die Sanierungsmaßnahme besteht in allen Varianten aus Dachziegeln, einer Dampfbremse, Konstruktionsvollholz und Dämmstoff. Der vollständige Aufbau der Optionen zur Sanierung eines Steildaches ist in Anhang A.6 dargestellt.

Die Variante mit Holzfaserdämmplatten erreicht mit 4,9 kWh/(m<sup>2</sup>·a) den höchsten kumulierten Energieaufwand. Der Primärenergieaufwand in der Herstellung beträgt 4,8 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und in der Herstellung dieser Variante werden mit 0,71 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a) auch die höchsten fossilen THG-Emissionen erzielt. Nach Lebensende ergibt sich durch die thermische Verwertung des Holzes und der Holzfasern ein Potenzial von rund 0,1 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Die Variante mit Holzfasern als Einblasdämmstoff hat mit 1,8 kWh/(m<sup>2</sup>·a) einen deutlich niedrigeren kumulierten

Energieaufwand. Davon resultieren 1,7 kWh in der Herstellungsphase. Die fossilen THG-Emissionen in der Herstellungsphase betragen nur 0,31 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a). Ein Potenzial aus Recycling besteht nicht. Im Abriss und der Entsorgung beider Varianten entsteht ein Energieaufwand von 0,1 kWh, welcher aber nicht auf die Holzfasern, sondern auf die Verwertung der Dampfbremse und der Dachziegel zurückzuführen ist. In der ÖKOBAUDAT ist keine Information zur Entsorgung der Holzfaserdämmplatten und Holzfasern angegeben.

**Abbildung 41: Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen verschiedener Dämmstoffe bei der Komplettanierung eines Steildaches auf GEG-Standard**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus

Sanierungsmaßnahme: Komplettanierung des Steildaches

Baujahr: 1919 bis 1948

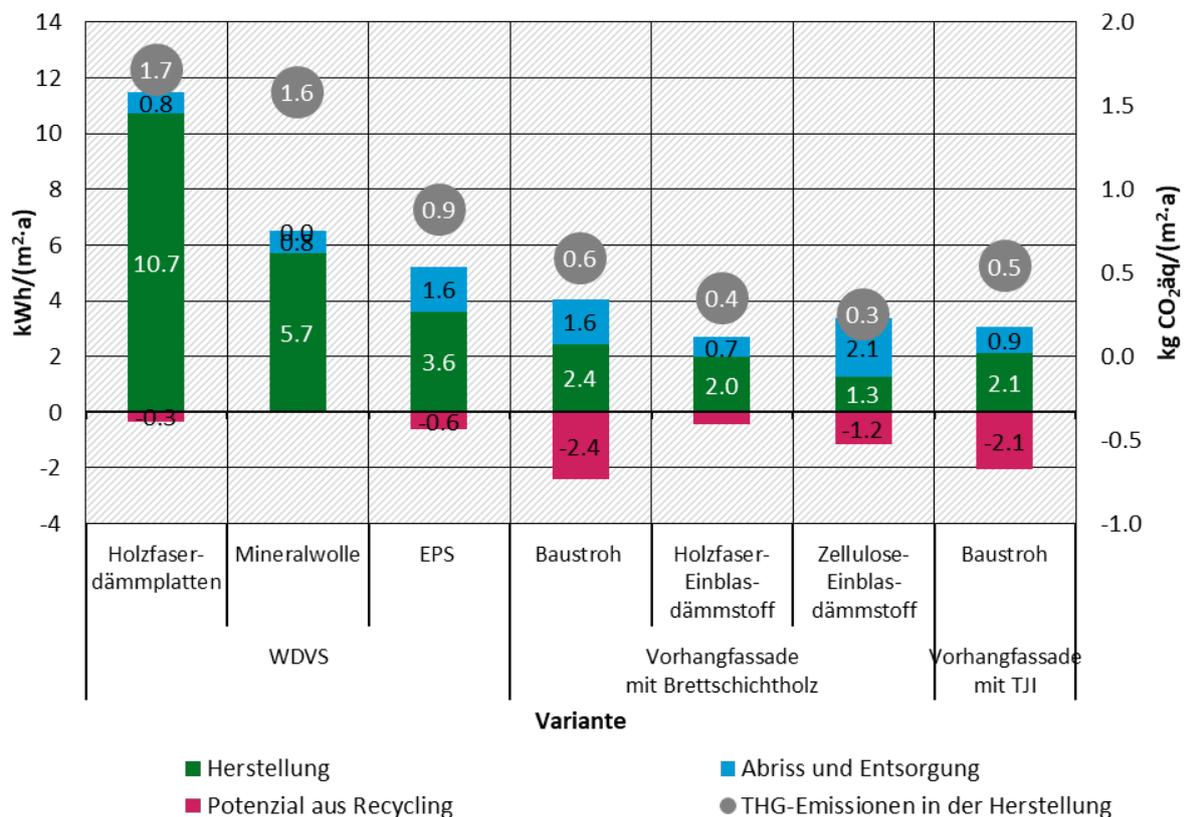
Die Variante mit Mineralwolle hat mit rund 1,6 kWh/(m<sup>2</sup>·a) den geringsten kumulierten Energieaufwand und mit 0,3 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a) die geringsten THG-Emissionen. Mineralwolle hat einen sehr geringen kumulierten Energieaufwand im Abriss und der Entsorgung der Baustoffe, da in der ÖKOBAUDAT ein manueller Rückbau und die Deponierung angenommen wird. Deshalb gibt es auch kein Reduktionspotenzial aus Recycling. Vogdt *et al.* (2019) stellen jedoch dar, dass Mineralwolle-Abfälle auch eingeschmolzen werden können und der dadurch entstehende sekundäre Rohstoff als zusätzlicher Stoff im Bauwesen verwendet werden kann. Nicht recycelte Wolle kann außerdem verwendet werden, um Ziegelscherben zu porosieren. Generell kann Mineralwolle durch Mahlung recycelt werden, wie es zum Beispiel das deutsche Rockwool Unternehmen handhabt.

Die Variante mit EPS erzielt einen kumulierten Energieaufwand von rund 2 kWh/(m<sup>2</sup>·a), davon 1,6 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Herstellung. Die fossilen THG-Emissionen in der Herstellung betragen 0,33 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a). Die Variante mit XPS hat einen kumulierten Energieaufwand von 3,3 kWh/(m<sup>2</sup>·a), wovon 2,2 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Herstellungsphase resultieren. Die Variante mit PIR

erzielt einen kumulierten Energieaufwand von 2,4 kWh/(m<sup>2</sup>·a), wovon 1,9 kWh/(m<sup>2</sup>·a) in der Herstellungsphase resultieren. Im Vergleich mit Mineralwolle und Holzfasern haben die Varianten mit den synthetischen Materialien einen hohen kumulierten Energieaufwand im Abriss und der Entsorgung. Für XPS, EPS und PIR wird in der ÖKOBAUDAT am Lebensende eine thermische Verwertung angenommen, dadurch resultiert ein vergleichsweise hoher Energieaufwand in Abriss und Entsorgung. Durch die Verbrennung wird gleichzeitig Strom und Erdgas substituiert, weshalb gleichzeitig ein hohes Potenzial aus Recycling resultiert.

Abbildung 42 zeigt analog den kumulierten Energieaufwand für alle Module des Lebenszyklus und die fossilen THG-Emissionen in der Herstellungsphase verschiedener Optionen bei Sanierung der Außenwand auf GEG-Standard. Die Varianten werden unterschieden in Wärmedämmverbundsystem sowie Vorhangfassade mit Brettschichtholz oder TJI. Im Vergleich mit den Varianten mit Vorhangfassaden ist der Primärenergieaufwand in allen Varianten mit Wärmedämmverbundsystem höher. Dies ist zum einen auf den höheren kumulierten Energieaufwand zur Herstellung von Dämmmatten- bzw. Platten zurückzuführen, aber auch auf die zusätzlichen Materialien im WDVS, wie Armierung und Kunstharzputz.

**Abbildung 42: Kumulierter Energieaufwand und fossile Treibhausgasemissionen verschiedener Dämmstoffe bei der Sanierung einer Außenwand auf GEG-Standard**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES  
 Gebäudetyp: Einfamilienhaus  
 Sanierungsmaßnahme: Dämmung der Außenwand  
 Baujahr: 1919 bis 1948

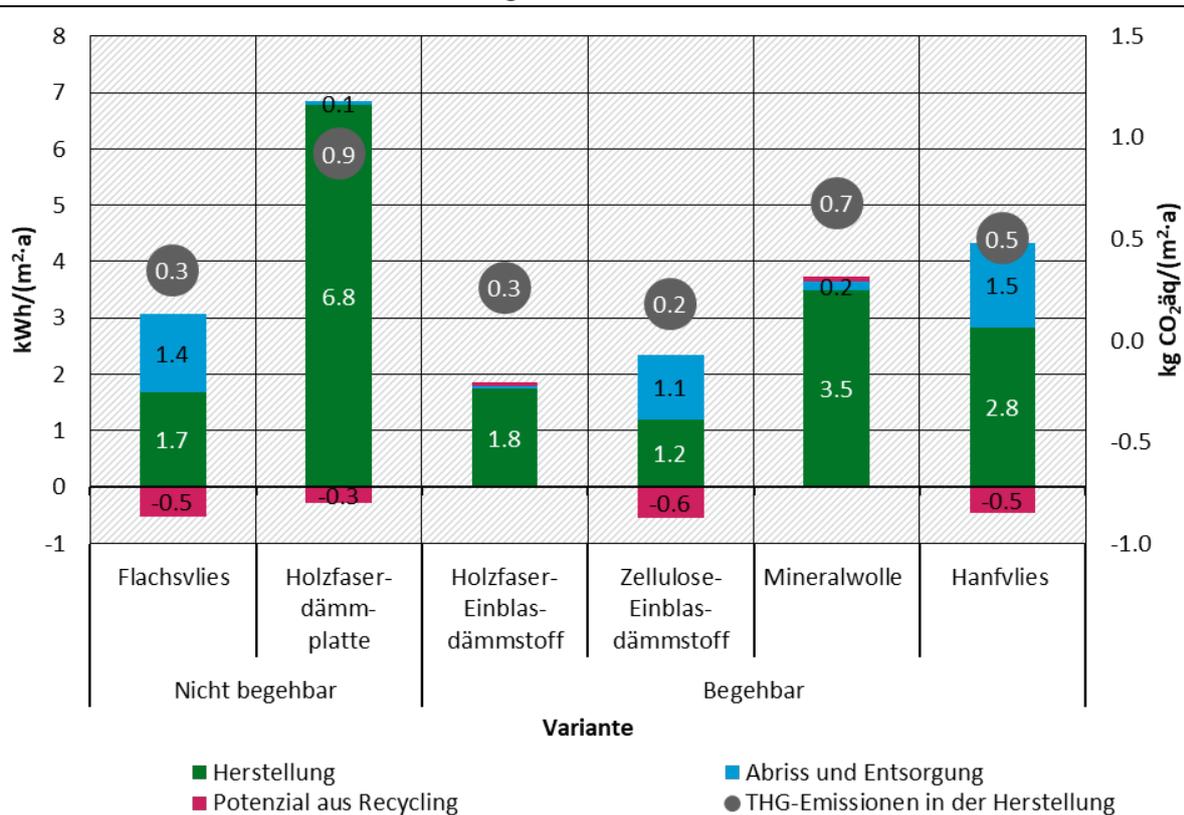
Analog zu Abbildung 41 erzielt die Variante mit Holzfaserdämmplatten mit 11,5 kWh/(m<sup>2</sup>·a) den höchsten kumulierten Energieaufwand und mit 1,7 kg CO<sub>2</sub>äq/(m<sup>2</sup>·a) auch die höchsten THG-Emissionen in der Herstellungsphase. Die Variante mit Holzfasereinblasdämmstoff hat mit 2,7 kWh/(m<sup>2</sup>·a) den niedrigsten kumulierten Energieaufwand. Bei alleiniger Betrachtung der

Herstellungsphase ist die Variante mit Zellulosefaser-Einblasdämmstoff die Variante mit dem niedrigsten Primärenergieaufwand. Für diese Variante resultieren auch die geringsten fossilen THG-Emissionen in der Herstellungsphase. Zellulosefasern werden am Lebensende allerdings thermisch behandelt, was zu einem hohen kumulierten Energieaufwand in der Abriss- und Entsorgungsphase führt.

Das höchste Recyclingpotenzial ist in den Varianten mit Baustroh zu finden, was auf die thermische Verwertung und die damit verbundene Substitution von Strom und Erdgas zurückzuführen ist.

Abbildung 43 zeigt zudem den kumulierten Energieaufwand für alle Module des Lebenszyklus und die fossilen THG-Emissionen in der Herstellungsphase verschiedener Optionen bei Sanierung der Geschossdecke auf GEG-Standard. Referenzgebäude ist ein unsaniertes Reihenhaus, erbaut zwischen 1919 und 1948.

**Abbildung 43: Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen verschiedener Dämmstoffe bei Sanierung der obersten Geschossdecke auf GEG-Standard**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Reihenhaus

Sanierungsmaßnahme: Dämmung der obersten Geschossdecke

Baujahr: 1919 bis 1948

Die Varianten werden unterschieden in begehbar und nicht begehbar. Analog zur Außenwand erzielt die Variante mit Holzfaserdämmplatten den höchsten kumulierten Energieaufwand. Die Variante mit Holzfaser-Einblasdämmstoff hat den niedrigsten kumulierten Energieaufwand. Bei alleiniger Betrachtung der Herstellungsphase ist die Variante mit Zellulosefaser-Einblasdämmstoff die Variante mit dem niedrigsten Primärenergieaufwand.

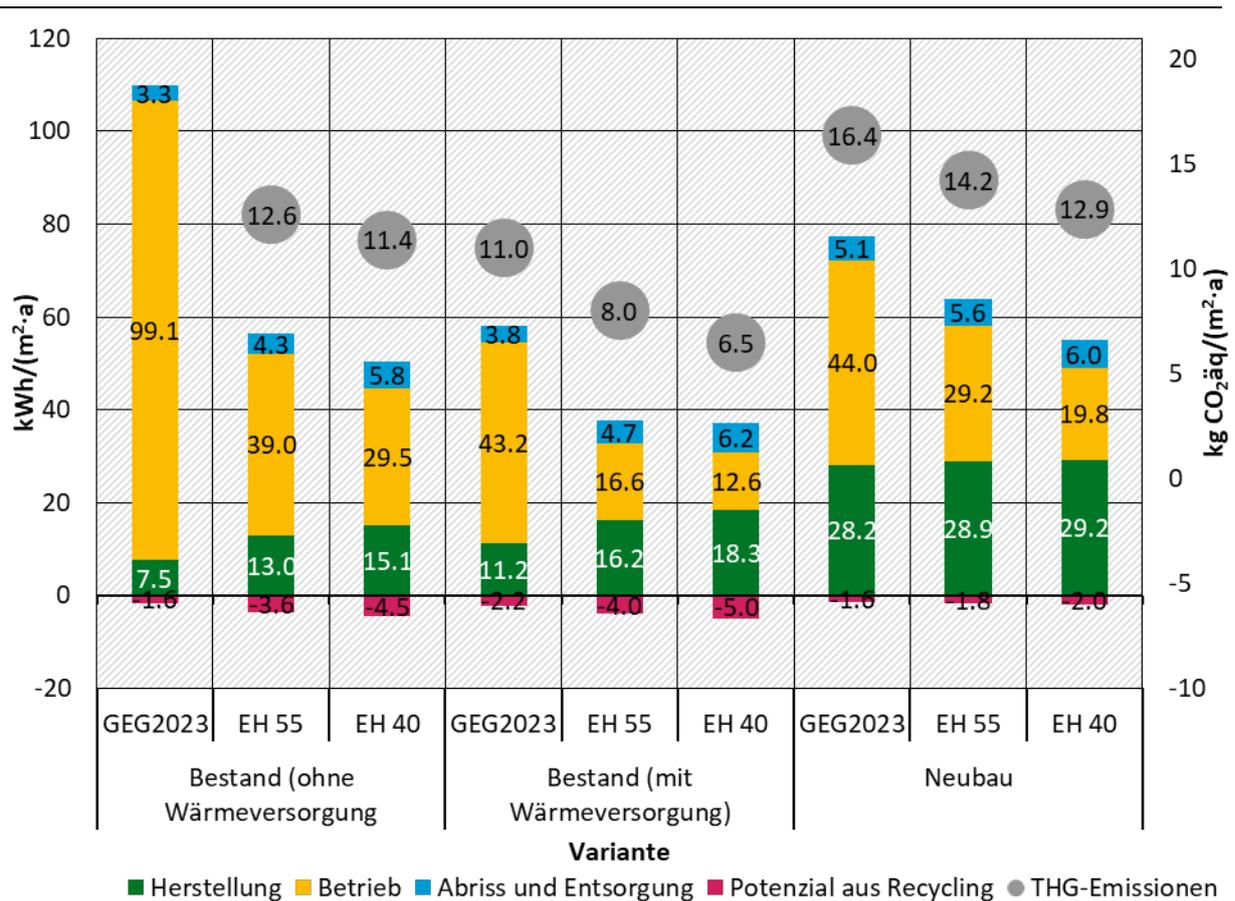
Neben Holzfasern und Zellulose sind Hanf- und Flachsvliese weitere Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, die zur Dämmung der obersten Geschossdecke eingesetzt werden

können. Im Vergleich zu Holzfaserdämmplatten und Mineralwolle haben beide einen niedrigeren kumulierten Energieaufwand und niedrigere fossile THG-Emissionen in der Herstellung. Im Vergleich zu Mineralwolle werden Hanf- und Flachsvliese allerdings thermisch behandelt, was zu einem hohen kumulierten Energieaufwand in der Abriss- und Entsorgungsphase führt.

## 5.6 Neubau und Bestandsgebäude im Vergleich

Abschließend vergleicht Abbildung 44 den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen für einen Neubau und ein Bestandsgebäude. Dargestellt ist das neu errichtete Einfamilienhaus aus Abbildung 13 und das sanierte Einfamilienhaus aus Abbildung 35 (nur Gebäudehülle) und Abbildung 36 (mit Wärmepumpe).

**Abbildung 44: Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen von Neubau und Bestand**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Es wird deutlich, dass die energetische Sanierung der Gebäudehülle auf GEG-Standard zwar zu einer Reduktion des kumulierten Energieaufwands im Vergleich zur Ausgangssituation (siehe Abbildung 35) führt, jedoch immer noch einen höheren kumulierten Energieaufwand als ein vergleichbarer Neubau hat. Bei Sanierung der Gebäudehülle auf Effizienzhaus-Stufe 55 oder 40 kann der kumulierte Energieaufwand aber im Vergleich zu einem Neubau reduziert werden, wobei die Differenz zu den vergleichbaren Neubauvarianten nur unwesentlich ist.

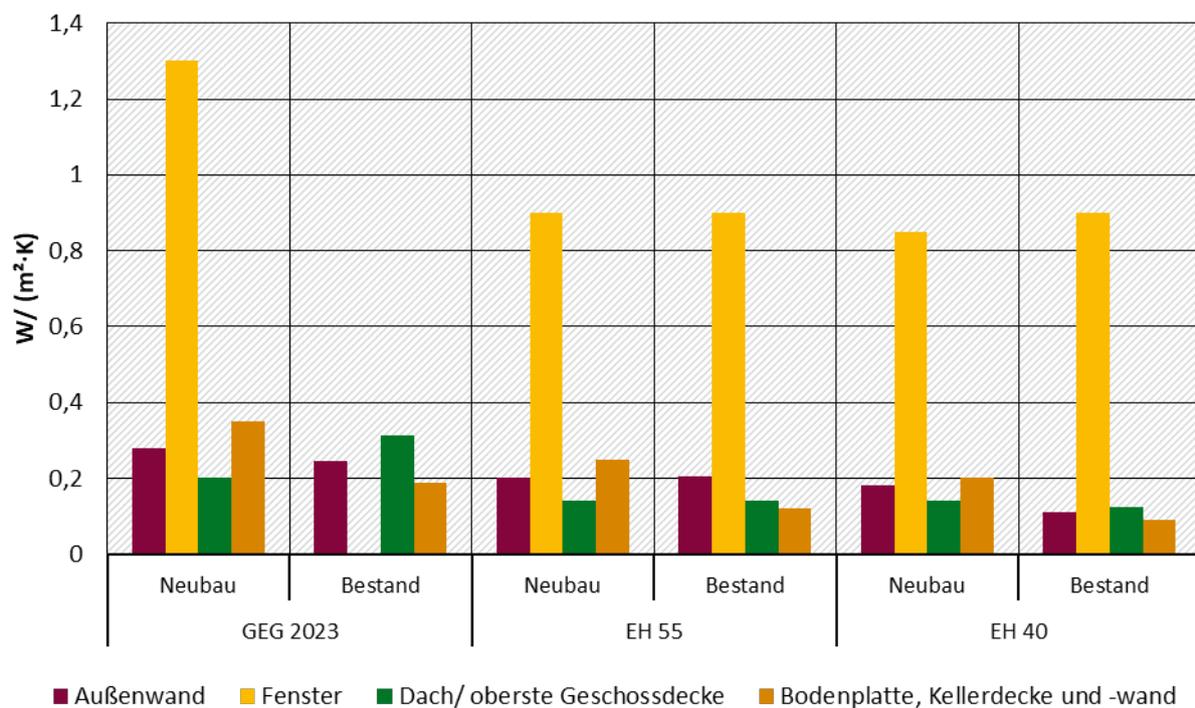
Erst wenn im Bestandsgebäude zusätzlich eine Wärmepumpe installiert wird, ist der kumulierte Energieaufwand in allen Energiestandards deutlich geringer als der kumulierte Energieaufwand für einen vergleichbaren Neubau.

Bei Vergleich der beiden Gebäude ist zu beachten, dass es aufgrund der unterschiedlichen Gebäudetypologien und Annahmen zu Abweichungen bei den berechneten Flächen kommt. Würde der kumulierte Energieaufwand in der Nutzungsphase auf die Nutzfläche nach GEG (und nicht auf die Wohnfläche) bezogen werden, würden für den Neubau rund 35 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und für das Bestandsgebäude rund 52 kWh/(m<sup>2</sup>·a) resultieren. Damit hat die Sanierung des Bestandsgebäudes auf GEG-Niveau (inklusive Wärmepumpe) im Vergleich mit einem Neubau die gleichen Klimaauswirkungen. Die Sanierungen auf die Effizienzhaus-Stufen 55 und 40 sind jedoch weiterhin mit geringeren Klimaauswirkungen als ein entsprechender Neubau verbunden.

Weiterhin ist zu beachten, dass Invert/ee-Lab für die Sanierung eine Optimierung der Kosten durchführt und die erzielten U-Werte bei Sanierungen somit niedriger als in den entsprechenden Neubauten sind. Ein Vergleich der U-Werte ist deshalb in Abbildung 45 dargestellt. Es wird deutlich, dass die U-Werte bei der Bestandssanierung meist niedriger sind als im Neubau.

