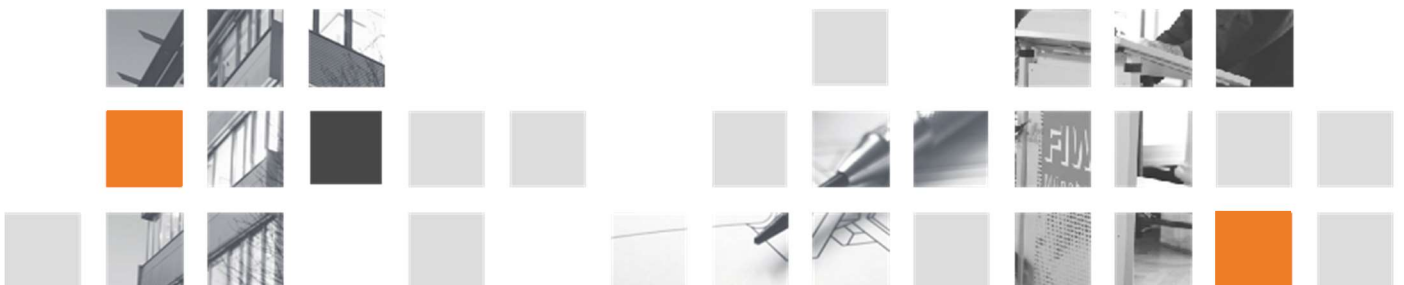


Graue Energie von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie-Gebäudestandard

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm
Dipl.-Ing. Florian Kagerer

Im Auftrag von:
DGfM Service GmbH
Kochstraße 6-7
10969 Berlin



 **FIW München**

Forschungsbericht: FO 2019-02

Forschungsbericht: FO 2019-02

Graue Energie von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie-Gebäudestandard

Im Auftrag von:
DGfM Service GmbH
Kochstraße 6-7
10969 Berlin

Der Bericht umfasst:

- 39 Seiten
- 15 Abbildungen
- 8 Tabellen

Eine auszugsweise Veröffentlichung ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des FIW München zulässig.

Gräfelfing, den 29. Januar 2019

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm Christoph Sprengard

Florian Kagerer

Inhaltsverzeichnis

1	Das wesentliche in Kürze	3
2	Problemstellung	6
3	Was versteht man unter „Grauer Energie“?	8
4	Typengebäude Einfamilienhaus	13
4.1	Baukonstruktion	14
	A) Außenwände	14
	B) weitere Bauteile der Gebäudehülle - Dach, Kellerdecke, Fenster und Tür	17
4.2	Versorgungstechnik	18
5	Spezifische Betrachtung von Bauteilen und Versorgungssystemen	19
5.1	Außenwandkonstruktionen	19
5.2	Versorgungssysteme	20
6	Gesamtbetrachtung der Grauen Energie	22
6.1	Gesamte Gebäudehülle	22
6.2	Anteil der Gebäudehülle an gesamter Grauer Energie	23
6.3	Anteil der Außenwand an gesamter Grauer Energie	23
7	Auswirkung einer Anhebung der Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz in Sinne eines zukünftigen Niedrigstenergiegebäudes	25
7.1	Außenwandkonstruktionen	25
7.2	Vergleich mit möglicher Energieeinsparung	29
8	Fazit	32
9	Literaturverzeichnis	35
10	Abbildungsverzeichnis	36
11	Tabellenverzeichnis	38

1 Das wesentliche in Kürze

Die klimapolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung sehen im Gebäudesektor für künftige Neubauten einen energetischen Standard vor, der den Anforderungen an ein Niedrigstenergie-Gebäudestandard gemäß EU-Richtlinien entsprechen soll. Künftig wird dazu das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG) als Zusammenführung der relevanten Normen (Energieeinsparverordnung - EnEV, Erneuerbaren-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG, Energieeinsparungsgesetz - EnEG) den gesetzlichen Rahmen definieren. In der Diskussion zur Definition künftiger Anforderungen wird in diesem Kontext häufig darauf verwiesen, dass mit zunehmendem energetischem Standard auch die Relevanz der Grauen Energie, also jener Energiebedarf, der nötig war, um die Materialien herzustellen, an die Baustelle zu transportieren und zu verbauen, an Bedeutung gewinnt. In der Vergangenheit lag der Fokus aller Bemühungen darauf den Primärenergiebedarf für Beheizung und Warmwasserversorgung eines Wohngebäudes zu reduzieren. Hier sind in den letzten Jahrzehnten Gebäude entstanden, die nur noch einen minimalen Primärenergiebedarf für den Betrieb aufweisen. Außerhalb der Bilanzierung liegen sowohl der Primärenergiebedarf für den Nutzerstrom als auch die Graue Energie. Dadurch, dass der Primärenergiebedarf für den Betrieb immer geringer geworden ist, steigt der Anteil der Grauen Energie im Verhältnis zu den Primärenergiebedarfen für Nutzerstrom und Betrieb stetig an. Abbildung 1 zeigt diese qualitative Entwicklung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes im Laufe der Zeit.