In der Bestandssanierung auf GEG-Standard werden keine Fenster getauscht, weshalb hier keine Angabe zum U-Wert gemacht werden kann.

**Abbildung 45: Resultierende U-Werte nach Bauteilen für Neubau und Bestand**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

## 5.7 Zwischenfazit

Dieses Kapitel zeigt den kumulierten Energieaufwand und die (fossilen) THG-Emissionen von verschiedenen Varianten der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden. Die Darstellungen zeigen den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen nach verschiedenen Energiestandards, energetischen Ausgangszuständen der Gebäude,

Baualtersklassen und Gebäudetypen. Weiterhin werden der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen verschiedener Sanierungsoptionen nach Bauteilen dargestellt.

Es wird deutlich, dass durch die energetische Sanierung der Energieaufwand in der Betriebsphase in allen Gebäudetypen und Baualtersklassen gesenkt werden kann. Die Reduktion ist abhängig vom erzielten Energiestandard. Insbesondere bei älteren Gebäuden kann auch bei Sanierung (der Gebäudehülle) auf GEG-Standard der kumulierte Energieaufwand deutlich reduziert werden. Nochmals deutlich reduziert wird der Energieaufwand bei Sanierung auf die beiden Effizienzhaus-Niveaus. Allerdings sind in der Analyse geringe Unterschiede zwischen den Effizienzhaus-Stufen 55 und 40 zu beobachten. Insbesondere bei Nichtwohngebäuden ist zur Verbesserung der energetischen Qualität eine Sanierung auf einen Standard über den gesetzlichen Anforderungen notwendig.

Der kumulierte Energieaufwand über den gesamten Lebenszyklus wird darüber hinaus vom erzielten Energiestandard, den durchgeführten Sanierungsmaßnahmen und eingesetzten Materialien bestimmt.

Die Ergebnisse in Kapitel 5.5 zeigen, dass es Unterschiede zwischen den Dämmstoffen bzw. Varianten innerhalb einer Sanierungsmaßnahme gibt. Die Höhe des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen ist allerdings nicht von der Kategorisierung der Dämmstoffe (mineralisch, synthetisch und nachwachsend), sondern vom individuellen Herstellungsprozess abhängig. Insbesondere Holzfaserdämmplatten sind in der Herstellungsphase mit einem hohen Energieaufwand und THG-Emissionen verbunden. Einblasdämmstoffe wie Zellulose und Holzfaser weisen dagegen einen niedrigen Energieaufwand und THG-Emissionen auf.

Bei Vergleich der Materialien ist nicht nur die Herstellungs-, sondern auch die Entsorgungsphase entscheidend. Die Materialien sind jeweils mit einem unterschiedlichen Entsorgungsprozess und damit auch Energieaufwand verbunden. Ob Materialien verbrannt oder deponiert werden, entscheidet über die Höhe des Energieaufwands. Es ist deshalb darauf hinzuweisen, dass die Nutzungsdauer und die zukünftige Entsorgung in hohem Maße unsicher sind.

Der Vergleich zwischen Sanierung und Neubau zeigt, dass der Energieaufwand zur Herstellung der Sanierungskomponenten durchweg geringer ist als derjenige zur Herstellung der Materialien im Neubau. Über den gesamten Lebenszyklus ist die Erneuerung des Bestandsgebäudes, inklusive neuer Wärmeversorgung mit einem geringeren Energieaufwand als Neubau verbunden. Ausschließlich die Sanierung auf GEG-Standard, ohne Installation einer Wärmepumpe, führt zu einem höheren kumulierten Energieaufwand als ein Neubau.

## 6 Kosten für Neubau und die energetische Sanierung

In diesem Kapitel werden für ausgewählte Varianten im Neubau und der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden die Lebenszykluskosten, unterschieden nach Bauweisen und Energiestandards, dargestellt. Eine finanzielle Förderung ist dabei nicht berücksichtigt.

### 6.1 Lebenszykluskosten für ausgewählte Varianten im Neubau

Abbildung 46 zeigt die Lebenszykluskosten nach Energiestandards für ein Einfamilienhaus in der Variante „Massivbauweise mit Kalksandstein und WDVS mit EPS“. Die gesamten Kosten umfassen jährlich annuisierte Investitionskosten für die Baukonstruktion und TGA sowie Kosten für den Energiebezug und Wartung der technischen Gebäudeausrüstung. Die Werte werden aufsummiert. Dabei wird für die Baukonstruktion eine Nutzungsdauer von 30 Jahren und für die TGA eine Nutzungsdauer von 20 Jahren angenommen. Weiterhin wird für die Berechnungen ein Zinssatz von 3 % unterstellt. Es ist zu berücksichtigen, dass kein Austausch von Bauteilen berücksichtigt wird.

Die Berechnung der Investitionskosten für Baukonstruktion und TGA erfolgt mit dem Baupreislexikon. Dafür werden die zuvor dargestellten Bauprodukten bzw. Materialien aus der ÖKOBAUDAT (Außenwand, Fenster, Bodenplatte, Wärmepumpe usw.) mit entsprechen Kosten verrechnet. Die Kosten im Baupreislexikon umfassen Material, Arbeit und Geräte.

Die Abbildung zeigt, dass die gesamten Kosten mit steigenden Effizienzanforderungen sinken. Dies ist auf den deutlichen Rückgang der Kosten für Energiebezug zurückzuführen, der mit höheren Energieeffizienz einhergeht. Die Investitionskosten (CAPEX<sup>15</sup>) steigen zwar für die Effizienzhaus-Stufen 55 und 40 sowie das Passivhaus, der Rückgang bei den Kosten für Energiebezug ist allerdings deutlich größer. Die Wartungskosten steigen ebenfalls mit höheren Effizienzanforderungen, da sie pauschal auf die TGA angerechnet werden.

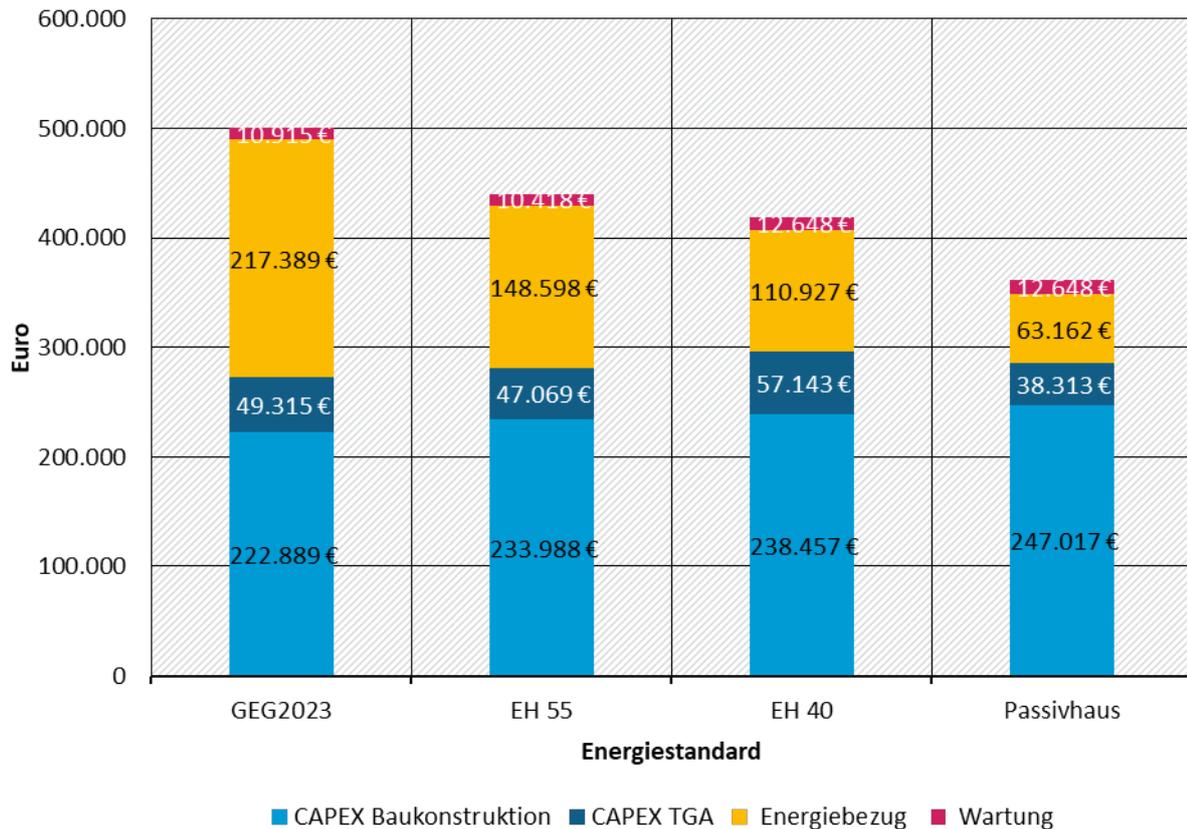
Für eine Zeitraum von 20 bzw. 30 Jahren betragen die Kosten für ein neugebautes Einfamilienhaus nach GEG-Standard rund 500.000 €, für ein Gebäude mit Effizienzhaus-Stufe 55 rund 442.000 € und für ein Gebäude mit Effizienzhaus-Stufe 40 rund 419.000 €. Die Kosten für ein Passivhaus summieren sich in diesem Zeitraum nur auf rund 361.000 €.

Die verschiedenen Effizienzstandards unterscheiden sich bei den eingebauten Fenstern, der Dämmdicke von hüllrelevanten Bauteilen und der TGA. Die Wärmepumpe orientiert sich an der Heizlast der Gebäude, die mit steigendem Energiestandard sinkt. Mit steigenden Effizienzanforderungen reduziert sich somit die Größe und damit auch die Kosten der Wärmepumpe. Im Passivhaus wird darüber hinaus keine Fußbodenheizung benötigt, da eine Luft-Luft-Wärmepumpe zum Einsatz kommt. Weitere Unterschiede bestehen bei der Lüftungsanlage. Im GEG-Standard und Effizienzhaus 55 kommt eine dezentrale Lüftungsanlage zum Einsatz, in der Effizienzhaus-Stufe 40 und im Passivhaus eine zentrale Lüftungsanlage mit WRG.

Bei der Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass die verwendete Datenbasis (Baupreislexikon, siehe 2.5) nur geringe Mehrkosten für eine höhere Dämmdicke veranschlagt. Der Austausch von Bauteilen würde die Kosten bei der Effizienzhaus-Stufe 40 und dem Passivhaus – durch Erneuerung der Gebäudetechnik - erhöhen. Aufgrund der gewählten Methodik (siehe Kapitel 2.3) wird allerdings kein Austausch von Bauteilen angenommen. Zudem ist zu beachten, dass der Analyse der Energiebedarf und nicht Energieverbrauch zugrunde liegt. Für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung sind reale Energieverbräuche zu verwenden.

<sup>15</sup> CAPEX steht für Capital Expenditures und umfasst die Summe der annuisierten Investitionskosten

**Abbildung 46: Gesamtkosten verschiedener Energiestandards im Neubau von einem Einfamilienhaus in Massivbauweise**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

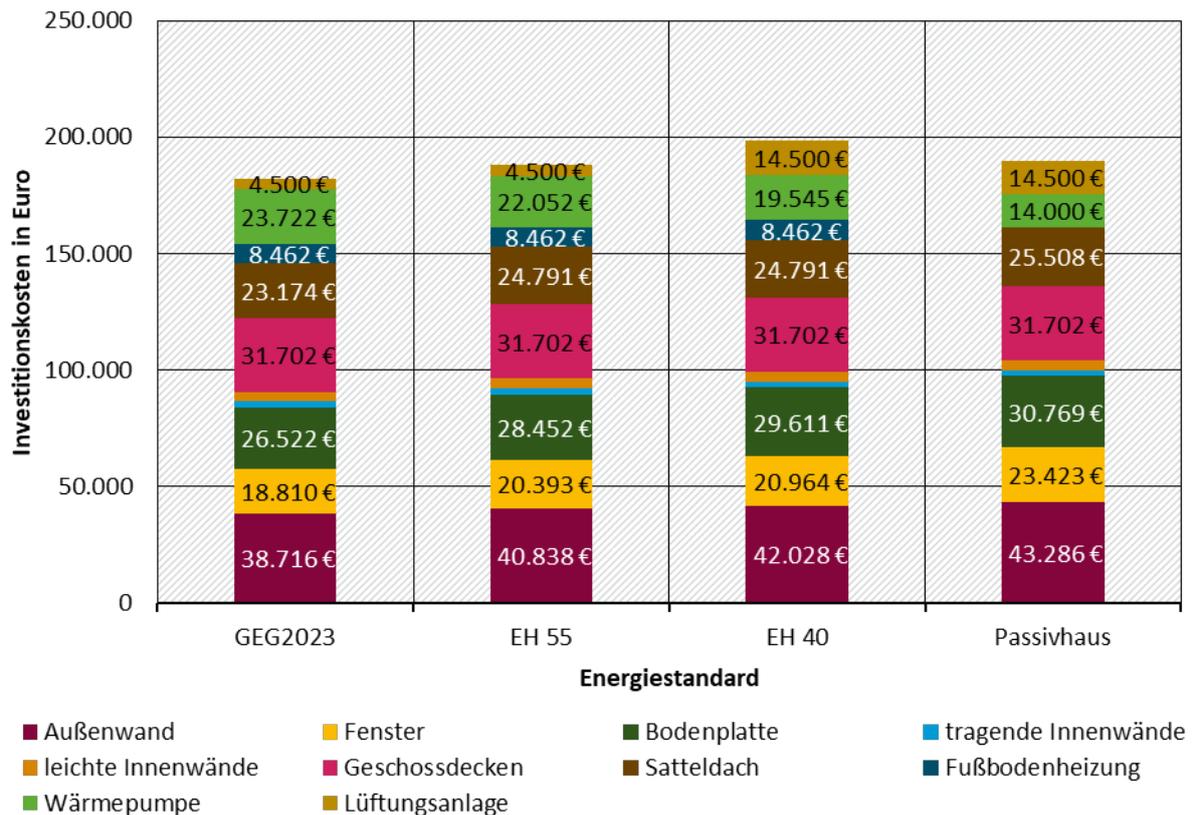
Bauweise: Massivbau mit Kalksandstein und Wärmedämmverbundsystem mit EPS

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Für eine detaillierte Betrachtung zeigt Abbildung 47 die Investitionskosten nach Bauteilen für das Einfamilienhaus in Abbildung 46. Im Vergleich zu oben, sind die Kosten in dieser Abbildung nicht annuiert.

Wie zuvor bereits festgestellt, resultieren für die Variante mit Effizienzhaus-Stufe 40 die höchsten Investitionskosten. Die Investitionskosten für ein Passivhaus sind dagegen nur unwesentlich höher als die Kosten für das Gebäude errichtet nach GEG2023. Es wird deutlich, dass die Investitionskosten für die Außenwand, Fenster, Bodenplatte und das Dach mit steigenden Effizienzanforderungen steigen. Allerdings wird in der Passivhaus-Variante eine Luft-Luft-Wärmepumpe installiert, die mit 14.0000 € geringere Anschaffungskosten als eine Luft-Wasser-Wärmepumpe hat (Kümpel 2023). Eine Fußbodenheizung wird ebenfalls nicht benötigt, so dass die Investitionskosten in Summe geringer sind als für die Gebäude mit Effizienzhaus-Stufe 55 und 40.

**Abbildung 47: Investitionskosten für den Neubau eines Einfamilienhauses nach Bauteilen und Energiestandards**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach

Bauweise: Massivbau mit Kalksandstein und Wärmedämmverbundsystem mit EPS

Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Abbildung 48 zeigt weiterhin die Investitionskosten für das gleiche Einfamilienhaus in verschiedenen Bauweisen. Dargestellt ist der GEG-Standard.

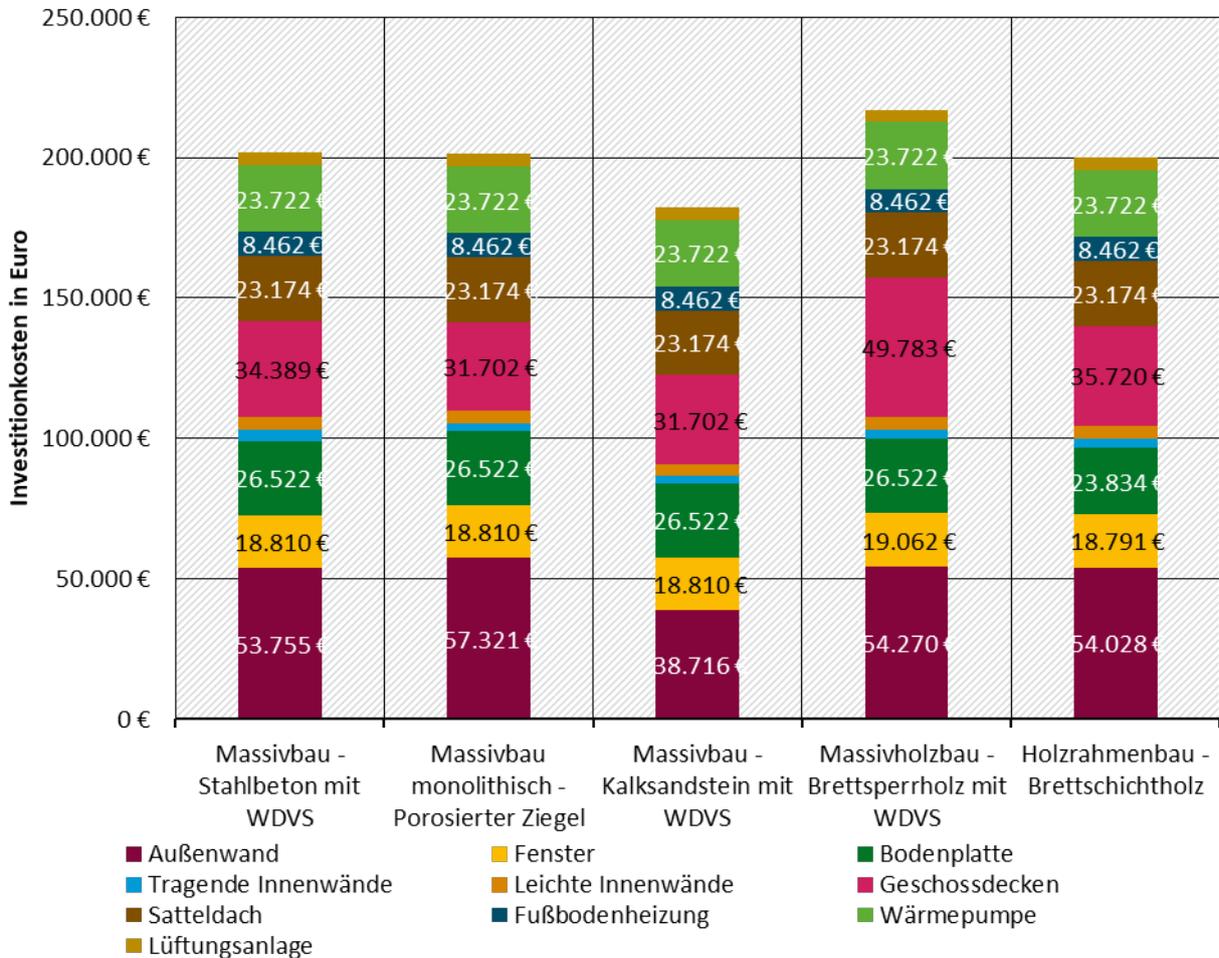
Für den Massivbau mit Kalksandstein und WDVS resultieren die geringsten Investitionskosten. Dies ist insbesondere auf die im Vergleich niedrigen Kosten für die Elemente der Außenwand zurückzuführen. Kalksandstein ist im Vergleich zu Stahlbeton, porosierten Ziegeln, Massivholzwände und Holzrahmen aus Brettschichtholz am günstigsten. Weitere Unterschiede bestehen bei den Kosten der Geschossdecken. Im Vergleich resultieren für die Deckenkonstruktion aus Brettstapelholz in der Massivholzbau mit rund 50.000 € die höchsten Investitionskosten. Da es sich um den gleichen Energiestandard handelt, führt die Wärmeversorgung in allen Varianten zu Kosten von rund 37.000 € (Wärmepumpe und Lüftungsanlage).

Insgesamt resultieren für den Massivbau mit Stahlbeton und WDVS und für den Massivbau mit porosierten Ziegeln Investitionskosten in Höhe von rund 206.000 € und für den Massivbau mit Kalksandstein und WDVS Investitionskosten von rund 187.000 €. Die Kosten für den Massivholzbau mit Brettsperrholz und WDVS summieren sich auf rund 222.000 €, die Kosten für den Holzrahmenbau mit Brettschichtholz auf rund 205.000 €.

Für die Berechnung wurden jeweils die durchschnittlichen Preise für die Bauelemente aus dem Baupreislexikon entnommen (siehe Kapitel 2.5). Für die Preise der Bauelemente gibt es jedoch eine Spannweite von niedrig über durchschnittlich bis hoch. Durch die bedeutende Spannweite

bei diesen Kosten ist zu erwähnen, dass zwar Unterschiede zwischen den Bauweisen bestehen, diese Unterschiede aber nicht unbedingt signifikant sind.

**Abbildung 48: Investitionskosten für den Neubau eines Einfamilienhauses nach Bauteilen für verschiedene Bauweisen**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES  
 Gebäudetyp: Einfamilienhaus ohne Keller und mit Satteldach  
 Energiestandard: Gebäudeenergiegesetz 2023  
 Wärmeversorgung: Luft-Wasser-Wärmepumpe

## 6.2 Lebenszykluskosten ausgewählte Bestandsgebäude

Abbildung 49 zeigt die Lebenszykluskosten (Investitionskosten für Sanierung und TGA, Energiebezug und Wartung) für die energetische Sanierung eines Einfamilienhauses auf verschiedene Energiestandards. Die TGA umfasst eine Wärmepumpe, die Erneuerung des Verteilsystems sowie eine Lüftungsanlage bei den Effizienzhaus-Stufen 55 und 40. Analog der Berechnung im Neubau ist eine Nutzungsdauer von 30 bzw. 20 Jahren (Baukonstruktion und technische Gebäudeausrüstung) und ein Zinssatz von 3 % unterstellt. Ein Austausch von Bauteilen ist ebenfalls nicht berücksichtigt.

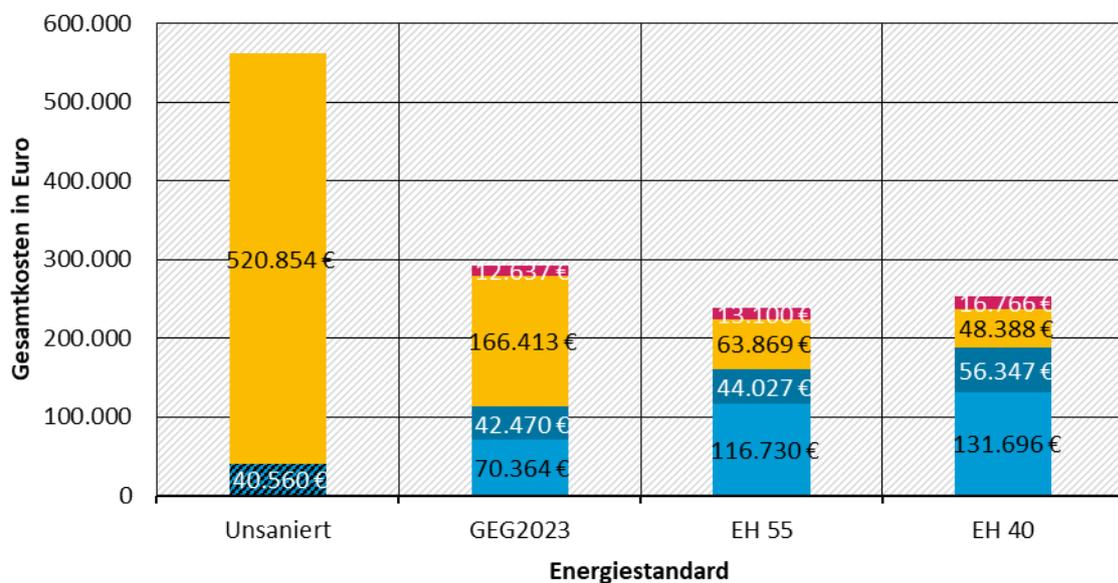
Dargestellt ist ein Einfamilienhaus aus der Baualtersklasse 1919 bis 1948. Es wird deutlich, dass die Gesamtkosten bei Sanierung auf GEG2023 und Effizienzhaus-Stufe 55 sinken. Dies auf die Reduktion der Energiebezugskosten zurückzuführen. Bei Sanierung auf Effizienzhaus-Stufe 40

reduziere sich auch die Energiebezugskosten, allerdings ist die Sanierung aufgrund der höheren Investitionskosten mit höheren Gesamtkosten als die Effizienzhaus-Stufe 55 verbunden.

Das unsanierte Gebäude hat über einen Zeitraum von 20 Jahren Energiebezugskosten von rund 521.000 € jährlich. Für die Instandsetzung resultieren Investitionskosten (CAPEX) von rund 41.000 €. Bei Sanierung auf GEG-Standard summieren sich die Gesamtkosten auf rund 300.000 €. Die Investitionskosten setzen sich zusammen aus rund 70.000 € für die Gebäudehülle und rund 42.000 € für die TGA. Nach der Sanierung reduziert sich der Heizwärmebedarf deutlich (siehe Abbildung 33), wodurch sich die Kosten für den Energiebezug von rund 521.000 € auf rund 166.000 € über einen Zeitraum von 20 Jahren reduzieren. Die Wartungskosten betragen in diesem Zeitraum rund 13.000 €. Für eine energetische Sanierung auf Effizienzhaus-Stufe 55 erhöhen sich die Investitionskosten für die Sanierung aufgrund der höheren Dämmdicke auf rund 117.000€. Die Investitionskosten für die TGA summieren sich auf rund 44.000 €. Die Kosten für Energiebezug können dadurch jedoch auf rund 64.000 € gesenkt werden. Die Wartungskosten summieren sich auf rund 13.000 €. Um die Effizienzhaus-Stufe 40 zu erreichen, steigen die Investitionskosten für die Sanierung auf rund 132.000 € und für die TGA auf rund 56.000 €. Die Kosten für den Energiebezug reduzieren sich auf rund 48.000 €. Die Wartungskosten steigen durch die TGA auf rund 17.000 €.

Bei der Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der gewählten Methodik (siehe Kapitel 2.3) kein Austausch von Bauteilen angenommen wird. Bei den Effizienzhaus-Stufen würden sich die Gesamtkosten unter Berücksichtigung von Austauschen, durch die Lüftungsanlagen, erhöhen. Wie bei der Analyse für den Neubau ist zudem zu beachten, dass der Analyse der Energiebedarf und nicht Energieverbrauch zugrunde liegt. Für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung sind reale Energieverbräuche zu verwenden. Insbesondere bei älteren, unsanierten Gebäuden, weicht der Verbrauch oftmals deutlich vom Bedarf ab (Rau *et al.* 2024).

**Abbildung 49: Gesamtkosten verschiedener Energiestandards bei Sanierung eines Einfamilienhauses**



■ CAPEX Instandsetzung ■ CAPEX Sanierung ■ CAPEX TGA ■ Energiebezug ■ Wartung

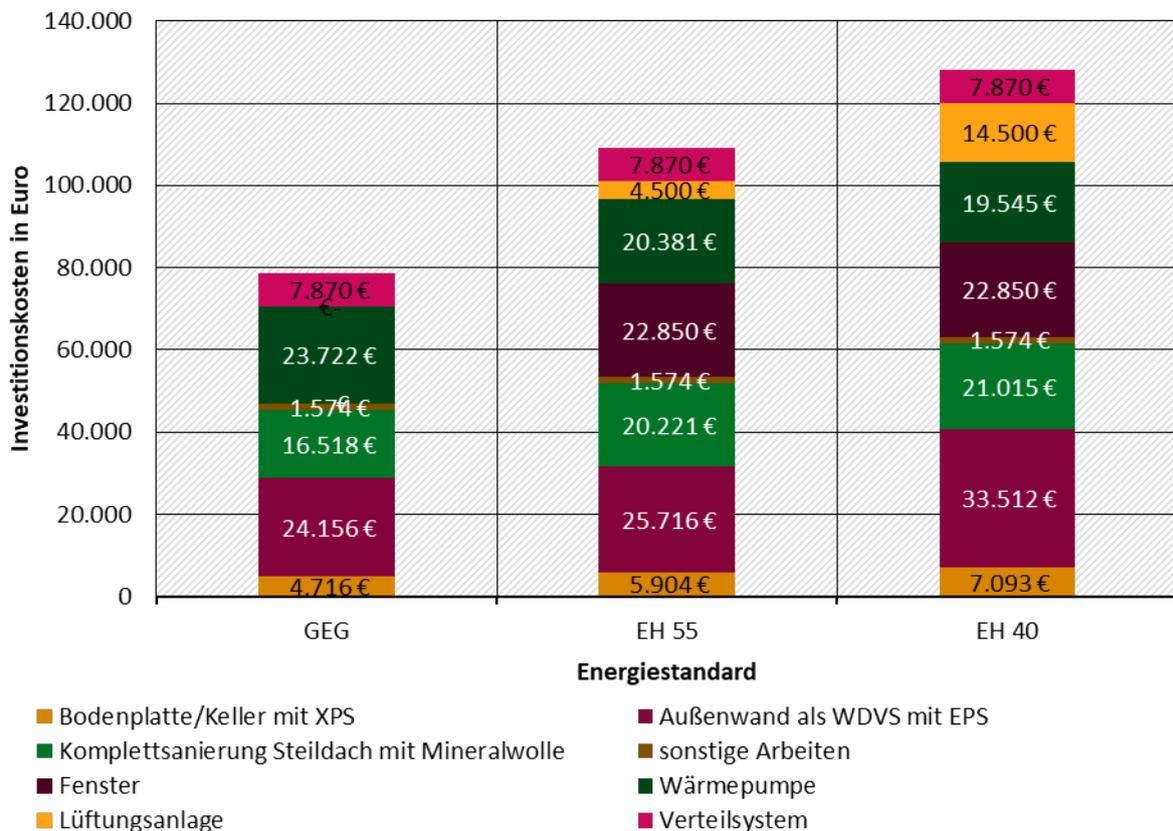
Quelle: Eigene Berechnungen IREES  
 Gebäudetyp: Einfamilienhaus  
 Baujahr: 1919 bis 1948

Sanierungsmaßnahmen: Installation einer Wärmepumpe, Perimeterdämmung mit XPS, Komplettsanierung des Steildachs mit Mineralwolle, Dämmung der Außenwand mit EPS

Abbildung 50 zeigt ergänzend die Investitionskosten für die Sanierungsmaßnahmen. Die gewählten Varianten sind auch in Abbildung 49 enthalten. Die Investitionskosten steigen mit den Anforderungen an die Energieeffizienz. Dies ist sowohl auf die Dämmdicke, als auch auf die Gebäudetechnik zurückzuführen.

Für die Bodenplatte/Keller, die Außenwand und das Steildach steigen die Kosten mit höheren Effizienzanforderungen. Die Fenster werden nur in den Effizienzhaus-Stufen 55 und 40 getauscht. Die Wärmepumpe orientiert sich an der Heizlast der Gebäude, die mit steigendem Energiestandard sinkt. Mit steigenden Effizienzanforderungen reduziert sich somit die Größe und damit auch die Kosten der Wärmepumpe. Das Verteilsystem (Plattenheizkörper) wird in allen Energiestandards getauscht. Weitere Unterschiede bestehen bei der Lüftungsanlage. Im GEG-Standard wird keine Lüftungsanlage installiert. Im Effizienzhaus 55 kommt eine dezentrale Lüftungsanlage zum Einsatz, in der Effizienzhaus-Stufe 40 eine zentrale Lüftungsanlage.

**Abbildung 50: Investitionskosten für verschiedene Effizienzhaus-Stufen und die gesetzlichen Anforderungen**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES

Gebäudetyp: Einfamilienhaus

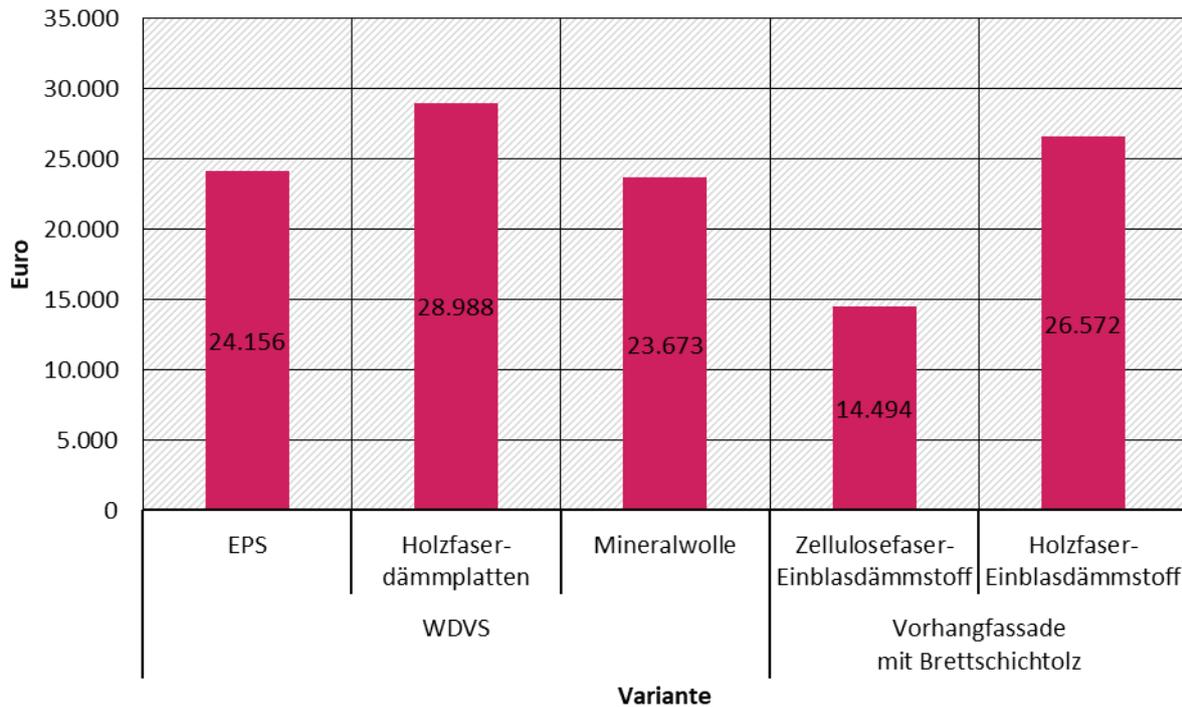
Baujahr: 1919 bis 1948

Sanierungsmaßnahmen: Installation einer Wärmepumpe, Perimeterdämmung mit XPS, Komplettsanierung des Steildachs mit Mineralwolle, Dämmung der Außenwand mit EPS

Abbildung 51 zeigt darüber hinaus die Investitionskosten für verschiedene Varianten zur Sanierung der Außenwand auf GEG-Standard. Der Aufbau der Varianten ist in Anhang A.6 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Vorhangfassade mit Brettschichtholz und Zellulosefaser-

Einblasdämmstoff mit rund 15.000 € die geringsten Kosten hat. Die Variante Wärmedämmverbundsystem mit Holzfaserdämmplatten verursacht mit rund 29.000 € dagegen die höchsten Investitionskosten.

**Abbildung 51: Investitionskosten für verschiedene Varianten der Sanierung der Außenwand**



Quelle: Eigene Berechnungen IREES  
 Gebäudetyp: Einfamilienhaus  
 Baujahr: 1919 bis 1948  
 Energiestandard: Gebäudeenergiegesetz 2023

## 7 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Studie wurden der kumulierte Energieaufwand und das Treibhauspotenzial für verschiedene Referenzgebäude, sowohl im Neubau als auch im Gebäudebestand berechnet. Die betrachteten Referenzgebäude wurden nach Gebäudetyp, Energiestandard und Bauweise unterschieden und detailliert nach Bauteilen und Materialien beschrieben. Durch diese detaillierte Betrachtung sind die Unterschiede zwischen den Bauweisen und Energiestandards deutlich erkennbar. Zudem lassen sich die Bauteile und Materialien mit den größten Klimaauswirkungen identifizieren.

Der Neubau von Gebäuden hat, unabhängig von Energieeffizienzstandard und Bauweise, nicht vernachlässigbare Auswirkungen auf das Klima. Im Vergleich zur Herstellung der Materialien für die energetische Sanierung von Gebäuden ist der kumulierte Energieaufwand zur Errichtung von neuen Gebäuden deutlich höher. Ein Einfamilienhaus nach GEG-Standard<sup>16</sup> zu errichten hat nach den Berechnungen einen Energieaufwand von 22,4 bis 30,4 kWh/(m<sup>2</sup>·a) (siehe Abbildung 23), während die energetische Sanierung eines Einfamilienhauses<sup>17</sup> nach GEG einen Wert von 5,2 bis 18 kWh/(m<sup>2</sup>·a)<sup>18</sup> erreicht. In den Varianten mit dem geringsten Primärenergieaufwand entspricht der Energieaufwand zur Herstellung der Baustoffe für die energetische Sanierung damit rund 23 % des Energieaufwands zur Herstellung der Baustoffe für den Neubau.

Entscheidend für den kumulierten Energieaufwand und die fossilen THG-Emissionen ist der Energieeffizienzstandard der Gebäude. Mit steigender Energieeffizienz sinken der Primärenergieaufwand und die THG-Emissionen während der Nutzungsphase der Gebäude deutlich ab. Dabei steigt der kumulierte Energieaufwand in der Herstellungsphase der Materialien leicht an, diese Steigerung ist jedoch im Vergleich zur Reduktion des Primärenergieaufwands in der Nutzungsphase zu vernachlässigen. Insgesamt ist das Verhältnis des Energieaufwands in der Herstellungsphase zur Reduktion des Primärenergieaufwands in der Nutzungsphase bei energetischer Sanierung im Bestand deutlich niedriger als bei Neubauten.

Die Darstellung der Lebenszykluskosten zeigt zudem, dass Energieeffizienz die Kosten in der Betriebsphase reduziert und die Kostensteigerungen zur Umsetzung der erhöhten Anforderungen an die Energieeffizienz marginal sind.

Neben den Energiestandards gibt es Unterschiede zwischen den betrachteten Bauweisen. Ein Gebäude in Holzleichtbauweise hat bei gleichen Energiestandards den geringsten, ein Gebäude in Massivbauweise mit Wärmedämmverbundsystem den höchsten kumulierten Energieaufwand. Dazwischen liegen die monolithische Massivbauweise und der Massivholzbau. Die Unterschiede zwischen den Bauweisen liegen insbesondere im Aufbau der Außenwände und Geschossdecken. Die Vorteile des Holzleichtbaus liegen insbesondere in der Balken- und Rahmenkonstruktion. Durch den punktuellen Einsatz von tragenden Elementen kann der kumulierte Energieaufwand reduziert werden. Im Gegensatz dazu resultieren in den Massivbauweisen, auch für den Massivholzbau, aufgrund des flächendeckenden Materialeinsatzes höhere Energieaufwände.

---

<sup>16</sup> Mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und ohne Keller

<sup>17</sup> Unsaniertes Einfamilienhaus, errichtet zwischen 1919 und 1948

<sup>18</sup> Spannweiten ergeben sich unter Berücksichtigung der Angaben in Abbildung 41 und Abbildung 42  
 Abbildung 41 Variante mit 5,2 kWh/(m<sup>2</sup>·a): Perimeter mit XPS, Außenwand mit Vorhangfassade und Zellulosefaser, Steildach mit Mineralwolle  
 Variante mit 18 kWh/(m<sup>2</sup>·a): Perimeter mit XPS, Außenwand und Steildach mit Holzfaserdämmplatten

Weiterhin bestehen Unterschiede zwischen verschiedenen Bauteilaufbauten innerhalb der gleichen Bauweise. Unter anderem resultiert bei Verwendung von Doppel-T-Trägern im Holzbau als tragende Elemente ein niedrigerer kumulierter Energieaufwand als bei Verwendung von Vollholz.

Weiterhin sind Unterschiede zwischen den Massivbauweisen zu beobachten, die auf die eingesetzten Bauprodukte (Dämmung und Tragwerk) zurückzuführen sind. Die Bauprodukte Kalksandstein, Ziegel und Stahlbeton sind mit unterschiedlichen Produktionsverfahren und damit auch Energieaufwänden und THG-Emissionen verbunden. In der Analyse resultiert für Stahlbeton der höchste Energieaufwand und für Mauerziegel der geringste.

Darüber hinaus zeigt der Vergleich nachwachsender und fossiler Baustoffe bei der Sanierung im Bestand die Unterschiede beim Primärenergieaufwand von verschiedenen Dämmstoffen. Dabei wird deutlich, dass nachwachsende Rohstoffe nicht immer mit geringeren Klimaauswirkungen als synthetische oder mineralische Dämmstoffe verbunden sind. Der Primärenergieaufwand hängt vom Verarbeitungsgrad der Materialien ab und ist zum Beispiel bei Faserdämmstoffen niedriger als bei Plattendämmstoffen.

Bei Betrachtung der THG-Emissionen werden weitere Unterschiede zwischen den Bauweisen sichtbar. Die berechneten THG-Emissionen umfassen sowohl fossile als auch biogene Emissionen, wobei der Fokus auf den fossilen THG-Emissionen liegt. Fossile THG-Emissionen entstehen durch den Einsatz fossiler Energieträger in Herstellung, Betrieb und Entsorgungsphase und orientieren sich damit am kumulierten Energieaufwand. Biogene THG resultieren in Form von gespeichertem Kohlenstoff (CO<sub>2</sub>) in Holz und pflanzlichen Baustoffen und in Form von Emissionen beim Einsatz von Biomasse als Energieträger sowie bei der Verbrennung der Baustoffe. Negative biogene THG-Emissionen resultieren vor allem im Holzbau, durch die Speicherung von CO<sub>2</sub> in der Herstellungsphase, am Lebensende (Modul C3) werden diese wieder freigesetzt. Der Zeitpunkt der Freisetzung ist dabei von der Nutzungsdauer der Materialien abhängig. Je länger die Materialien verwendet und ggf. auch mehrmals in Gebäuden eingesetzt werden, desto länger wird das CO<sub>2</sub> gebunden.

Bei Vergleich der Bauweisen ist zu beachten, dass der Unterschied zwischen den Bauweisen maßgeblich von den getroffenen Annahmen und der Datengrundlage abhängig ist. Für die Berechnung werden generische Datensätze verwendet, die den Branchendurchschnitt abbilden. Zudem bildet die Datenbank die Produktionsbedingungen in Deutschland ab und kann damit stark von anderen Datenbanken, wie beispielsweise Ecoinvent abweichen. Zudem ist der spezifische Primärenergieaufwand (als Energieträger) von hochverarbeiteten Holzprodukten in der ÖKOBAUDAT mit einem ähnlichen Primärenergieaufwand wie Stahlbeton verbunden. Darüber hinaus wurden Annahmen zum Bewehrungsanteil tragender Bauteile und zur Flächenberechnung der inhomogenen Bauteile getroffen, die einen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse haben.

In dieser Analyse wurde bewusst eine Methodik gewählt, die vom QNG abweicht (weitere Information siehe Kapitel 2.4). So wurde in den Berechnungen kein Austausch von Bauteilen berücksichtigt, da die Datengrundlage die Baustoffe und Materialien unter heutigen Produktionsabläufen, eingesetzten Verfahren und Energieträgern abbildet. Zukünftige Produktionsbedingungen sind in der Datengrundlage nicht abgebildet, weshalb kein Austausch von Bauteilen berücksichtigt wird.

Weiterhin wurde der kumulierte Energieaufwand auf die Wohn-/Nutzfläche und die spezifische Bauteillebensdauer bezogen. Dadurch ist ein direkter Vergleich des kumulierten Energieaufwands und Klimaauswirkungen der eingesetzten Baustoffe, technischen Gebäudeausrüstung und der Betriebsphase des Gebäudes möglich. Die Methode wurde gewählt,

um die heutigen Klimaauswirkungen der Gebäude zu bewerten. Es wird allerdings deutlich, dass die Ergebnisse stark von der Höhe dieser spezifischen Bauteillebensdauer abhängen. Je länger Bauteile genutzt werden, desto geringer ist der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen.

Weiterhin gibt es eine große Spannbreite bei den Nutzungsdauern von 20 (TGA) bis 80 Jahren (tragende Bauteile). Die Annahme hat damit auch Auswirkungen auf die Höhe des kumulierten Energieaufwands vor dem Hintergrund, dass kein Austausch von Bauteilen berücksichtigt wurde. Da insbesondere die Lebensdauern von Anlagen und Geräten im Vergleich mit der Baukonstruktion deutlich geringer sind, wird im Vergleich zum QNG die Klimawirkung der Gebäude etwas unterschätzt.

Vergleichbar mit dem QNG wurde in der Analyse der kumulierte Energieaufwand und die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus berechnet. Dadurch ist eine vollständige Bewertung der Klimaauswirkungen der verschiedenen Varianten, auch über das Lebensende hinaus, möglich und auch das Zusammenspiel zwischen Bauweise und Energiebedarf in der Nutzungsphase bewertbar. Es wurde allerdings deutlich, dass die Prozesse am Lebensende des Gebäudes (Abriss und Entsorgung) in hohem Maße ungewiss sind.

Abweichend vom QNG wurde in fossile und biogene THG-Emissionen unterschieden sowie der erneuerbare Primärenergiebedarf berechnet. Durch die separate Betrachtung der fossilen und biogenen THG-Emission wird deutlich, welche THG-Emissionen (fossil und biogen) mit der Herstellung der Materialien verbunden sind und welchen Anteil die CO<sub>2</sub>-Speicherung der Materialien hat. Wie zuvor beschrieben, resultieren (negative) biogene THG in Form von gespeichertem Kohlenstoff (CO<sub>2</sub>) in Holz und pflanzlichen Baustoffen und in Form von Emissionen beim Einsatz von Biomasse als Energieträger. Der gebundene Kohlenstoff ist jedoch ein durchlaufender Posten in der Ökobilanzierung von Gebäuden, da das in der Herstellungsphase gespeicherte CO<sub>2</sub> am Lebensende wieder freigesetzt wird. Insbesondere bei Betrachtung der Herstellungsphase von Gebäuden ist die Unterscheidung in fossile und biogene THG-Emissionen deshalb wichtig, um die Klimaauswirkung der Materialproduktion und auch die CO<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit von Materialien zu bewerten.

Die Analyse zeigt weiterhin, dass die Betrachtung des kumulierten Energieaufwands zusätzlich zu den (fossilen) THG-Emissionen wichtig ist, da diese nur den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf abdecken. In dieser Studie wurde sowohl der erneuerbare als auch der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf betrachtet. Die Ergänzung um den erneuerbaren Energieaufwand ist wichtig, da diese Energie zwar aus erneuerbaren Quellen stammt, dafür jedoch auch Erzeugungskapazitäten (PV-Anlagen, Windräder usw.) errichtet werden müssen. Vor dem Hintergrund der damit verbundenen Klima- und Umweltauswirkungen und der Sektorkopplung<sup>19</sup> ist Energieeffizienz weiterhin wichtig. Für eine vollständige Bewertung von Materialien und Bauprodukten ist deshalb die Analyse des gesamten Primärenergieaufwands zu empfehlen.

Die Betrachtung des gesamten kumulierten Energieaufwand (erneuerbar und nicht erneuerbar) macht jedoch eine Bewertung der einzelnen Indikatoren unmöglich.

---

<sup>19</sup> Als Beispiele seien der Ausbau von Wärmepumpen in Gebäuden, die erneuerbaren Strom und die Elektrifizierung von Industrieprozessen zur Herstellung von Materialien genannt

## 8 Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden Handlungsempfehlungen für die Reduktion des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen von Gebäuden und damit die Umsetzung von klimafreundlichem Bauen in der Praxis dargestellt. Zunächst werden die dabei bestehenden Herausforderungen erläutert und anschließend konkrete Handlungsempfehlungen für die Hindernisse vorgestellt. Die Handlungsempfehlungen basieren auf den Ergebnissen dieser Studie und wurden teilweise im Austausch mit Expertinnen und Experten entwickelt.

### 8.1 Herausforderungen bei der Reduktion von grauer Energie und der Treibhausgasemissionen und bei der Umsetzung klimafreundlichen Bauens

Auf dem Weg hin zu klimafreundlichem Bauen und treibhausgasneutralem Gebäudebestand sind noch zahlreiche Hürden zu umgehen. Nicht nur müssen die direkten THG-Emissionen von Gebäuden bis 2030 um mehr als 40 % reduziert werden (Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045, 2022), auch die grauen Emissionen von Gebäuden müssen signifikant sinken. Dabei besteht die Herausforderung, dass der Gebäudesektor im KSG ausschließlich die direkten THG-Emissionen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe umfasst. Die THG-Emissionen durch Stromeinsatz in Gebäuden ist allerdings im Energiesektor, die Herstellung von Bauprodukten, die Errichtung und der Rückbau von Gebäuden und das Recycling von Bauprodukten im Industriesektor des KSG verortet. Für klimafreundliche Gebäude sind deshalb sektorübergreifende Anstrengungen notwendig. (Deurer *et al.* 2023)

Nach Berechnungen von Le Den *et al.* (2023) dürfen die grauen Emissionen von Wohngebäuden im Jahr 2030 nur noch 264 kg CO<sub>2</sub>äq/m<sup>2</sup> BGF betragen, um die Klimawirkung von Neubauten zu reduzieren und die Klimaziele zu erreichen. Bis 2045 sinkt dieser Wert auf 49 kg CO<sub>2</sub>äq/m<sup>2</sup> BGF. Für die Errichtung (A1-A3) eines Einfamilienhauses in monolithischer Bauweise erbaut nach GEG-Standard resultieren in dieser Studie bei heutiger Betrachtung rund 300 CO<sub>2</sub>äq/m<sup>2</sup> BGF. In Massivbauweise mit WDVS (Stahlbeton) resultieren rund 344 CO<sub>2</sub>äq/m<sup>2</sup> BGF und in Holzleichtbauweise rund 174 CO<sub>2</sub>äq/m<sup>2</sup> BGF<sup>20</sup>. Die Klimawirkung und damit verbunden auch der kumulierte Energieaufwand von Gebäuden muss demnach in den nächsten Jahren massiv sinken.

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen, dass die Nutzungsphase von Gebäuden der zentrale Hebel zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands darstellt. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Elektrifizierung und damit verbundenen Sektorkopplung sollte neben einer Minimierung des Wärmebedarfs auch die Minimierung der Auslegungs-Heizlast ein maßgeblicher Indikator zur Bewertung von Gebäuden sein. Dies ist im Hinblick auf den nicht erneuerbaren und erneuerbaren Energieaufwand wichtig.

Trotz der im Verhältnis zur Nutzungsphase geringeren Relevanz der Herstellungs- und Entrichtungsphase sollte diese jedoch nicht vernachlässigt werden. Wie in dieser Studie dargestellt, ist der kumulierte Energieaufwand bei der energetischen Sanierung im Vergleich zum Neubau von Gebäuden deutlich geringer, gleichzeitig besteht ein hohes THG-Minderungspotenzial. Die Nutzung und energetische Sanierung des Gebäudebestands sollten in den nächsten Jahren deshalb im Fokus stehen. Allerdings ist die Sanierungsrate in Deutschland mit 0,88 % im Jahr 2022 und 0,7 % im Jahr 2023 weiterhin auf sehr niedrigem Niveau (Gebäude-Energieberater 2024).

<sup>20</sup> Die Werte wurden auf Basis der Ergebnisse in Abbildung 18, der Nutzungsdauern in A.3 und der Flächen in Tabelle 12 berechnet.

Der Neubau von Wohn- und Nichtwohngebäuden ist gegenüber der Sanierung wo immer möglich zurückzustellen. Ist Neubau aus verschiedenen Gründen nicht zu vermeiden, sollte auf Energieeffizienz in der Nutzungsphase und einen möglichst geringen kumulierten Energieaufwand in der Herstellungsphase geachtet werden. Für die Adressierung der Nutzungsphase gibt es etablierte technische Konzepte wie das Passivhaus und es werden seit vielen Jahren Instrumentenvorschläge diskutiert, wie das Ambitionsniveau auch in der Breite gehoben werden könnte. Insbesondere beim Ordnungsrecht ist ein höheres Effizienzniveau bisher allerdings an der politischen Umsetzbarkeit gescheitert.

Die folgenden Handlungsempfehlungen fokussieren sich auf die Adressierung der Bauweisen und Baustoffe, ohne damit die Bedeutung der Nutzungsphase zu vergessen. Die hier aufgeführten Vorschläge sollen immer in Ergänzung der Operationalisierung des „Energy Efficiency First“ Prinzip in allen Lebensphasen gesehen werden, ohne die entsprechenden Handlungsempfehlungen zur Adressierung der Nutzungsphase zu wiederholen, die an anderer Stelle schon aufgeführt sind.

Weitere Herausforderungen, die im Folgenden thematisiert werden, ergeben sich in der Umsetzung des klimafreundlichen Bauens durch Fachkräftemangel, aber auch fehlendes Wissen bei relevanten Akteuren bzw. komplizierten Bauvorschriften und Anforderungen sowie im Bereich der Datengrundlagen zur Berechnung von Ökobilanzen.

## **8.2 Erhöhung der Energieeffizienz in der Nutzungsphase von Gebäuden**

Die Reduktion des Energiebedarfs des Gebäudes in der Nutzungsphase hat den größten Einfluss auf die Reduktion des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen. Dabei ist insbesondere der Energiebedarf von Bestandsgebäuden durch Steigerung der Sanierungsrate und -tiefe und durch Verschärfung der Effizienzanforderungen im Ordnungsrecht zu adressieren. Weiterhin stellt die Heizlast von Gebäuden einen wichtigen Indikator zur Reduktion des Energiebedarfs von Gebäuden und des Gesamtsystems da. Im Neubau sind ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den Energiestandards zu beobachten, weshalb auch für den zukünftigen Gebäudebestand die ordnungsrechtlichen Effizienzanforderungen angehoben werden sollten.

### **Durch eine erhöhte Sanierungsaktivität**

Der Fokus der Aktivitäten zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen sollte auf der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden und nicht im Neubau von Gebäuden liegen. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass die Ertüchtigung des Gebäudebestands (unter bestimmten Voraussetzungen) mit geringeren Klimaauswirkungen als der Neubau von Gebäuden verbunden ist. Wie die Analyse der Kosten zeigt, sind auch geringere Kosten als beim Neubau damit verbunden.

Für die Reduktion der THG-Emissionen des Gebäudesektors und damit für die Zielerreichung des KSG ist die Sanierung von Bestandsgebäuden unabdingbar. Die Sanierungsrate und auch -tiefe sollte deshalb in den nächsten Jahren unbedingt gesteigert werden. Eine ausreichende Sanierungstiefe ist hinsichtlich der Klimaauswirkungen, aber auch in Bezug auf sogenannte lock-in Effekte zu betonen. Wie in Kapitel 5.6 dargestellt, ist eine ausreichende Sanierungstiefe bzw. die Installation einer Wärmepumpe notwendig, damit der kumulierte Energieaufwand geringer als ein Neubau nach GEG2023 ist. Lock-in-Effekte treten dann auf, wenn Gebäude zwar saniert werden, aber dabei keine ausreichende Sanierungstiefe erreichen. Es ist dann unwahrscheinlich und auch teuer, das Gebäude zu einem späteren Zeitpunkt nochmals zu sanieren.

Umfassende Vorschläge für eine Steigerung der Sanierungsrate und -tiefe sind bereits in zahlreichen Studien enthalten. Als Beispiele sind die Erhöhung der Förderquoten und -budgets, die Stärkung der individuellen Sanierungsfahrpläne, die Serielle Sanierung und Mindesteffizienzstandards für Bestandsgebäude zu nennen. (Repenning *et al.* 2023; Rother *et al.* 2020; Steinbach *et al.* 2021)

#### **Durch Verschärfung der ordnungsrechtlichen Energieeffizienzanforderungen im Neubau und Bestand**

Die Analyse zeigt, sowohl bei Sanierung als auch bei Neubau, dass insbesondere der erreichte Energiestandard zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen beiträgt. Dies wird insbesondere bei Betrachtung der Relation von Energiestandard und Bauweise hinsichtlich Rückgangs des kumulierten Energieaufwands deutlich. Der Primärenergieaufwand eines Einfamilienhauses mit GEG-Standard in der Nutzungsphase beträgt rund 48 kWh und mit Effizienzhaus-Stufe 40 rund 25 kWh (siehe Abbildung 13). Die Reduktion beträgt somit rund 23 kWh. Die Spannweite bei den Bauweisen beträgt dagegen rund 22 bis 30 kWh (siehe Abbildung 23), was eine mögliche Reduktion von ca. 8 kWh ergibt.

Die Bedeutung der Effizienzstandards bei energetischer Sanierung und bei Neubauten ist deshalb zu betonen. Wie bereits oben aufgeführt, gibt es jedoch bereits eine Reihe von Studien, die eine Verschärfung der ordnungsrechtlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden aufgreifen und Empfehlungen zur Umsetzung aussprechen (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2020; Repenning *et al.* 2023; Rother *et al.* 2020; Steinbach *et al.* 2021). Auf weitere Ausführungen wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

#### **Durch Reduktion der Heizlast von Gebäuden**

Die Heizlast unterscheidet sich vom Heizwärmebedarf des Gebäudes und wird zur Dimensionierung des Wärmeversorgungssystems (Heizflächen und Wärmeerzeuger) berechnet. Für die Berechnung wird der Transmissions- und Lüftungswärmeverlust sowie die Zusatzaufheizleistung benötigt. Die Transmissionswärmeverluste sind wiederum von verschiedenen Temperaturen, den U-Werten und dem Luftwechsel und damit vom Sanierungszustand des Gebäudes abhängig (Heinze GmbH I NL Berlin I BauNetz o. J.b).

Je geringer die Heizlast des Gebäudes, desto geringer ist auch die installierte Leistung des Wärmeerzeugers. Die Heizlast ist damit ein wichtiger Indikator zur für den kumulierten Energieaufwand in der Nutzungsphase der Gebäude. Insbesondere bei der Installation von Wärmepumpen in sanierten Gebäuden ist die Betrachtung der Heizlast zu empfehlen. Je geringer die Heizlast durch einen höheren Effizienzstandard, desto geringer der Stromverbrauch der Wärmepumpe. Der Stromverbrauch von Wärmepumpen hat unmittelbare Auswirkungen auf das Stromsystem, da bei zunehmender Elektrifizierung des Gebäudesektors auch Lastspitzen durch Beheizung entstehen (PI 2021). Diese Lastspitzen müssen durch den Aufbau von Erzeugungskapazitäten und Speichern gedeckt werden.

### **8.3 Reduktion der grauen Energie und Emissionen von Gebäuden**

Neben der Energieeffizienz von Gebäuden ergeben sich hinsichtlich der unterschiedlichen Bauweisen geringere Potenziale zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands und der Treibhausgasemissionen. Nichtsdestotrotz sollte die Herstellungs- und Errichtungsphase nicht vernachlässigt werden.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Holzleichtbauweise im Vergleich der Bauweisen mit dem geringsten kumulierten Energieaufwand und den geringsten THG-Emissionen verbunden ist. Allerdings liegt die Klimawirkung aller Bauweisen deutlich über denen der für eine

Zielerreichung notwendigen THG-Emissionen und muss in den nächsten Jahren reduziert werden (vgl. Kapitel 8.1). Zur Reduktion der grauen Energie und Emissionen sind deshalb veränderte Bauweisen, aber auch der Einsatz emissionsarmer bzw. dekarbonisierter Materialien notwendig.

### 8.3.1 Durch veränderte Bauweisen und Gebäudekonzepte

In den Holzleichtbauweisen kann der kumulierte Energieaufwand insbesondere durch eine veränderte Bauweise im Tragwerk reduziert werden. Durch den punktuellen Einsatz von Holz als tragende Elemente in den Außenwänden und Geschossdecken kann der kumulierte Energieaufwand im Vergleich der Bauweisen deutlich reduziert werden (vgl. Abbildung 20). Reduktionspotenzial ergibt sich weiterhin durch den Einsatz von Stegträgern im Vergleich zu Vollholz. Das Prinzip des Leichtbaus kann aber auch auf andere Bauweisen übertragen werden. Wie die Untersuchungen von Blandini *et al.* (2023) zeigen, ist die Reduktion der grauen Energie und der Emissionen durch Leichtbau auch für Beton möglich. Durch die Entwicklung von Schalungstechnologien und Betonrezepturen können auch filigrane und leichte Betonkonstruktionen realisiert und damit die graue Energie von Gebäuden reduziert werden.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass kompakte Gebäude, also solche mit einem niedrigen A/V-Verhältnis, weniger graue Energie benötigen (vgl. Abbildung 25). Durch die geringere Gebäudehüllfläche reduziert sich der Materialeinsatz wodurch sich wiederum der Energieaufwand in der Herstellungsphase des Gebäudes reduziert. Das A/V-Verhältnis hat damit auch Auswirkungen auf den Betrieb, da sich bei einer geringeren Gebäudehüllfläche weniger Verluste ergeben. Auch vor dem Hintergrund der Erkenntnisse in Kapitel 4.5.1 ist deshalb der Neubau von größeren und kompakteren Gebäuden mit mehr Bewohnerinnen und Bewohner zu empfehlen.

Nichtsdestotrotz ist auch die Holzleichtbauweise mit bedeutenden THG-Emissionen verbunden, die nur durch Dekarbonisierung oder Substitution von Materialien zu reduzieren sind. Dies wird in den Kapiteln 8.3.2 und 8.3.3 betrachtet.

Durch die Taxonomie und CSRD gewinnt die Ökobilanzierung an Bedeutung (siehe Kapitel 1.2). Auch wenn die Anforderungen der Taxonomie, unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Studie, als moderat einzuschätzen sind, ist die Offenlegungspflicht der Ökobilanz als Bewertungsgrundlage für Investitionen zu befürworten. Um die Klimaauswirkungen von Gebäuden zu betrachten und Gebäude mit niedrigen THG-Emissionen zu fördern, ist zunächst einmal die Erfassung und Bilanzierung der THG-Emissionen notwendig. Durch die EPBD wird die Ökobilanzierung von Gebäuden mittelfristig im Ordnungsrecht verankert.

Eine weitere Möglichkeit zur Adressierung der grauen Energie besteht durch ein Bonus-Malus-System. Bonus-Malus-Regelungen entstammen dem Versicherungswesen. Die Versicherungsprämie wird anhand des individuellen Schadenverlaufs und der Tarifklassen festgelegt. Wird kein Schaden verursacht, reduziert sich die Versicherungsprämie. Wird ein Schaden verursacht, steigt die Prämie (Wagner 2017).

Das Bonus-Malus-System ist aber als Instrument für Klimaschutz möglich. 2021 wurde vom Umweltbundesamt ein Vorschlag zur Umgestaltung der Kfz-Steuer gemacht. Damit ein Anreiz zum Kauf verbrauchsarmer und emissionsarmer Fahrzeuge entsteht, sollte die Kfz-Steuer am CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Fahrzeugen festgemacht werden (Blank und Zimmer 2021).

Dieses System ist auch auf Gebäude übertragbar. Adressaten eines solchen System könnten große Bauträger und Fertighausanbieter sein. Beim Kauf eines Gebäudes mit mehr grauer Energie bzw. höheren THG-Emissionen wird ein Malus gezahlt und als Bonus an diejenigen

ausgezahlt, die sich für eine Variante mit geringerer Klimawirkung entscheidet. Dadurch würde sich auch die Ökobilanzierung als Bewertungssystem etablieren.

### 8.3.2 Durch den Einsatz energieeffizienter Materialien und Ressourceneffizienz im Bau

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass neben der Bauweise die Auswahl der Materialien den kumulierten Energieaufwand und die THG-Emissionen beeinflusst. Dabei werden die graue Energie und die grauen Emissionen insbesondere durch das Herstellungsverfahren bestimmt. Der Einsatz von energieeffizienten Materialien kann zu einer Reduktion der Klimawirkung beitragen.

Hervorzuheben sind die Unterschiede zwischen den Dämmstoffen. Während Holzfaserdämmplatten (aufgrund des Herstellungsverfahrens) mit einem hohen Energieaufwand verbunden sind, sind Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (Holz- und Zellulosefasern als Einblasdämmstoffe, Hanf, Stroh und Flachs sowie Mineralwolle) mit einem niedrigeren Energieaufwand als synthetische Produkte verbunden.

Der Marktanteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen beträgt derzeit allerdings nur 10 % (Stand 2019) (FNR 2020a). Nicht erfasst ist der Marktanteil recycelter Materialien.

Der geringe Marktanteil von biogenen Dämmstoffen ist auf eine Reihe von Hemmnissen zurückzuführen. Baurechtliche Vorschriften schränken den Einsatz im Geschosswohnungsbau ein. Dämmstoffe, die auf erneuerbaren Rohstoffen basieren, werden in der Muster-Holzbaurichtlinie der Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) zugewiesen, da sie über die Eigenschaft des Glimmens verfügen. Dies verhindert in einigen Bundesländern den Einsatz in Mehrfamilienhäusern mit mehr als drei Stockwerken. In einem Forschungsprojekt unter der Leitung des Fraunhofer Institut für Holzforschung konnte dieses Hindernis durch die Ermittlung von neuen Materialkennwerten aber ausgeräumt werden (FNR 2020b).

Zum anderen ist die Bekanntheit von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bei Gebäudeeigentümerinnen und Gebäudeeigentümern gering. Fehlende planerische und handwerkliche Kompetenzen sowie die Verbreitung durch Energieberater und Energieberaterinnen Architekten und Architektinnen und Planerinnen und Planer stellen ein Hemmnis für die Verbreitung dieser Rohstoffe dar (co2online 2018; Wolff und Rüter 2019).

Der Dämmstoffmarkt ist deshalb stark durch synthetische bzw. mineralische Dämmstoffe geprägt.

Bei der Auswahl von Baustoffen sollte neben einem geringeren Energieeinsatz, jedoch auch auf Langlebigkeit und Rezyklierbarkeit geachtet werden. Wie die Betrachtung in Kapitel 4.5.2 zeigt, hat die Verlängerung von Bauteilnutzungsdauern einen bedeutenden Einfluss auf die graue Energie und die grauen Emissionen von Gebäuden.

Synthetische Dämmstoffe werden derzeit vor allem energetisch verwertet bzw. deponiert. Geeignete Recyclingverfahren werden derzeit erforscht bzw. aufgebaut (Reinhardt *et al.* 2022). Nachwachsende Rohstoffe können theoretisch wieder verwendet werden. Die thermische Verwertung ist für alle Materialien möglich.

Die Erhöhung der Nutzungsdauer könnte durch die Nutzung von digitalen Gebäuderessourcenpässen<sup>21</sup> gewährleistet werden. Durch den Ressourcenpass, der auch bei Eigentumsübergang bestehen bleibt, wird der Einsatz von Baustoffen dokumentiert und

---

<sup>21</sup> Der Gebäuderessourcenpass ergänzt den Energieausweis von Gebäuden um Informationen bzgl. Ressourcennutzung, Klimawirkung und Kreislauffähigkeit der eingesetzten Materialien. Siehe auch <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass>

dadurch die Transparenz des Gebäudes erhöht. Die Kenntnis über die eingesetzten Materialien erhöht die Chance für eine Weiter- bzw. Umnutzung. Die Dokumentation des Materialeinsatzes in Gebäuden ist die Voraussetzung dafür, dass Materialien am Lebensende wieder entnommen und recycelt werden können. Bei Bau von neuen Gebäuden oder Sanierung von Bestandsgebäuden sollte der Gebäuderessourcenpass deshalb verpflichtend bzw. der Energieausweis erweitert werden.

Bedeutend reduziert werden kann der kumulierte Energieaufwand von Neubauten und Sanierungsprojekten durch den Einsatz von gebrauchten Bauteilen. Anders als Primärmaterialien gehen Sekundärmaterialien mit deutlich geringeren Umwelt- und Klimawirkungen in die Ökobilanz ein<sup>22</sup>. Im QNG entsteht jedoch kein Vorteil für gebrauchte Bauteile, da die Datengrundlage dies nicht zulässt.

Es ist sinnvoll, den Einsatz von Sekundärbauteilen zu fördern bzw. diese Bauteile auch im QNG zu bevorzugen. Gebrauchte Materialien reduzieren nicht nur die graue Energie von Gebäuden, sondern auch den Ressourcenverbrauch und die Abfallentstehung.

Damit gebrauchte Materialien zum Einsatz kommen muss allerdings die Verfügbarkeit erhöht und die rechtssichere Verwendung gewährleistet werden. Derzeit haben gebrauchte Bauteile keine Gewährleistung beim Wiedereinbau, aufgrund potenzieller Schadstoffe oder der Qualität. Die Verfügbarkeit von wiederverwendbaren Bauteilen hat, neben der Dokumentation in einem Gebäuderessourcenpass, mehrere Voraussetzungen. Die Gebäude müssen rekonstruierbar gebaut und dafür auch geplant werden, es müssen Lager- und Transportinfrastrukturen aufgebaut und die Normierungen im Baubereich angepasst werden (Dechantsreiter *et al.* 2014). Zur Schaffung von Rahmenbedingungen für eine Kreislaufwirtschaft wurde im Jahr 2023 die DIN SPEC 91484 (2023-09) entwickelt. Der Standard definiert ein Verfahren zur Erfassung von Bauprodukten und damit die Voraussetzung für die Verfügbarmachung von Materialien zur Weiternutzung. (DIN SPEC 91484:2023-09)

### 8.3.3 Durch Einsatz emissionsreduzierter und dekarbonisierter Materialien

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass der kumulierte Energieaufwand in allen Bauweisen in den nächsten Jahren reduziert werden muss, um die Ziele des KSG zu erreichen. Auch wenn in den Holzleichtbauweisen der Energieaufwand und die THG-Emissionen durch den reduzierten Materialeinsatz verringert werden können, werden die Materialien bislang im Wesentlichen unter Einsatz von fossilen Energien hergestellt. Zudem besteht auch im Holzbau die Gründung aus Stahlbeton.

Die Dekarbonisierung der Produktionsverfahren und die Vermeidung von prozessbedingten Emissionen, die bei der Herstellung von Zement und Stahl entstehen, sind deshalb unerlässlich. Die geogenen Emissionen der Zementherstellung können nicht vermieden werden, da diese dem Rohmaterial Kalziumkarbonat entstammen und im Prozess notwendigerweise freigesetzt werden. Hier ist daher die Substitution dieses Rohmaterials, letztlich durch innovative Bindemittel, als auch die Vermeidung der Nutzung durch Substitution des Zementeinsatzes, entscheidend. Für die dann noch entstehenden Restemissionen verbleiben nur die Kohlenstoffabscheidung und Nutzung (Carbon Capture and Utilization, CCU) sowie Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) als Lösungsoptionen.

---

<sup>22</sup> Die Allokationsvorschrift der EN 15804 (2022-03) unterscheidet zwischen geschlossenen und offenen Stoffkreisläufen. Wohingegen bei geschlossenen Stoffkreisläufen nur ein Produkt mit Recyclinganteil bilanziert wird, auch wenn mehrere Verwendungszyklen stattfinden, werden bei offenen Stoffkreisläufen zwei Produktsysteme bilanziert. Das bedeutet, dass Umwelt- und Klimaauswirkungen vor dem Abschneidekriterium, zum primären Verwendungszyklus und Umwelt- und Klimaauswirkungen nach dem Abschneidekriterium zum sekundären Verwendungszyklus gehören. Das Abschneidekriterium befindet sich laut Norm an dem Zeitpunkt, ab dem Abfall in einen neuen Markt eintritt und dafür ein finanzieller Ausgleich verlangt werden kann.

Die Reduktion der THG-Emissionen von Industrieprozessen ist bereits durch eine Reihe von Förderprogrammen und ordnungsrechtliche Anforderungen in Gang gesetzt. Zu nennen sind:

- ▶ CO<sub>2</sub>-Bepreisung durch den europäischen Emissionshandel
- ▶ Bundesförderprogramm Industrie und Klimaschutz (BIK)
- ▶ Klimaschutzverträge für die Industrie
- ▶ Nachhaltigkeitsberichterstattung im Rahmen der CSRD
- ▶ Energieeffizienzgesetz

Die genannten Förderprogramme adressieren vor allem die Angebotsseite der Industrieproduktion. Auch die Nachfrageseite ist jedoch wichtig, um für „grüne“ Produkte verlässliche Marktvolumina zu schaffen und somit Investitionssicherheit zu gewährleisten. Um solche sogenannten „grünen Leitmärkte“ zu schaffen sind insbesondere auch allgemein akzeptierte Produktstandards wichtig. Das BMWK hat im Mai 2024 ein Konzept für solche Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe vorgelegt (BMWK 2024). In einem Stakeholderprozess wurden Definitionen für klimafreundliche Grundstoffe entwickelt: für Stahl, Zement, Ammoniak und Ethylen. Ein nächster Schritt wäre die Weiterentwicklung dieser Definitionen zu einer anerkannten umweltbezogenen Kennzeichnung nach DIN EN ISO 14024 (2018-06), um eine entsprechende Markttransparenz für diese Produkte zu ermöglichen. Dieser Prozess wird allerdings Jahre dauern. Zwischenzeitlich können auch privatwirtschaftliche Initiativen wertvolle Beiträge zur Marktbereitung liefern, hier ist aktuell das Label und Kennzeichnungssystem „Low Emission Steel Standard“ (LESS) der WV Stahl hervorzuheben, das auf dem sogenannten sliding scale approach beruht und eine externe Zertifizierung vorsieht (Wirtschaftsvereinigung Stahl o.J.). Der methodische Ansatz von LESS ermöglicht eine Klassifizierung unabhängig von der Produktionsroute (Primärstahl/ Sekundärstahl).

#### **8.4 Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung in Gebäuden**

Neben kumuliertem Energieaufwand und den (fossilen) THG-Emissionen sind weitere Kennwerte aus sektoraler und gesamtsystemischer Sicht relevant, wie die Senkenleistung in Form des biogenen Treibhauspotenzial. Die Verwendung von CO<sub>2</sub>-speichernden Materialien ist auch in Bezug auf den Carbon Removal Certification Framework (CRCF) relevant.

Die CO<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit von Materialien könnte als zentrales Förderkriterium einbezogen werden. Dieser Ansatz würde dazu beitragen, den Fokus verstärkt auf Materialien zu legen, die einen geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweisen und somit nicht nur die fossilen THG-Emissionen im Bauwesen zu reduzieren, sondern den Gebäudebestand als CO<sub>2</sub>-Senke auszubauen. Dadurch kann auch der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen erhöht werden (siehe Kapitel 8.3.2). Eine Studie von co2online (2018) zeigt, dass bei Auswahl von Dämmstoffen der Preis das wichtigste Entscheidungskriterium ist. Durch zusätzliche Förderung für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen kann jedoch ein Wettbewerbsvorteil geschaffen werden kann, wodurch sich der Marktanteil erhöhen kann.

Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass auch die fossilen THG-Emissionen möglichst gering sind und nicht durch die biogenen THG-Emissionen aufgewogen werden. Die Berechnungen zeigen, dass im Neubau der Holzleichtbau die Bauweise mit dem geringsten kumulierten Energieaufwand und den geringsten fossilen Treibhausgasen ist. Der Massivholzbau stellt die größte CO<sub>2</sub>-Senke dar, hat jedoch einen höheren kumulierten Energieaufwand als die Holzleichtbauweise.

## 8.5 Weiterentwicklung und Ergänzung der bestehenden Fördermechanismen

Ursprünglich sollten im Rahmen dieses Projektes konkrete Vorschläge für Anforderungswerte in Bezug auf den kumulierten Energieaufwand von Gebäuden gemacht werden. Auf Basis der Ergebnisse könnten für die unterschiedlichen Gebäudetypen die Bauweisen mit dem geringsten kumulierten Energieaufwand und den geringsten THG-Emissionen identifiziert werden.

Allerdings definiert das QNG bereits umfassende Anforderungen an die Qualität von Gebäuden. Die Strukturen und Anforderungen des QNG beginnen sich, insbesondere im Rahmen des KfN, bei Fachkräften und in den verschiedenen Softwarelösungen zu etablieren.<sup>23</sup> Es entsteht somit ein standardisierter Rahmen, der bereits viele Aspekte der Nachhaltigkeit und der Lebenszyklusbewertung von Gebäuden berücksichtigt.

Es ist darauf hinzuweisen, dass der Anforderungswert im QNG nur erreicht werden kann, wenn die graue Energie der Materialien reduziert werden und das Gebäude effizient betrieben wird. Das QNG führt dazu, dass die Erstellung von Ökobilanzen auch abseits von finanzieller Förderung gefordert wird und schon heute aber vermehrt in der Zukunft auch in die Vergabe von Bauprojekten einfließen soll.

**In Anbetracht dieser bestehenden Strukturen und Anforderungen wäre es ineffizient, zusätzliche Anforderungswerte parallel zu den QNG-Vorgaben zu entwickeln.** Stattdessen wird vorgeschlagen, das QNG sowie gegebenenfalls die BEG weiterzuentwickeln, und die Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen dieser Studie zu integrieren. Dies könnte eine Reduktion des kumulierten Energieaufwands durch verbesserte Energieeffizienz im Betrieb und die Minimierung der grauen Energie der Materialien fördern, ohne das bestehende System zu überfrachten.

Die konkreten Empfehlungen zur Weiterentwicklung sind:

### 1. Berücksichtigung des kumulierten Energieaufwands (erneuerbar und nicht-erneuerbar) sowie des fossilen und biogenen Treibhauspotenzials

Das QNG berücksichtigt bislang nur den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf sowie das gesamte Treibhauspotenzial als Anforderung für Neubauten und Bestandssanierungen. Wie zuvor deutlich wurde, sollte jedoch auch der erneuerbare Primärenergiebedarf sowie die separate Betrachtung des fossilen und biogenen Treibhauspotenzials bzw. der Senkenleistung der Materialien ein Bewertungsindikator sein. Die Bewertung der Senkenleistung von Materialien ist auch die Voraussetzung für eine Förderung von Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen.

### 2. Zusätzliche Förderung für nachwachsende oder dekarbonisierte Materialien

Vor dem Hintergrund des geringeren Energieaufwands, sollte der Einsatz von Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen und emissionsarmen bzw. dekarbonisierten Bauprodukten explizit gefördert werden. Entweder über einen erhöhten Förderkredit oder die Anrechnung auf den Anforderungswert von QNG Plus oder Premium. Dies setzt jedoch die Anpassung der Datengrundlage voraus.

### 3. Einsatz von Sekundärbauteilen ermöglichen

Zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen von Neubauten sowie zur Reduktion von Abfallmengen und Weiternutzung des Gebäudebestands sollte das QNG

<sup>23</sup> Im letzten Jahr wurden ca. 17 % der Wohngebäude nach den Anforderungen des KfN bzw. QNG errichtet. Siehe Förderreport der KfW, [https://www.kfw.de/Presse-Newsroom/Pressematerial/F%C3%B6rderreport/KfW-F%C3%B6rderreport\\_2023.pdf](https://www.kfw.de/Presse-Newsroom/Pressematerial/F%C3%B6rderreport/KfW-F%C3%B6rderreport_2023.pdf)

den Einsatz von Sekundärbauteilen ermöglichen bzw. explizit fördern. Dies setzt jedoch ebenfalls eine Anpassung der Datengrundlage voraus.

#### **4. Anpassung der Datengrundlage**

Zur Berechnung der Ökobilanz ist im QNG eine Tabelle mit vorgegebene Rechenwerten zu verwenden. Diese Tabelle enthält ausgewählte Bauprodukte aus der ÖKOBAUDAT. Eine abweichende Nutzung von herstellerepezifischen oder gebrauchten Bauprodukten ist nicht vorgesehen. Damit für die Eigentümerinnen und Eigentümer jedoch ein Vorteil durch den Einsatz von zirkulären, effizienten oder dekarbonisierten Bauprodukten sowie durch den Einsatz von Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen entsteht, muss die Nutzung von entsprechenden Datensätzen (Herstellerangaben) möglich sein.

Weiterhin ist die Datengrundlage maßgeblich für die Berechnung von Anforderungswerten. Die Rechenwerte des QNG umfassen generische Datensätze, was eine faire Bewertung von Gebäuden ermöglicht. Jedoch können diese Datensätze bedeutend von tatsächlichen Herstellerangaben abweichen. Diese Problematik und eine Alternative werden ausführlich in Kapitel 8.6 thematisiert.

#### **5. Reduktion des Anforderungswertes notwendig**

Um kompatibel mit den Klimaschutzziele zu sein, müssen die THG-Emissionen von Neubauten in den nächsten Jahren deutlich sinken. Das bedeutet, dass auch die Anforderungswerte im QNG reduziert werden müssen. Die Reduktion des Anforderungswertes setzt jedoch zunächst eine umfassende Berücksichtigung der Gebäudetechnik voraus. Bislang werden im QNG u.a. keine Personenaufzüge berücksichtigt und auch die Gebäudetechnik (neben Wärmeversorgung und Lüftung) wird über einen Sockelbetrag abgebildet.

#### **6. Definition eines Anforderungswertes für die Herstellungsphase von Gebäuden (in Verbindung mit Anpassung des GEG)**

Die Herstellung der Bauteile und die Errichtung des Gebäudes verursacht unmittelbare Klimaauswirkungen, die adressiert werden müssen. Dies entspricht auch den Empfehlungen der Science Based Target initiative, nur das zu bilanzieren, was bekannt ist (Le Den *et al.* 2023). Zum Planungszeitpunkt sind alle Phasen des Lebenszyklus' bis auf die Herstellung und Errichtung höchst unsicher. Zudem bilden die in der ÖKOBAUDAT enthaltenen Bauprodukte die Klima- und Umweltauswirkungen der Baustoffe und Materialien unter heutigen Produktionsabläufen, eingesetzten Verfahren und Energieträgern ab. Bauteile, die zu einem späteren Zeitpunkt im Zuge von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen ausgetauscht werden, werden gegebenenfalls unter veränderten Bedingungen produziert und sollten deshalb nicht in einen Anforderungswert einfließen.

Es ist deshalb sinnvoll, einen separaten Anforderungswert, nur für die Herstellungsphase von Gebäuden zu definieren. Für die Errichtung von zielkonformen Gebäuden müsste sich dieser Anforderungswert an den Klimaschutzziele, dem Klimaschutzgesetz und den Vereinbarungen von Paris orientieren.

Ein Anforderungswert nur für die Herstellungsphase sollte jedoch nicht zu einem niedrigen Energieeffizienzstandard von Gebäuden führen. Es empfiehlt sich deshalb, die Anforderungen im GEG an einen klimazielkonformen Energieeffizienzstandard anzupassen, da der Betrieb von Gebäuden bereits in großem Umfang durch das GEG adressiert wird.

Über das QNG hinaus ergeben sich weitere Weiterentwicklung hinsichtlich der BEG und des GEG:

1. Erhöhung der ordnungsrechtlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Neubauten und Bestand, dabei mind. Effizienzhaus-Stufe 40
2. Erhöhung der Fördersätze für die energetische Sanierung
3. Implementierung von Mindestenergieeffizienzstandards für Bestandsgebäude
4. Implementierung des Gebäuderessourcenpasses

## **8.6 Verbesserung der Datengrundlage für die Berechnung der Lebenszyklusemissionen**

Die Arbeiten an der Studie und die Gespräche mit den Experten zeigen die Schwierigkeiten bei der Definition valider Kennwerte aufgrund der aktuellen Datengrundlage sowie die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Anpassung der Anforderungswerte. Als Grundlage für eine Instrumentierung und eine Marktentwicklung zielkonformer Bauweisen und Baustoffe ist die Schaffung von Transparenz unter den relevanten Akteuren im Bau von entscheidender Bedeutung. Technologien wie Building Information Modeling (BIM), Blockchain und die Digitalisierung sollten dabei als Grundlage für eine verbesserte Datenerfassung etabliert werden. Hinsichtlich der Datenverfügbarkeit können Ökobilanzen von Produkten nach ISO 14040 (2021-02), der Product Carbon Footprint nach der EU-Empfehlung oder ISO 14067 und auch Typ-II-Umweltproduktdeklarationen nach ISO 14025, worunter auch Environmental Product Declarations (EPDs) für den Bausektor nach ISO 15804 (2022-03) fallen, verwendet werden. Die Anzahl an EPDs wird weltweit auf ca. 120.000 geschätzt (Anderson 2024) und es kann davon ausgegangen werden, dass Informationen über Umweltindikatoren für Produkte immer leichter verfügbar werden, da Unternehmen im Rahmen der CSRD sukzessive verpflichtet werden, Informationen zu Klima- und Umweltauswirkungen zu erfassen.

Die Berechnungen in dieser Studie basieren wie auch das QNG auf der ÖKOBAUDAT. Die Datenbank enthält eine Vielzahl von frei zugänglichen Datensätzen zu Baustoffen, der technischen Gebäudeausrüstung und Energieträgern. Jedoch finden sich in der ÖKOBAUDAT nur Endergebnisse verschiedener Umweltkategorien und keine Informationen bezüglich der Herstellungsrouten und deren zugrundeliegenden Annahmen. Diese Intransparenz erschwert die Vergleichbarkeit von Ergebnissen. Weiterhin stellen die Berechnungsergebnisse aufgrund der Annahme deutscher Produktionsbedingungen immer nur eine Orientierung dar, da diese Annahme nicht für alle Baustoffe der Realität entspricht.

In Bezug auf die Verarbeitbarkeit der Daten gibt es noch viele Schwierigkeiten. So sind die Referenzflüsse nicht harmonisiert, was zwar hinsichtlich der Eigenschaften der Materialien sinnvoll ist, jedoch zu Mehraufwand bei der Verwendung in Berechnungen führt. Zudem existiert die ÖKOBAUDAT nicht in einem Ökobilanzdatenbanken-Datenformat<sup>24</sup> nach ISO/TS 14048 wie z.B. ecoSpold 2 oder ILCD. Die ÖKOBAUDAT verwendet das ILCD+EPD-Datenformat, welches teilweise das ILCD-Datenformat verwendet und erweitert, um Informationen aus EPDs strukturiert zu speichern und weiterzugeben. Besonders die fehlenden Informationen im ILCD+EPD-Format über prozessbasierte Hintergrunddaten der Produkte ist der Grund dafür, dass dieses Datenformat nicht problemlos in existierende Ökobilanz-Software eingelesen werden kann.

---

<sup>24</sup> Siehe [https://www.oekobaudat.de/fileadmin/downloads/Einreichung/2021-05-19\\_FAQ\\_ILCD-EPD\\_CP-2020\\_A2\\_de\\_final.pdf](https://www.oekobaudat.de/fileadmin/downloads/Einreichung/2021-05-19_FAQ_ILCD-EPD_CP-2020_A2_de_final.pdf)

## 9 Quellenverzeichnis

Anderson, J. (2024): EPD Facts & Figures. ConstructionLCA's 2024 Guide to Environmental Product Declarations (EPD). Aus: ECO Platform. ConstructionsLCA Limited (Hrsg.). <https://www.eco-platform.org/epd-facts-figures.html#:~:text=%22At%20the%20start%20of%20January,registered%20with%20EPD%20Programmes%20globally>, Zuletzt geprüft am: 26.07.2024

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.) (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Bonn. Download unter: [https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer\\_Bauteile/BNB\\_Nutzungsdauern\\_von\\_Bauteilen\\_2017-02-24.pdf](https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

Berkel, M. (2021): Wärmepumpen im Vergleich: Heizen mit Luft, Wasser oder Erdwärme?. co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH. <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/waermepumpe/waermepumpe-arten-im-vergleich/>, Zuletzt geprüft am: 07.06.2024

BIB - Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (Hrsg.) (2022): Zahl der Privathaushalte und durchschnittliche Haushaltsgröße in Deutschland (1871-2021). Wiesbaden. Download unter: [https://www.bib.bund.de/DE/Fakten/Fakt/pdf/L49-Privathaushalte-Haushaltsgroesse-ab-1871.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bib.bund.de/DE/Fakten/Fakt/pdf/L49-Privathaushalte-Haushaltsgroesse-ab-1871.pdf?__blob=publicationFile&v=5), Zuletzt geprüft am: 14.11.2023

Bischof, J. (2022): Nichtwohngebäude-Typologie Deutschland. Fraunhofer IWU - Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik. Chemnitz. Download unter: [https://github.com/IWUGERMANY/Nichtwohngebäude-Typologie-Deutschland/blob/main/2022\\_IWU\\_NWG\\_Typologie\\_V2-2.xlsm](https://github.com/IWUGERMANY/Nichtwohngebäude-Typologie-Deutschland/blob/main/2022_IWU_NWG_Typologie_V2-2.xlsm), Zuletzt geprüft am: 17.07.2024

Blanck, R.; Zimmer, W. (2021): Klimaschutzinstrumente im Verkehr. Umgestaltung der Kfz-Steuer: Bonus-Malus-System. Für Mensch und Umwelt 10/2021. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier\\_bonus-malus-system\\_kliv.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier_bonus-malus-system_kliv.pdf)

Blandini, L.; Kovaleva, D.; Nething, C.; Nigl, D.; Smirnova, M.; Strahm, B.; Eppinger, E.; Teichmann, A. (2023): Leicht bauen mit Beton – ausgewählte Forschungsarbeiten des ILEK – Teil 1: Materialeleichtbau. Beton- und Stahlbetonbau 118(5), S. 310-319. Download unter: <https://doi.org/10.1002/best.202300025>, Zuletzt geprüft am: 09.09.2024

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.) (2023): Energiedaten (bislang unveröffentlicht). Berlin. Download unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>, Zuletzt geprüft am: 13.11.2023

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.) (2024): Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe. Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Download unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/leitmaerkte-fuer-klimafreundliche-grundstoffe.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=22](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/leitmaerkte-fuer-klimafreundliche-grundstoffe.pdf?__blob=publicationFile&v=22), Zuletzt geprüft am: 09.09.2024

BMWSB - Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.) (2023a): Anhang 3.1.1 zur Anlage 3. Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude. Berlin. Download unter: [https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG\\_Handbuch\\_Anlage-3\\_Anhang-311\\_LCA\\_Bilanzregeln-WNG\\_v1-3.pdf](https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-311_LCA_Bilanzregeln-WNG_v1-3.pdf), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

BMWSB - Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.) (2023b): Handreichung: Holzbauinitiative. Strategie der Bundesregierung zur Stärkung des Holzbaus als ein wichtiger Beitrag für ein klimagerechtes und ressourceneffizientes Bauen. Berlin. Download unter: [https://www.bmwbsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/holzbauinitiative.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwbsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/holzbauinitiative.pdf?__blob=publicationFile&v=4), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

BMWSB - Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.) (2023c): Handbuch Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude. Siegeldokument der Gewährleistungsmarken „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude PLUS“ und „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude PREMIUM“. Berlin. Download unter: [https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG\\_Handbuch\\_v1-2.pdf](https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG_Handbuch_v1-2.pdf), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

Bundesgesetzblatt (Hrsg.) (1977): Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung - WärmeschutzV)

Bundesregierung (2022): Klimaschutzgesetz. Generationenvertrag für das Klima. Berlin. Download unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672?view=renderNewsletterHtml>, Zuletzt geprüft am: 22.01.2024

Caduff, M.; Huijbregts, M.A.J.; Koehler, A.; Althaus, H.J.; Hellweg, S. (2014): Scaling Relationships in Life Cycle Assessment. The Case of Heat Production from Biomass and Heat Pumps. Yale University, New Haven. Download unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12122>, Zuletzt geprüft am: 18.09.2024

Cischinsky, H.; Diefenbach, N.; in Zusammenarbeit mit Beer, A.; Born, R.; Calisti, J.; Lohmann, G.; Nowak, I.; Nuss, G.; Rodenfels, M. (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. 1. Auflage, IWU - Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt. Download unter: [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebäudebestand/prj/2018\\_IWU\\_CischinskyEtDiefenbach\\_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebäudebestand/prj/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH (Hrsg.) (2018): Ökologisch dämmen in der Kommune. Warum ökologisches Dämmen sinnvoll ist und wie Kommunen es voranbringen können: Ein Leitfaden für eine kommunale Förderung ökologischer Dämmstoffe. Berlin. Download unter: <https://www.co2online.de/fileadmin/nd/Dokumente/leitfaden-oekologisch-daemmen-in-der-kommune.pdf>, Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

Dechantsreiter, U.; Horst, P.; Mettke, A.; Asmus, S.; Schmidt, S.; Knappe F.; Reinhardt, J.; Theis S.; Lau, J.J. (2014): Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertiger Verwertung von Baustoffen. Im Auftrag des Umweltbundesamt. Texte 93/2015. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_93\\_2015\\_wiederverwertung\\_von\\_bauteilen\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_93_2015_wiederverwertung_von_bauteilen_0.pdf)

dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) (2023): Dena-Gebäudereport 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand. Berlin. Download unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2023/dena-Gebaedereport\\_2024.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2023/dena-Gebaedereport_2024.pdf), Zuletzt geprüft am: 16.05.2024

Deurer, J.; Friedrichsen, N.; Bunnenberg, L.; Haller, J.; Lösch, O. (2023): Wechselwirkungen des Gebäudesektors mit anderen Sektoren des Klimaschutzgesetzes. Endbericht. IREES – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH, Karlsruhe. Download unter: [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/jahr/2022/klimaschutzsektoren/04-endbericht.pdf;jsessionid=2CB3EE13E5ACC89099B2F84EDAF86131.live21323?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/jahr/2022/klimaschutzsektoren/04-endbericht.pdf;jsessionid=2CB3EE13E5ACC89099B2F84EDAF86131.live21323?__blob=publicationFile&v=12), Zuletzt geprüft am: 06.09.2024

DGNB – Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Hrsg.) (2023): ESG-Verifikation zur EU-Taxonomie: Neubau. Stuttgart. Download unter: [https://www.dgnb.de/filestorages/Downloads\\_unprotected/dokumente/anforderungen-der-eu-taxonomie-neubau.pdf](https://www.dgnb.de/filestorages/Downloads_unprotected/dokumente/anforderungen-der-eu-taxonomie-neubau.pdf), Zuletzt geprüft am: 06.09.2024

Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.D. (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen

Wohngebäudebestand. 1. Auflage, IWU - Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt. Download unter: [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/datenbasis/Endbericht\\_Datenbasis.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/datenbasis/Endbericht_Datenbasis.pdf), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

DIN 1946-6:2019-12 - Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung. Ausgabe: 2019-12. DOI: 10.31030/3113944

DIN 276:2018-12 - Kosten im Bauwesen. Ausgabe 2018-12. DOI: 10.31030/2873248

DIN 277:2021-08 - Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau. Ausgabe 2021-08. DOI: 10.31030/3278234

DIN EN ISO 14040:2021-02 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Ausgabe: 2021-02. DOI: 10.31030/3179655

DIN EN ISO 14044:2021-02 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. Ausgabe: 2021-02. DOI: 10.31030/3179656

DIN EN 15804:2022-03 - Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Ausgabe: 2022-03. DOI: 10.31030/3294005

DIN EN 15978:2012-10 - Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011. Ausgabe: 2012-10. DOI: 10.31030/1917049

DIN EN 16449:2014-06 - Holz und Holzprodukte - Berechnung des biogenen Kohlenstoffgehalts im Holz und Umrechnung in Kohlenstoffdioxid; Deutsche Fassung EN 16449:2014. Ausgabe: 2014-06. DOI: 10.31030/2057915

DIN EN ISO 14024:2018-06 - Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltkennzeichnung Typ I - Grundsätze und Verfahren (ISO 14024:2018); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14024:2018. Ausgabe: 2018-06. DOI: 10.31030/2847909

DIN EN ISO 6946:2018-03 - Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2017. Ausgabe: 2018-03. DOI: 10.31030/2518301

DIN SPEC 91484:2023-09 - Verfahren zur Erfassung von Bauprodukten als Grundlage für Bewertungen des Anschlussnutzungspotentials vor Abbruch- und Renovierungsarbeiten (Pre-Demolition-Audit); Ausgabe: 2023-09. DOI: 10.31030/3482521

DIN V 18599-1:2018-09 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. Ausgabe: 2018-09. DOI: 10.31030/2874317

Enseling, A.; Grafe, M.; Krapp M.C. (2020): Studie über die wirtschaftlichen Auswirkungen verschiedener energetischer Standards in Augsburg. IWU - Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt. Download unter: [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/handlungslogiken/2020\\_IWU\\_EnselingEtAl\\_Studie-ueber-die-wirtschaftlichen-Auswirkungen-verschiedener-energetischer-Standards-in-Augsburg.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/handlungslogiken/2020_IWU_EnselingEtAl_Studie-ueber-die-wirtschaftlichen-Auswirkungen-verschiedener-energetischer-Standards-in-Augsburg.pdf), Zuletzt geprüft am: 06.09.2024

EU-RL – Richtlinie 2024/1275 des europäischen Parlaments und des Rates vom 24.04.2024 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

EU-V - Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088

Feist, W. (2006): Lüftung und Luftfeuchtigkeit – Zusammenhänge verständlich erklärt. Passivhaus Institut, Darmstadt. Download unter: [https://passiv.de/former\\_conferences/Passivhaus\\_D/Lueftung\\_Luftfeuchte.html](https://passiv.de/former_conferences/Passivhaus_D/Lueftung_Luftfeuchte.html), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) (2020a): Absatzvolumen von Dämmstoffen in Deutschland. Gülzow-Prüzen. Download unter: <https://mediathek.fnr.de/absatzvolumen-von-dammstoffen-in-deutschland-2019.html>, Zuletzt geprüft am: 24.04.2023

FNR - Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (Hrsg.) (2020b): Weg frei für mehr Natur-Dämmstoffe beim Bauen. <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/weg-frei-fuer-mehr-natur-daemmstoffe-beim-bauen>, Zuletzt geprüft am: 25.07.2024

Fritsche, U.R.; Greß, H.W. (2022): Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG- Emissionen des deutschen Strom-mix im Jahr 2021 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050. Bericht für die HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V.. Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und – strategien GmbH, Darmstadt. Download unter: <https://www.hea.de/assets/hea/pdf/allgemein/iinas-studie-2022.pdf>, Zuletzt geprüft am: 01.07.2024

Gebäude-Energieberater (Hrsg.) (2024): Verband klagt über schwache Sanierungsrate. <https://www.geb-info.de/expertenwissen/verband-klagt-ueber-schwache-sanierungsrate>, Zuletzt geprüft am: 19.07.2024

Habert, G.; Röck, M.; Steininger, K.; Lupisek, A.; Birgisdottir, H.; Desing, H.; Chandrakumar, C.; Pittau, F.; Passer, A.; Rovers, R.; Slavkovic, K.; Hollber, A.; Hoxha, E.; Jusselme, T.; Nault, E.; Allacker, K.; Lützkendorf, T. (2020): Carbon budgets for buildings: harmonising temporal, spatial and sectoral dimensions. *Buildings and Cities* 1(1), S. 429–452, London. Download unter: <https://journal-buildingscities.org/articles/10.5334/bc.47>, Zuletzt geprüft am: 28.06.2024. DOI: 10.5334/bc.47

Harthan, R.O.; Förster, H.; Borkowski K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz W.K.; Hennenberg, K.; Jansen, L.L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Matthes, F.C.; Mendelewitsch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Repenning, J.; Scheffler, M.; Steinbach, I.; Bei der Wieden M.; Wiegmann, K.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Rohde, C.; Yu, S.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Fuß, R.; Rock, J.; Osterburg, B.; Rüter, S.; Adam, S.; Dunger, K.; Rösemann, C.; Stümer, W.; Tiemeyer, B.; Vos, C. (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. *Climate change* 2023 (39). Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2023-fuer-deutschland>, Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz (Hrsg.) (o.J.a): Baunetz\_Wissen\_Dämmstoffe. A/V-Verhältnis. Aus: Baunetz Wissen. <https://www.baunetzwissen.de/glossar/a/a-v-verhaeltnis-724354>, Zuletzt geprüft am: 16.05.2024

Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz (Hrsg.) (o.J.b): Berechnen der Norm-Heizlast (Wärmebedarf). Aus: Baunetz Wissen. <https://www.baunetzwissen.de/heizung/fachwissen/waermebedarf/berechnen-der-norm-heizlast-waermebedarf-161074>, Zuletzt geprüft am: 19.07.2024

Hinz, E. (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Endbericht. IWU- Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt. Download unter: [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/handlungslogiken/2015\\_IWU\\_Hinz\\_Kosten-energierelevanter-Bau-und-Anlagenteile-bei-der-energetischen-Modernisierung-von-Altbauten.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/handlungslogiken/2015_IWU_Hinz_Kosten-energierelevanter-Bau-und-Anlagenteile-bei-der-energetischen-Modernisierung-von-Altbauten.pdf), Zuletzt geprüft am: 28.0.2024

Hörner, M.; Cischinsky, H.; Bischof, J.; Schwarz, S.; Behnisch, M.; Meinel, G.; Spars, G.; Busch, R. (2022): Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude. ENOB: dataNWG. Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland. IWU- Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt. Download unter: <https://datanwg.de/downloads/schlussbericht/>, Zuletzt geprüft am: 13.12.2022

Hottgenroth Software (2023): Energieberater Wohnen & Gewerbe Vollversion. Köln. Download unter: <https://www.hottgenroth.de/M/SOFTWARE/EnergieNachweise/Energieberater-18599-3D/Seite.html,73274,80422>

IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hrsg.) (2020): Ökobilanzierung. <https://ibu-epd.com/oekobilanzierung/>, Zuletzt geprüft am: 09.03.2021

Klingler, M.; Kasser, U.; Savi, D.; Primas, A.; Stettler, Y.; Gujer, P. (2014): Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen. Sach- und Ökobilanzen von sechzehn verschiedenen Gebäuden in den Bereichen Wohnen, Büro, Schulen und Altersheime. Bundesamt für Energie, Bern. Download unter: [https://www.dflca.ch/inventories/Baumaterial/BfU\\_B&H\\_2014-Oekobilanzdaten\\_Lueftungs-\\_und\\_Waermeanlagen.pdf](https://www.dflca.ch/inventories/Baumaterial/BfU_B&H_2014-Oekobilanzdaten_Lueftungs-_und_Waermeanlagen.pdf), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

Kümpel, N. (2023): Die Luft-Luft-Wärmepumpe – Heizen mit Abwärme. WEGATECH GREENERGY GMBH, Köln. <https://www.wegatech.de/ratgeber/luft-luft-waermepumpe/>, Zuletzt geprüft am: 07.06.2024

Le Den, X.; Caspani, M.; Steinmann, J.; Ryberg, M.; Lauridsen, K. (2023): A 1.5°C Pathway for the Global Buildings Sector's Embodied Emissions. Pathway Development Description – Draft. Science Based Targets initiative, London. Download unter: [https://sciencebasedtargets.org/resources/files/DRAFT\\_SBTi\\_Embodied-carbon-pathway-development-description.pdf](https://sciencebasedtargets.org/resources/files/DRAFT_SBTi_Embodied-carbon-pathway-development-description.pdf), Zuletzt geprüft am: 31.07.2024

Mahler, B.; Idler, S.; Nusser, T.; Gantner, J. (2019): Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus. Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 132/2019. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://egs-plan.de/web/images/magazin/PDF-Dateien/2019-10-29\\_texte\\_132-2019\\_energieaufwand-gebaeudekonzepte.pdf](https://egs-plan.de/web/images/magazin/PDF-Dateien/2019-10-29_texte_132-2019_energieaufwand-gebaeudekonzepte.pdf), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

Mendelevitch, R.; Repenning, J.; Matthes, F.C.; Deurer, J. (2024): Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland – Rahmendaten. Im Auftrag des Umweltbundesamt. Treibhausgas-projektionen für Deutschland. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionsbericht\\_2024\\_rahmendatenpapier.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionsbericht_2024_rahmendatenpapier.pdf), Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

Meyer, R.; Fuchs, N.; Thomsen, J.; Herkle, S.; Kost, C (2024): Analyse: Heizkosten und Treibhausgasemissionen in Bestandswohngebäuden – Aktualisierung auf Basis der GEG-Novelle 2024. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam. Download unter: <https://doi.org/10.48485/pik.2023.028>, Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

Müller, A. (2015): Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock. Technische Universität Wien, Wien. Download unter: [https://www.invert.at/Dateien/Dissertation\\_AndreasM.pdf](https://www.invert.at/Dateien/Dissertation_AndreasM.pdf), Zuletzt geprüft am: 18.09.2024

Neitz-Regett, A.; Wohlschlager, D.; Westphal, P.L.; Leidert, C. (2022): Info: Was ist eigentlich die EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten? Aus: FfE - Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.. <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/info-was-ist-eigentlich-die-eu-taxonomie-fuer-nachhaltige-aktivitaeten/>, Zuletzt geprüft am: 23.07.2024

Neufert, E. (2022): Bauentwurfslehre. 43. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden

PI – Presseinformation der Europäischen Kommission vom 30.11.2022: European Green Deal: Commission proposes certification of carbon removals to help reach net zero emissions. Download unter: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_7156](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_7156), Zuletzt geprüft am: 12.11.2023

PI – Presseinformation des BWP – Bundesverband Wärmepumpe e.V. vom 17.01.2023: Wärmepumpenabsatz 2022: Wachstum von 53 Prozent gegenüber dem Vorjahr.

<https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/waermepumpenabsatz-2022-wachstum-von-53-prozent-gegenueber-dem-vorjahr/#content>, Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

PI – Presseinformation des ZSW – Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg vom 20.10.2021: Wärmepumpen mit Algorithmen effizienter und netzdienlicher betreiben. Neues Verfahren reduziert Lastspitzen in Stromverteilnetzen. Stuttgart. Download unter: <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/waermepumpen-mit-algorithmen-effizienter-und-netzdienlicher-betreiben.html>, Zuletzt geprüft am: 23.06.2024

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität, Berlin. Download unter: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-vollversion#downloads>, Zuletzt geprüft am: 28.06.2024

Ramseier, L.; Frischknecht, R. (2020): Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt. BBSR-Online-Publikation 2020 (17). BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn. Download unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020.html>, Zuletzt geprüft am: 01.07.2024

Rau, D; Lettow, F; Thamling N (2024): Auf die Zukunft bauen: So rechnen sich Sanierungen. Wirtschaftlichkeitsrechnungen von Sanierungen bei Bestandsgebäuden. WWF Deutschland (Hrsg.), Berlin. Download unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/studie-auf-die-zukunft-bauen-so-rechnen-sich-sanierungen.pdf>, Zuletzt geprüft am: 06.09.2024

Reinhardt, J; Veith, C; Knappe, F; Mellwig, P (2022): Der Gebäudebestand steht vor einer Sanierungswelle – Dämmstoffe müssen sich den Materialkreislauf erschließen. Endbericht. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg. Download unter: <https://www.ifeu.de/publikation/der-gebaeudebestand-steht-vor-einer-sanierungswelle-daemmstoffe-muessen-sich-den-materialkreislauf-erschliessen/>, Stand 01.07.2024

Repenning, J; Harthan, R; Blanck, R; Böttcher, H; Braungardt, S; Bürger, V; Cook, V; Emele, L; Göckeler, K; Görz, WK; Hacker, F; Hennenberg, K; Jörß, W; Kasten, P; Kreye, K; Ludig, S; Matthes, FC; Moosmann L; Nissen, C; Reise, J; Scheffler, M; Schumacher, K; Wiegmann, K; Zerrahn, A; Brugger, H; Fleiter, T; Mandel, T; Rehfeldt, M; Rohde, C; Deurer, J; Steinbach, J (2023): Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030. UBA – Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzinstrumente-szenario-2030-kis-2030-zur>, Zuletzt geprüft am: 31.07.2024

Rother, S.; Schuberth, J.; Steinbrenner, J.; Bade, M.; Bertram, A.; Herda, I.; Herbstritt, C.; Lünenbürger, B.; Mohr, L.; Purr, K.; Rau, C.; von Schlippenbach, U.; Sieck, L.; Unnerstall, H. (2020): 13 Thesen für einen treibhausgasneutralen Gebäudebestand. Drängende Herausforderungen der Wärmewende. Position. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/13-thesen-treibhausgasneutrale-gebaeude>

Schnieders, J. (2022): Passivhaus-Definition. Aus: PASSIPEDIA - Die Wissensdatenbank. <https://passipedia.de/grundlagen/passivhaus-definition>, Zuletzt geprüft am: 17.05.2024

Schubert, S.; Bartke, S; Becken, K.; Breitmeier, M.; Brozowski, F.; DeTroy, S.; Grimski, D.; Ilvonen, O.; Keßler, H.; Messner, D.; Meilinger, V; von Schlippenbach, U; Schröder, A; Schuberth, J (2023): Umwelt und Klima schützen – Wohnraum schaffen – Lebensqualität verbessern. Empfehlungen von UBA und KNBau für einen nachhaltigen Wohnungs- und Städtebau. 2. Auflage. Position, Mai 2023. Dessau-Roßlau. Download unter:

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023\\_uba\\_pos\\_wohnraumschaffung\\_bf\\_2auflage.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_uba_pos_wohnraumschaffung_bf_2auflage.pdf), Zuletzt geprüft am: 01.07.2024

Statista (2024): Durchschnittliche jährliche Treibhausgasbilanz pro Person in Deutschland (konsumbasiert; in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent; Zuletzt geprüft am: 2021).

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1275275/umfrage/treibhausgasbilanz-pro-person/>, Zuletzt geprüft am: 07.06.2024

Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2012): Bestand und Struktur der Wohneinheiten - Wohnsituation der Haushalte. Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010. Wiesbaden

Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2022): Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff - Lange Reihen von 1980 bis 2021. Wiesbaden. Download unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautatigkeit/baugenehmigungen-baustoff-pdf-5311107.html>, Zuletzt geprüft am: 31.10.2023

Steinbach, J. (2016): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe. Download unter: <https://www.verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Modellbasierte-Untersuchung-von-Politikinstrumenten-zur-Foerderung-erneuerbarer-Energien-und-Energieeffizienz-im-Gebaeudebereich/245046>, Zuletzt geprüft am: 01.07.2024

Steinbach, J.; Deurer, J.; Senkpiel, C.; Brandes, J.; Heilig, J.; Berneiser, J.; Kost, C. (2021): Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050. BBSR-Online-Publikation 2021 (23). BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn. Download unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-23-2021.html>, Zuletzt geprüft am: 01.07.2024

Steinbach, J.; Schultmann, F. (2015): Sanierung des deutschen Gebäudebestandes auf unterschiedliche Effizienzstandards - gesamtwirtschaftliche Investitionen und Energieeinsparungen. IEWT – Internationale Energiewirtschaftstagung 2015 (9). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe. Download unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/0fdf5265-c31e-4bd6-a00a-709541d0a361/details>, Stand 01.07.2024

UBA - Umweltbundesamt (2023): Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen pro Person in Deutschland durchschnittlich? <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-hoch-sind-die-treibhausgasemissionen-pro-person>, Zuletzt geprüft am: 07.06.2024

UNEP - United Nations Environment Programme (Hrsg.) (2022): 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi. Download unter: <http://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>, Zuletzt geprüft am: 10.01.2024

Vogdt, F.U.; Fischer, D.; Schaudienst, F.; Schober, M. (2019): Leitfaden Recyclingpotential von Mineralwolle. BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn. Download unter: <https://www.irbnet.de/daten/rswb/19089008967.pdf>, Zuletzt geprüft am: 01.07.2024

Wagner, F. (Hrsg.) (2017): Bonus-Malus-System. In: Gabler Versicherungswörterbuch. 2. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden

Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.) (o.J.): LESS – Low Emission Steel Standard. Aus: stahl-online. <https://www.stahl-online.de/less/>, Zuletzt geprüft am: 22.04.2024

Wolff, A.; Rüter, S. (2019): Stärkung nachwachsender Rohstoffe am Dämmstoffmarkt. Ergebnisbroschüre. Deutsche Umwelthilfe e.V., Berlin; Thünen-Institut für Holzforschung, Hamburg. Download unter:

[https://www.duh.de/fileadmin/user\\_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/Ergebnisbroschuere\\_StaRDaemm\\_191217\\_Web.pdf](https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/Ergebnisbroschuere_StaRDaemm_191217_Web.pdf), Zuletzt geprüft am: 01.07.2024

## A Anhang

### A.1 Flächen und Rauminhalte

**Tabelle 29: Gliederung der Flächen und Rauminhalte im Hochbau**

Typ	Beschreibung
Bruttogrundfläche	Gesamtfläche aller Grundrissebenen des Bauwerks
Nettogrundfläche	Teilfläche der Bruttogrundfläche die sämtliche Grundflächen der aufgehenden Baukonstruktionen des Bauwerks umfasst
Konstruktionsfläche	Teilfläche der Bruttogrundflächen die sämtliche Grundflächen der nutzbaren Räume aller Grundrissebenen des Bauwerks umfasst
Verkehrsfläche	Teilfläche der Nettogrundfläche für die horizontale und vertikale Verkehrserschließung des Bauwerks
Wohnfläche	In Wohngebäuden entspricht die Wohnfläche der Nutzfläche
Nutzfläche	Teilfläche der Nettogrundfläche die der wesentlichen Zweckbestimmung des Bauwerks dient

Quelle: DIN 277:2021-08, Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau, 2021

**Tabelle 30: Faktoren zur Umrechnung der Bruttogrundfläche auf Wohn- und Nutzfläche**

Gebäudetyp	Faktor zur Umrechnung
Einfamilienhäuser	0,72
Mehrfamilienhäuser	0,75
Schulen	0,71
Büro-/Verwaltungsgebäude	0,71
Verkaufsgebäude	0,75

Quelle: Eigene Berechnungen Schulze-Darup

**Tabelle 31: Wohnfläche in Bestandsgebäuden nach Gebäudetyp und Baualtersklasse**

Typ	Baualtersklasse	Wohnfläche
EFH	bis 1918	132,6
EFH	1919-1948	132,6
EFH	1949 - 1957	134,7
EFH	1958 - 1968	134,7
EFH	1969 - 1978	134,7

Typ	Baualtersklasse	Wohnfläche
EFH	1979 - 1983	86,9
EFH	1984 - 1994	86,9
EFH	1995 - 2001	177,2
EFH	2002 - 2004	177,2
EFH	2005 - 2008	177,2
RH	bis 1918	155,2
RH	1919-1948	155,2
RH	1949 - 1957	157,5
RH	1958 - 1968	157,5
RH	1969 - 1978	157,5
RH	1979 - 1983	101,6
RH	1984 - 1994	101,6
RH	1995 - 2001	207,3
RH	2002 - 2004	207,3
RH	2005 - 2008	207,3
KMH	bis 1918	211,1
KMH	1919-1948	211,1
KMH	1949 - 1957	364,3
KMH	1958 - 1968	364,3
KMH	1969 - 1978	364,3
KMH	1979 - 1983	269,4
KMH	1984 - 1994	269,4
KMH	1995 - 2001	386,5
KMH	2002 - 2004	386,5
KMH	2005 - 2008	386,5
MMH	bis 1918	735,9
MMH	1919-1948	735,9
MMH	1949 - 1957	641,1
MMH	1958 - 1968	641,1

Typ	Baualtersklasse	Wohnfläche
MMH	1969 - 1978	641,1
MMH	1979 - 1983	448,8
MMH	1984 - 1994	448,8
MMH	1995 - 2001	741,3
MMH	2002 - 2004	741,3
GMH	bis 1918	2151,3
GMH	1919-1948	2151,3
GMH	1949 - 1957	797,0
GMH	1958 - 1968	797,0
GMH	1969 - 1978	797,0
GMH	1979 - 1983	479,8
GMH	1984 - 1994	479,8
GMH	1995 - 2001	1100,0

Quelle: Eigene Berechnungen IREES

## A.2 Wärmeübergangswiderstände nach Bauteilen

**Tabelle 32: Wärmeübergangswiderstand R**

Bauteil	Innen	Außen
Bodenplatte	0,17	0
Außenwand	0,13	0,04
Dach	0,1	0,1
Oberste Geschossdecke	0,13	0,04
Kellerdecke	0,13	0,04
Satteldach	0,1	0,1
Flachdach	0,1	0,1
Kellerwand	0,17	0

### A.3 Datenbank an Baustoffen für opake Bauteile

**Tabelle 33: Übersicht über die Wärmeleitfähigkeit (Bemessungswert) und der Nutzungsdauer verschiedener Materialien**

Materialbezeichnung in der ÖKOBAUDAT	Wärmeleitfähigkeit	Lebensdauer
Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS)	0,038	40
Hanfvlies	0,043	40
Holzfaserdämmstoffplatte Trockenverfahren (Durchschnitt DE)	0,04	40
Expandierter Kork	0,045	40
Mineralwolle (Boden-Dämmung)	0,045	40
Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)	0,035	40
Mineralwolle (Flachdach-Dämmung)	0,035	40
Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung)	0,035	40
Mineralwolle (Schrägdach-Dämmung)	0,035	40
PIR Hartschaum	0,026	40
Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff	0,039	40
Dachziegel	0,75	60
Trockenestrich (Gipsfaserplatte, 25 mm)	0,36	60
Gipsfaserplatte (10mm)	32	40
Gussasphaltestrich	0,9	60
Kalk-Gips-Innenputz	0,7	40
Kalk-Innenputz	0,87	40
Kalksandstein	1,1	80
Kunstharzputz	0,7	40
Mauerziegel (mit Dämmstoff gefüllt)	0,09	80
Mauerziegel (ungefüllt)	0,14	80
Recycling Transportbeton C30/37	1,4	80
Recycling Transportbeton C20/25	1,15	80
Transportbeton C30/37	1,4	80
Transportbeton C20/25	1,15	80

Materialbezeichnung in der ÖKOBAUDAT	Wärmeleitfähigkeit	Lebensdauer
Porenbeton P2 04 unbewehrt	0,07	80
Porenbeton P4 05 unbewehrt	0,12	80
Zementestrich	1,4	60
Kalkzement Putzmörtel	0,87	40
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,13	80
Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	0,13	80
Brettsperrholz (Durchschnitt DE)	0,13	80
Oriented Strand Board (Durchschnitt DE)	0,13	80
Spanplatte (generisch)	0,14	80
Sperrholzplatte (generisch)	0,13	80
Brettschichtholz Nadelholz (generisch)	0,13	80
Konstruktionsvollholz (generisch, 15% Feuchte / 13% H2O)	0,13	80
Brettschichtholz, Balkenschichtholz, Verbundbauteile aus Brettschichtholz	0,13	80
Dampfbremse PE	0,4	40
Stahlprofil verzinkt (Elektrolichtbogenroute, hoher Schrottanteil)	50	40
WDVS Verklebung und Beschichtung Kunstharzputz	0,7	40
Armierung (Kunstharzspachtel)	0,8	40
Bitumenbahnen V 60	0,23	60
STEICO joist/wall Stegträger	0,078	80
Putzmörtel-Wärmedämmputz	0,065	40
Schotter 16/32	1	80
Bewehrungsstahl	50	80
Perlite 0-3	0,05	40
Aluminiumblech	160	60
EPS-Hartschaum (grau, Rohdichte 20 bis 25 kg/m <sup>3</sup> )	0,032	40
EPS-Hartschaum (grau, Rohdichte 15 kg/m <sup>3</sup> )	0,032	40
FASBA e.V. GaBi Baustroh	0,049	40

Materialbezeichnung in der ÖKOBAUDAT	Wärmeleitfähigkeit	Lebensdauer
Flachsvlies	0,04	40
Dampfbremse PET gitterverstärkt	0,4	40
Faserzementplatte (Fassade)	0,59	60
Furnierschichtholz (generisch)	0,13	60

Quelle: (BBSR, 2017,eigene Darstellung IREES)

#### A.4 Datenbank an Baustoffen für transparente Bauteile

**Tabelle 34: Übersicht über die Wärmeleitfähigkeit und der Nutzungsdauer verschiedener Materialien**

Materialbezeichnung in der ÖKOBAUDAT	U-Werte [in W/ (m <sup>2</sup> ·K)]	Lebensdauer [in Jahren]
Dreifachverglasung	5	40
Isolierglas 2-Scheiben	0,53	30
Flügelrahmen PVC-U	1,12	40
Blendrahmen PVC-U	1,16	40
Aluminium-Rahmenprofil, thermisch getrennt, pulverbeschichtet	1,16	40
Aluminium-Flügelrahmenprofil, thermisch getrennt, pulverbeschichtet	0,71	40
Aluminium-Flügelrahmenprofil, pulverbeschichtet	0,71	40
Aluminium-Rahmenprofil, pulverbeschichtet	1,17	40
Holz-Flügelrahmen	1,17	40
Holz-Blendrahmen	0,99	40

Quelle: UBAKUS

#### A.5 Faktoren zur Berechnung von inhomogenen Bauteilen

**Tabelle 35: Faktoren zur Berechnung der Fläche von inhomogenen Bauteilen**

Bauweise	Bauteil/Bezugsfläche	Bauteilkategorie	Material	Faktor
Holzleichtbau und Holz-Skelettbauweise	Außenwand	Installationsebene	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,067
Holzleichtbau	Außenwand	Tragwerk	Brettschichtholz Nadelholz (generisch) und	0,091

Bauweise	Bauteil/Bezugsfläche	Bauteilkategorie	Material	Faktor
			Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	
Holzleichtbau, Holz-Skelettbauweise und Massivholzbau	Außenwand	Tragwerk	STEICO joist/wall Stegträger	0,032
Beton-Skelettbau	Außenwand	Skelett	TransportbetonC30/37	0,15
Holz-Skelettbau	Außenwand	Skelett	Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	0,15
Alle	Leichte Innenwände	Tragwerk	Stahlprofil verzinkt (Elektrolichtbogenroute, hoher Schrottanteil)	0,001
Alle	Leichte Innenwände	Tragwerk	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,091
Holzleichtbau, Massivholz und Holz-Skelettbau	tragende Innenwände	Tragwerk	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,091
Beton-Skelettbau	tragende Innenwände	Skelett	TransportbetonC30/37	0,05
Holz-Skelettbau	tragende Innenwände	Skelett	Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	0,011
Holzleichtbau	Geschossdecke	Tragwerk	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,110
Holzleichtbau	Geschossdecke	Installationsebene	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,067
Holzleichtbau	Flachdach	Installationsebene	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,096
Holzleichtbau und Massivholzbau	Flachdach	Tragwerk	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,11
Alle	Flachdach	Abdeckung	Aluminiumblech	0,01
Alle	Satteldach	Lattung	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,11
Alle	Satteldach	Tragwerk	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,057

Bauweise	Bauteil/Bezugsfläche	Bauteilkategorie	Material	Faktor
Alle	Satteldach	Konterlattung	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,06

Quelle: UBAKUS, Annahmen im Rahmen des Projekts

**Tabelle 36: Faktoren zur Berechnung des Volumens von inhomogenen Bauteilen**

Bauweisen	Bauteil	Bauteilkategorie	Material	Faktor
Beton-Skelettbau	Außenwand	Bewehrung des Skeletts	Bewehrungsstahl	0,03
Beton-Skelettbau	tragende Innenwände	Bewehrung des Skeletts	Bewehrungsstahl	0,03
Beton-Skelettbau	Geschossdecke	Tragwerk	Bewehrungsstahl	0,03
Beton-Skelettbau	Flachdach	Unterzüge	Bewehrungsstahl	0,03
Beton-Skelettbau	Flachdach	Unterzüge	TransportbetonC30/37	0,06
Holz-Skelettbau	Geschossdecke	Unterzüge	Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	0,06
Holz-Skelettbau	Flachdach	Unterzüge	Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	0,06
Alle (EFH)	Bodenplatte	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,03
Alle (MFH und NWG)	Bodenplatte	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,05
Alle (EFH)	Geschossdecke	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,03
Alle (MFH und NWG)	Geschossdecke	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,05
Alle (EFH)	Kellerwand	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,03
Alle (MFH und NWG)	Kellerwand	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,05
Alle (EFH)	Außenwand	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,03
Alle (MFH und NWG)	Außenwand	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,05
Alle (EFH)	Flachdach	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,03
Alle (MFH und NWG)	Flachdach	Bewehrung	Bewehrungsstahl	0,05

Quelle: UBAKUS, Annahmen im Rahmen des Projekts

## A.6 Aufbau der Bauteile von Bestandsgebäuden

**Tabelle 37: Verschiedenen Optionen zum Aufbau der Bauteile von Bestandsgebäuden**

Bauteil	Variante	Material
Außenwand	Wärmedämmverbundsystem mit EPS	EPS-Hartschaum
Außenwand	Wärmedämmverbundsystem mit EPS	Armierung
Außenwand	Wärmedämmverbundsystem mit EPS	WDVS Verklebung und Beschichtung Kunstharzputz
Außenwand	Wärmedämmverbundsystem mit EPS	Kalkzement Putzmörtel
Außenwand	Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolle	Steinwolle Flachdämmplatte
Außenwand	Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolle	Armierung
Außenwand	Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolle	WDVS Verklebung und Beschichtung Kunstharzputz
Außenwand	Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolle	Kalkzement Putzmörtel
Außenwand	WDVS mit Holzfaserdämmplatte	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren
Außenwand	WDVS mit Holzfaserdämmplatte	Armierung
Außenwand	WDVS mit Holzfaserdämmplatte	WDVS Verklebung und Beschichtung Kunstharzputz
Außenwand	WDVS mit Holzfaserdämmplatte	Kalkzement Putzmörtel
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Zellulosefasern	Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Zellulosefasern	Brettschichtholz Nadelholz
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Zellulosefasern	Gipsfaserplatte
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Zellulosefasern	Lehmputz
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Holzfaser-Einblasdämmstoff	Holzfaser-Einblasdämmstoff
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Holzfaser-Einblasdämmstoff	Brettschichtholz Nadelholz
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Holzfaser-Einblasdämmstoff	Gipsfaserplatte
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Holzfaser-Einblasdämmstoff	Lehmputz
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Baustroh	FASBA e.V. GaBi Baustroh

Bauteil	Variante	Material
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Baustroh	Brettschichtholz Nadelholz
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Baustroh	Armierung
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Baustroh	WDVS Verklebung und Beschichtung Kunstharzputz
Außenwand	Konstruktion aus Brettschichtholz mit Baustroh	Lehmputz
Außenwand	Konstruktion aus Doppel-T-Trägern mit Baustroh	FASBA e.V. GaBi Baustroh
Außenwand	Konstruktion aus Doppel-T-Trägern mit Baustroh	STEICO joist/wall Stegträger
Außenwand	Konstruktion aus Doppel-T-Trägern mit Baustroh	Armierung
Außenwand	Konstruktion aus Doppel-T-Trägern mit Baustroh	WDVS Verklebung und Beschichtung Kunstharzputz
Außenwand	Konstruktion aus Doppel-T-Trägern mit Baustroh	Lehmputz
Steildach	Komplettsanierung mit XPS	Dampfbremse PE
Steildach	Komplettsanierung mit XPS	Extrudierter Polystyrol Dämmstoff
Steildach	Komplettsanierung mit XPS	Konstruktionsvollholz
Steildach	Komplettsanierung mit XPS	Dachziegel
Steildach	Komplettsanierung mit PIR	Dampfbremse PE
Steildach	Komplettsanierung mit PIR	PIR Hartschaum
Steildach	Komplettsanierung mit PIR	Konstruktionsvollholz
Steildach	Komplettsanierung mit PIR	Dachziegel
Steildach	Komplettsanierung mit Holzfaserdämmplatten	Dampfbremse PE
Steildach	Komplettsanierung mit Holzfaserdämmplatten	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren
Steildach	Komplettsanierung mit Holzfaserdämmplatten	Konstruktionsvollholz
Steildach	Komplettsanierung mit Holzfaserdämmplatten	Dachziegel
Steildach	Komplettsanierung mit Holzfaser-Einblasdämmstoff	Dampfbremse PE
Steildach	Komplettsanierung mit Holzfaser-Einblasdämmstoff	Gipsfaserplatte

Bauteil	Variante	Material
Steildach	Komplettsanierung mit Holzfaser-Einblasdämmstoff	Holzfaser-Einblasdämmstoff
Steildach	Komplettsanierung mit Holzfaser-Einblasdämmstoff	Konstruktionsvollholz
Steildach	Komplettsanierung mit Holzfaser-Einblasdämmstoff	Dachziegel
Steildach	Komplettsanierung mit EPS	Dampfbremse PE
Steildach	Komplettsanierung mit EPS	EPS-Hartschaum
Steildach	Komplettsanierung mit EPS	Konstruktionsvollholz
Steildach	Komplettsanierung mit EPS	Dachziegel
Steildach	Komplettsanierung mit Mineralwolle	Dampfbremse PE
Steildach	Komplettsanierung mit Mineralwolle	Mineralwolle
Steildach	Komplettsanierung mit Mineralwolle	Konstruktionsvollholz
Steildach	Komplettsanierung mit Mineralwolle	Dachziegel
Steildach innen	Innendämmung mit Mineralwolle	Mineralwolle
Steildach innen	Innendämmung mit Baustroh	FASBA e.V. GaBi Baustroh
Flachdach	Komplettsanierung mit Holzfaserdämmplatten	Dampfbremse PE
Flachdach	Komplettsanierung mit Holzfaserdämmplatten	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren
Flachdach	Komplettsanierung mit Holzfaserdämmplatten	Bitumenbahnen V 60
Flachdach	Komplettsanierung mit Holzfaserdämmplatten	Aluminiumblech
Flachdach	Komplettsanierung mit XPS	Dampfbremse PE
Flachdach	Komplettsanierung mit XPS	Extrudierter Polystyrol Dämmstoff
Flachdach	Komplettsanierung mit XPS	Bitumenbahnen V 60
Flachdach	Komplettsanierung mit XPS	Aluminiumblech
Flachdach	Komplettsanierung mit Schaumglas	Dampfbremse PE
Flachdach	Komplettsanierung mit Schaumglas	FOAMGLAS F
Flachdach	Komplettsanierung mit Schaumglas	Bitumenbahnen V 60
Flachdach	Komplettsanierung mit Schaumglas	Aluminiumblech
Flachdach	Komplettsanierung mit PIR	Dampfbremse PE
Flachdach	Komplettsanierung mit PIR	PIR Hartschaum
Flachdach	Komplettsanierung mit PIR	Bitumenbahnen V 60

Bauteil	Variante	Material
Flachdach	Komplettsanierung mit PIR	Aluminiumblech
Flachdach	Komplettsanierung mit Mineralwolle	Dampfbremse PE
Flachdach	Komplettsanierung mit Mineralwolle	Mineralwolle
Flachdach	Komplettsanierung mit Mineralwolle	Bitumenbahnen V 60
Flachdach	Komplettsanierung mit Mineralwolle	Aluminiumblech
Geschossdecke begehbar	Holzfaser-Einblasdämmstoff	Holzfaser-Einblasdämmstoff
Geschossdecke begehbar	Holzfaser-Einblasdämmstoff	Dampfbremse PE
Geschossdecke begehbar	Holzfaser-Einblasdämmstoff	Oriented Strand Board
Geschossdecke	Flachs	Dampfbremse PE
Geschossdecke	Flachs	Flachsvlies
Geschossdecke	Holzfaserdämmplatte	Dampfbremse PE
Geschossdecke	Holzfaserdämmplatte	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren
Geschossdecke begehbar	Zellulose-Einblasdämmstoff	Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff
Geschossdecke begehbar	Zellulose-Einblasdämmstoff	Dampfbremse PE
Geschossdecke begehbar	Zellulose-Einblasdämmstoff	Oriented Strand Board
Geschossdecke begehbar	Mineralwolle	Dampfbremse PE
Geschossdecke begehbar	Mineralwolle	Mineralwolle
Geschossdecke begehbar	Mineralwolle	Oriented Strand Board
Geschossdecke begehbar	EPS	Dampfbremse PE
Geschossdecke begehbar	EPS	EPS-Hartschaum
Geschossdecke begehbar	EPS	Oriented Strand Board
Geschossdecke begehbar	Hanf	Dampfbremse PE
Geschossdecke begehbar	Hanf	Hanfvlies

Bauteil	Variante	Material
Geschossdecke begehbar	Hanf	Oriented Strand Board
Bodenplatte bzw. Keller	XPS	Bitumenbahnen V 60
Bodenplatte bzw. Keller	XPS	Extrudierter Polystyrol Dämmstoff
Bodenplatte bzw. Keller	Schaumglas	Bitumenbahnen V 60
Bodenplatte bzw. Keller	Schaumglas	FOAMGLAS S3
Fenster	Kunststofffenster	Fenster - TMP Fenster+Türen GmbH - Fenster aus Kunststoff
Fenster	Kunststofffenster	Fenster - TMP Fenster+Türen GmbH - Fenster aus Kunststoff
Fenster	Tür aus Kunststoff	Fenster - TMP Fenster+Türen GmbH - Fenstertüren aus Kunststoff
Fenster	Tür aus Kunststoff	Fenster - TMP Fenster+Türen GmbH - Fenstertüren aus Kunststoff

## A.7 Heizwärmebedarf und installierte Leistung von Nichtwohngebäuden

**Tabelle 38: Heizwärmebedarf und installierte Leistung der verschiedenen Nichtwohngebäudetypen und Energiestandards**

Energiestandard	Gebäudetyp	Heizwärmebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]	Leistung [kW]
GEG 2023	Verkaufsgebäude	130	44
GEG 2023	Verwaltung	41	62
GEG 2023	Schule	44	81
EH 55	Verkauf	102	33
EH 55	Verwaltung	28	49
EH 55	Schule	28	68
EH 40	Verkauf	90	29
EH 40	Verwaltung	25	46
EH 40	Schule	24	54
Passivhaus	Verkauf	20	19
Passivhaus	Verwaltung	16	25
Passivhaus	Schule	15	45

## A.8 Beispielrechnung

Folgend wird die Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der THG-Emissionen zum Verständnis des Python-Modells beispielhaft dargestellt. Dazu wird der Energiestandard „Passivhaus“ und das Material „Kalk-Innenputz“ des Bauteils „Außenwand“ auf den Indikator des erneuerbaren Primärenergieverbrauch (PERE) näher betrachtet. Die folgend dargestellten Rechenschritte führt das Python-Modell für alle Materialien und Indikatoren durch.

1. Auswahl der parameterbestimmenden Faktoren: Gebäudetyp, Heizsystem, Bauweise, Variante, Energiestandard
  - a. Hier ausgewählt: Einfamilienhaus, Luft-Wärmepumpe, Massivbau duo, Variante 7, Passivhaus
2. Klimaauswirkungen der Lüftungs- und Heizungstechnik ergeben sich aus den unter 1) gewählten Faktoren
3. Einlesen der zu erfüllenden bauteilspezifischen Wärmedurchgangskoeffizienten für den ausgewählten Energiestandard
4. Einlesen des Aufbaus der definierten Bauteile. Die Bauteildicke des Tragwerks wurde im Voraus festgelegt. Lediglich die Dicke des eingesetzten Dämmmaterials (hier: EPS-Hartschaum) ist variabel und richtet sich nach dem gewählten Energiestandard.
5. Die Dicke der Außenwand ergibt sich aus der Summe aller Bauteile. Vorläufig beträgt die Dicke 0,32016 m.
6. Die Fläche der Außenwand ergibt sich aus der Länge (12 m), der Breite (8,5 m) und der Höhe (3 m) des untersuchten Gebäudetyps (hier: Einfamilienhaus) und beträgt ca. 250 m<sup>2</sup>.
7. Der Wärmeleitkoeffizient wird berechnet und mit dem zu erfüllenden U-Wert verglichen. Ergibt sich ein zu hoher tatsächlicher U-Wert wird die Dicke der Dämmung des Bauteils um 0,01 m erhöht. Dieser Schritt wird wiederholt bis sich der tatsächliche und zu erfüllende U-Wert gleichen. In diesem Rechenbeispiel müssen 0,21 m Dämmung hinzugefügt werden und es ergibt sich eine endgültige Dicke der Außenwand von 0,438 m.
8. Der erneuerbare Primärenergieverbrauch des Materials ergibt sich aus dem Volumen und dem zugehörigen Eintrag aus der ÖKOBAUDAT.
  - a. Das Volumen des Materials ergibt sich aus der Fläche der Außenwand und der Dicke des Kalk-Innenputzes. Es beläuft sich auf 1,8925 m<sup>3</sup>.
  - b. Der spezifische erneuerbare Primärenergieverbrauch für Kalk-Innenputz beläuft sich auf 289,11 MJ/m<sup>3</sup>.
  - c. Der erneuerbare Primärenergieverbrauch des Materials ergibt sich somit zu 547,14 MJ.
9. Im letzten Schritt wird der Indikator auf die Wohnfläche und Jahr bezogen. Dazu muss die Nutzungsdauer des Materials und die Wohnfläche herangezogen werden.
  - a. Die Nutzungsdauer des Materials ist definiert und beträgt 40 Jahre.
  - b. Die Wohnfläche errechnet sich aus dem Faktor Wohn-/Nutzfläche (hier 0,72), der Fläche des Hauses (hier: 102m<sup>2</sup>) und der Anzahl der Geschosse (hier: 2). Sie ergibt sich zu 146,88 m<sup>2</sup>.

- c. Er ergibt sich ein spezifischer erneuerbarer Primärenergieverbrauch von 0,02587 kWh/a\*m<sup>2</sup>.

## A.9 Zusammenfassung des Fachgesprächs

Im Rahmen des Projektes hat ein (Online-) Fachgespräch mit Experten und Expertinnen stattgefunden, um die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ergebnisse vorzustellen und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Es waren Teilnehmende aus der Praxis (Architekturbüros, Energieberatung) und Politik (Ministerien, wissenschaftliche Institute) anwesend.

### Ablauf des Fachgesprächs:

1. Vorstellung des Projektes
2. Präsentation der Ergebnisse, unterschieden nach Neubau und Bestandssanierung und unterschieden nach Energiestandards, Bauweisen und Gebäudetypen
3. Diskussion von Handlungsempfehlungen bzw. konkreten politischen Instrumenten zur Adressierung des kumulierten Energieaufwands

### Zentrale Erkenntnisse:

- ▶ Energieeffizienz in der Nutzungsphase von Gebäuden ist weiterhin der zentrale Hebel zur Reduktion des Primärenergieaufwands und der THG-Emissionen von Gebäuden
  - Ertüchtigung des Gebäudebestands hat den größten Hebel für Klimaschutz
  - Maximale Heizlast als Indikator zur Bewertung von Gebäuden heranziehen
  - Fokus der Förderung sollte auf Bestandssanierungen liegen, da Verhältnis des Energieaufwands in der Herstellungsphase zur Nutzungsphase bei energetischer Sanierung im Bestand deutlich niedriger als bei Neubauten
- ▶ Der Energieaufwand in der Herstellungsphase von Gebäuden hat je nach Bauweise entscheidende Anteile am Primärenergieaufwand und den THG-Emissionen und gewinnt bei zunehmender Energieeffizienz im Betrieb an Bedeutung:
  - Deutliche Unterschiede bei den Bauweisen und Materialien:
    - Im Neubau hat die Holzleichtbauweise bei gleichen Energiestandards den geringsten kumulierten Energieaufwand
    - Vergleich nachwachsender und fossiler Baustoffe bei der Sanierung im Bestand zeigt, dass nachwachsende Rohstoffe nicht immer besser sind; Ergebnis hängt von den betrachteten Umweltindikatoren ab
  - Speicherfähigkeit der Materialien bzw. Einlagerung von Kohlenstoff sollte ein zentrales Förderkriterium sein
  - Förderung von nachwachsenden/biogenen/ recyclingfähigen und recycelten Rohstoffen notwendig (dafür auch weitere Forschung und Entwicklung notwendig)
  - Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Sektoren des Klimaschutzgesetzes, die Dekarbonisierung der Industrie ist damit insbesondere von den Entwicklungen im Baubereich abhängig (Einsatz von energie-intensiven Materialien wie Stahl und Zement)
- ▶ Die Förderung und das Angebot von klimafreundlichen Bauprodukten ist preisbasierten Instrumenten wie dem EU-ETS vorzuziehen

- Vorschriften an Hersteller von Bauprodukten bzgl. Berichterstattung der Klimawirkung
- Anpassung der Bauverordnungen, insbesondere bzgl. Verwendung von recycelten und biogenen Materialien
- ▶ Datengrundlage bestimmt über die Ergebnisse
  - Valide Kennwerte sind aufgrund der derzeitigen Datengrundlage schwierig zu definieren, dauerhafte Korrektur der Anforderungswerte wäre notwendig
  - Herstellerbasierte Auskunft für alle Baustoffe vorzuziehen, dafür verpflichtende Berichterstattung zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Bauprodukten
  - Mindestanforderung an Baustoffe anhand von Grenzwerten / Benchmark
- ▶ Flächenbezug der Ökobilanzierung von Gebäuden begünstigt größere Bauten, andere Bezugsgröße wie Personen könnte diskutiert werden
- ▶ Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude ist nicht ausreichend etabliert und komplex
  - Ökobilanzierung und nachhaltiges Bauen noch nicht in der Breite angekommen
  - Klare Anforderungen auf Klimaschutz fokussiert, keine Vermischung von Fördertatbeständen
  - Alternativvorschlag: Definition eines Grenzwerts für die Herstellungsphase
    - Entkopplung der Nutzungs- und Herstellungsphase in finanzieller Förderung bzw. Ordnungsrecht
    - Reduktion auf einen Grenzwert wie im QNG nicht ausreichend, besser einen für die Nutzungsphase und einen für die Herstellung der Gebäudekomponenten

## A.10 Modellbeschreibung Invert/ee-Lab

### INVERT/ee-Lab Modellbeschreibung und INVERT-Agents

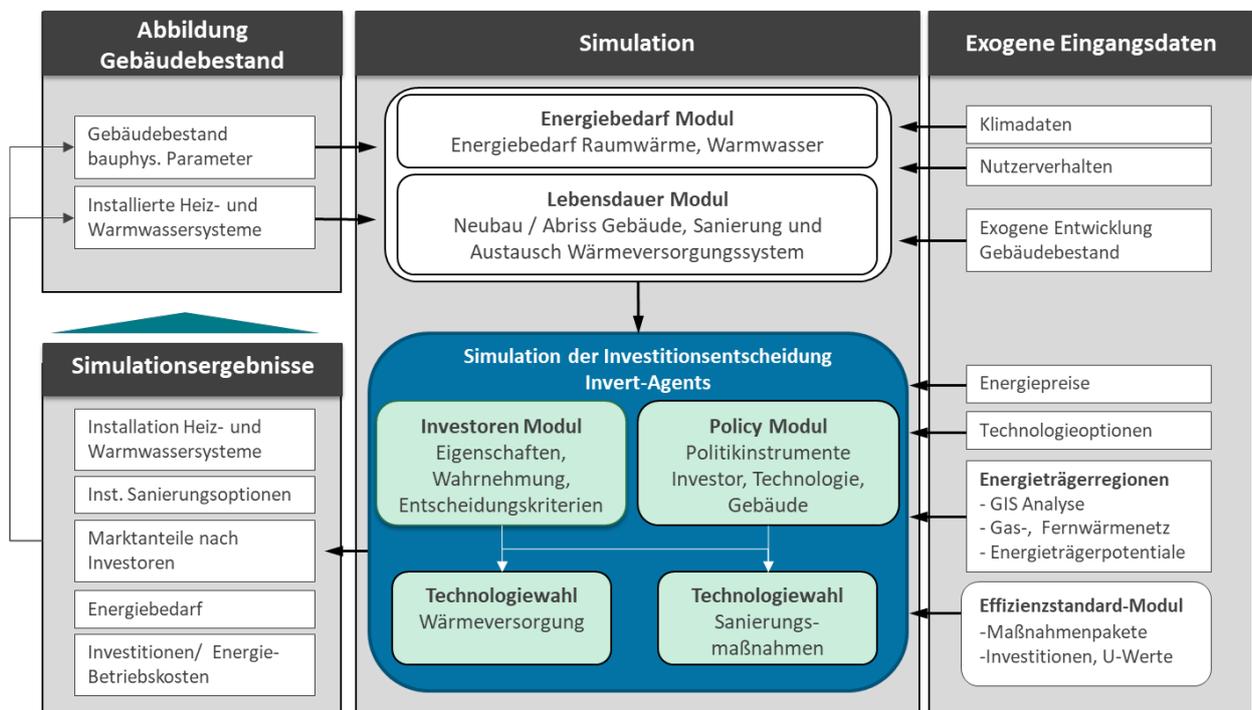
Methodisch stellt Invert/EE-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, techno-ökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden können (Abbildung 52). Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Techniken zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die Investitionsentscheidung in Techniken und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen im Modul INVERT-Agents ermittelt (Steinbach 2016).

Mit INVERT/EE-Lab ist es möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und Ausgestaltungsvarianten auf den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren. Im Rahmen des Forschungsprojektes *Diffusion EE* wird das Modell, um den Bereich der Intermediäre als zentrale Change Agents erweitert, um den Einfluss auf die Investitionsentscheidung im Gebäudebereich abzubilden.

Für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes erneuerbarer Energien im Gebäudebereich werden u.a. folgende relevante Zusammenhänge im Modell abgebildet:

- ▶ Berücksichtigung von investorenspezifischen Hemmnissen und Kalkülen bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen.
- ▶ Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, hier besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Bereitstellungstechniken. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.
- ▶ Die Modellierung der Energiebereitstellung aus solarthermischen Anlagen erfolgt auf monatlicher Basis unter Berücksichtigung der entsprechenden solaren Einstrahlung. Zudem wird entsprechend der Geometrie der Referenzgebäude, die den solarthermischen Anlagen zur Verfügung stehende Dachfläche im Modell berücksichtigt.
- ▶ Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Effizienzmaßnahmen wie Investitionszuschüsse (Marktanreizprogramm), Nutzungspflichten (EEWärmeG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technik- und gebäudespezifisch (Neubau, Bestand, öffentliche Gebäude) definiert.
- ▶ Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der Limitierung erneuerbarer Energieträger über definierte Kostenpotenziale inklusive deren Entwicklung über den Simulationszeitraum.

Abbildung 52: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab

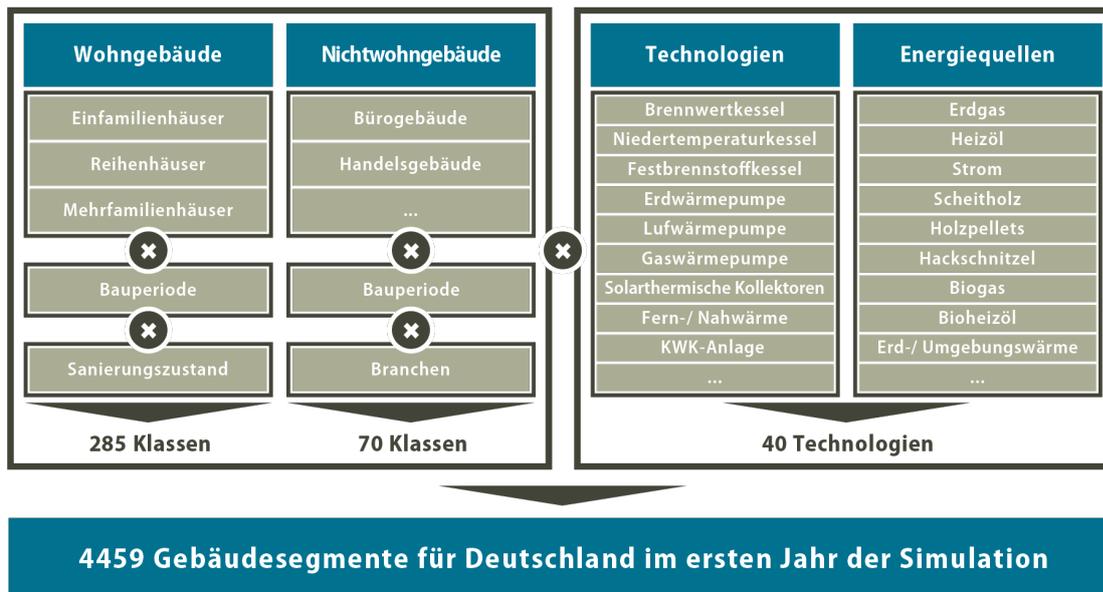


Quelle: (Steinbach 2016)

### Gebäudetypologische Abbildung von Referenzgebäuden und Wärmeversorgungstechniken

Derzeit werden 40 verschiedene Techniken zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser unterschieden, welche über detaillierte technische und ökonomische Daten abgebildet werden.

Abbildung 53: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab



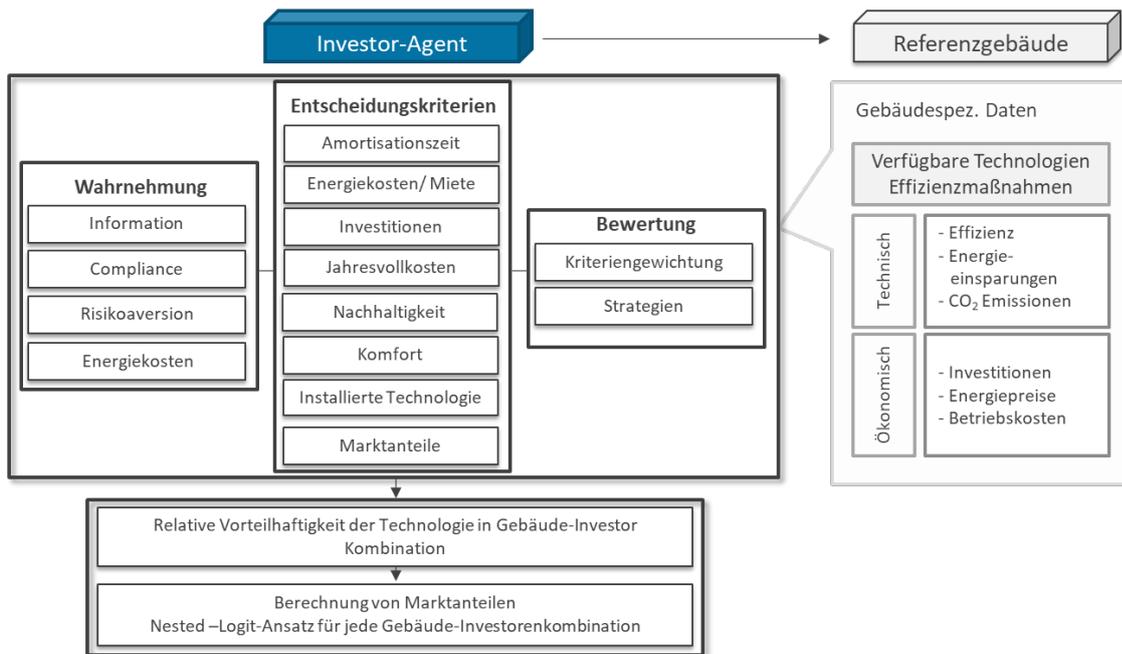
Quelle: (Steinbach 2015)

Die Referenzgebäudetypologie mit den entsprechenden Zuordnungen von Gebäuden und Techniken wird auf Basis der Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Cischinsky & Diefenbach, 2018) und deren Aktualisierung aus dem Jahr 2018. Die Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden basiert auf den Daten aus dem Projekt dataNWG: Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (<https://www.datanwg.de>). Der aus der Modellrechnung resultierende Energiebedarf ist auf die temperaturbereinigten Werte der Anwendungsbilanzen sowie der EE-Wärmebereitstellung nach AGEE-Stat kalibriert.

### Modellierung von Investoren im Gebäudebereich

Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer, Private Vermieter, Eigentümergemeinschaften, Wohnungsbaugesellschaften, gewerbliche Gebäudebesitzer*. Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nicht – ökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technikoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, andererseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technikoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technikoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt werden.

**Abbildung 54: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten**

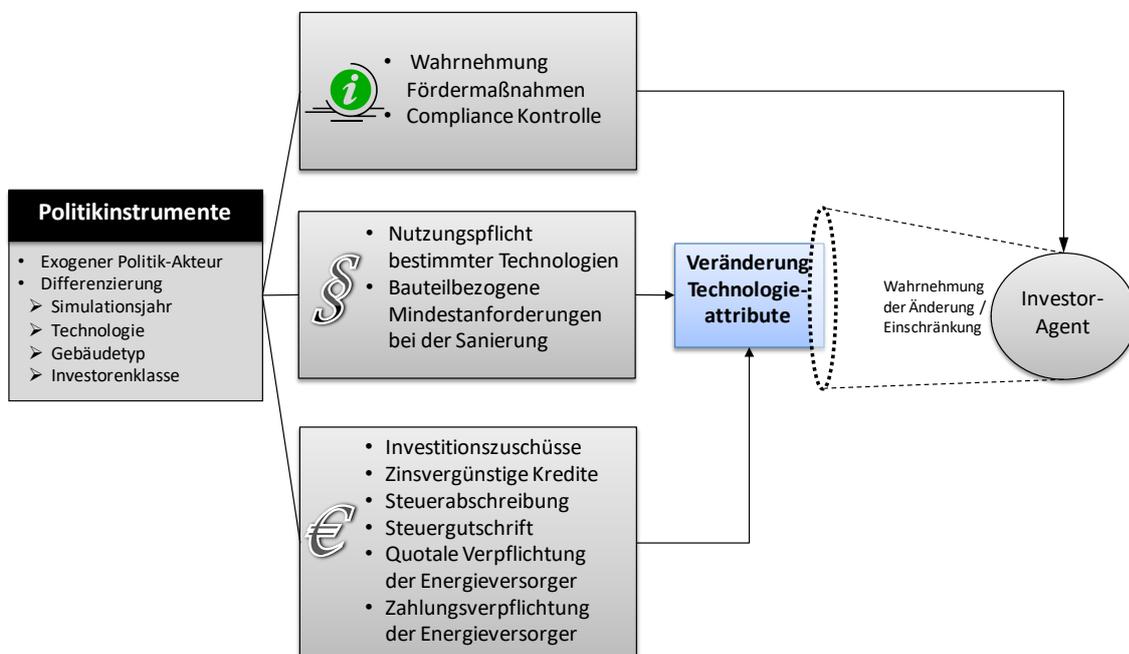


Quelle: (Steinbach 2015)

### Modellierung von Politikinstrumenten

Um die Wirkung der Politikinstrumente auf die Investitionsaktivität in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme zu untersuchen, werden diese explizit im Modell abgebildet. Dies geschieht als integrale Modellierung von Politikinstrumenten und Investoren, die eine aktorenspezifische Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen sollen (Steinbach 2015)

**Abbildung 55: Modellierung von Politikinstrumenten in Invert/ee-Lab**



Quelle: (Steinbach 2015)

Die Politikinstrumente und deren Ausgestaltung werden zunächst aus Sicht eines Politik-Akteurs für jedes Simulationsjahr exogen definiert. Dabei werden Förder- und Anforderungsbedingungen nach den adressierten Techniken und Maßnahmen sowie den Adressaten – Investorenklassen und Gebäudetypen differenziert. Ordnungsrechtliche und finanzielle Fördermaßnahmen verändern die Attribute der Technikalternativen oder schränken die Wahlmöglichkeiten durch Nutzungspflichten oder Mindestanforderungen ein. In Abhängigkeit der definierten Investor-Agenten werden diese Veränderungen oder Einschränkungen bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt. Ein Investitionszuschuss beispielsweise verändert die relative Vorteilhaftigkeit einer Technik hinsichtlich des Attributes Investitionen, wobei dies nicht zwangsläufig der wahrgenommenen Attributausprägung eines Investor-Agenten entspricht. Informatorische Maßnahmen wiederum wirken indirekt auf die Attribute der Wahlmöglichkeiten, indem die investorenspezifische Wahrnehmung verändert wird.

### Quellen Modell:

Kranzl, Lukas, Marcus Hummel, Andreas Müller, and Jan Steinbach. 2013. "Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments." *Energy Policy* 59:44–58. Retrieved June 10, 2013 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513002280>).

Lukas Kranzl, Filippos Anagnostopoulos, Eric Aichinger, Andreas Müller, Dan Staniaszek, Jan Steinbach, and Agne Toleikyte. 2016. "ENERGY SAVING COST CURVES FOR THE CASE OF THE GERMAN BUILDING STOCK." in *14. Symposium Energieinnovation an der Technische Universität Graz*. Graz, Austria Retrieved (<https://www.tugraz.at/events/eninnov/nachlese/download-beitraege/stream-f/#c36892>).

Müller, Andreas. 2015. "Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water : A Case Study for the Austrian Building Stock." Technische Universität Wien.

Steinbach, Jan. 2015. *Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich*. edited by Fraunhofer ISI. Stuttgart: Fraunhofer Verlag Retrieved (<https://www.verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Modellbasierte-Untersuchung-von-Politikinstrumenten-zur-Förderung-erneuerbarer-Energien-und-Energieeffizienz-im-Gebäudebereich/245046>).

Webseite Modell: [www.invert.at](http://www.invert.at)

### Quellen Datengrundlage Gebäude

Cischinsky, Holger, Nikolaus Diefenbach, and Markus Rodenfels. 2018. Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der Auswertungsdatenbank.

Clausnitzer, Klaus-Dieter, Malte Jahnke, Clemens Rohde, and Jan Steinbach. 2015. Datenerhebung Gebäudebestand – Erfassung von statistischen Basisdaten zum Nichtwohngebäudebestand und empirische Analyse der energetischen Qualität ausgewählter Gebäudetypen. Band II : Mengengerüst Nichtwohngebäude u . energetische Eigenschaften.

Diefenbach, Nikolaus, Holger Cischinsky, Markus Rodenfels, and Klaus-Dieter Clausnitzer. 2010. Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt (IWU).

Schlomann, Barbara, Jan Steinbach, Heinrich Kleeberger, Bernd Geiger, Antje Pich, Edelgard Gruber, Michael Mai, and Werner Schiller Andreas Gerspacher. 2014. Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) für die Jahre 2004 bis 2006. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag Retrieved (<https://portal.dnb.de/opac.htm?method=simpleSearch&cqlMode=true&query=idn%3D1049801253>).

IWU et al (2020). Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (dataNWG). [www.dataNWG.de](http://www.dataNWG.de)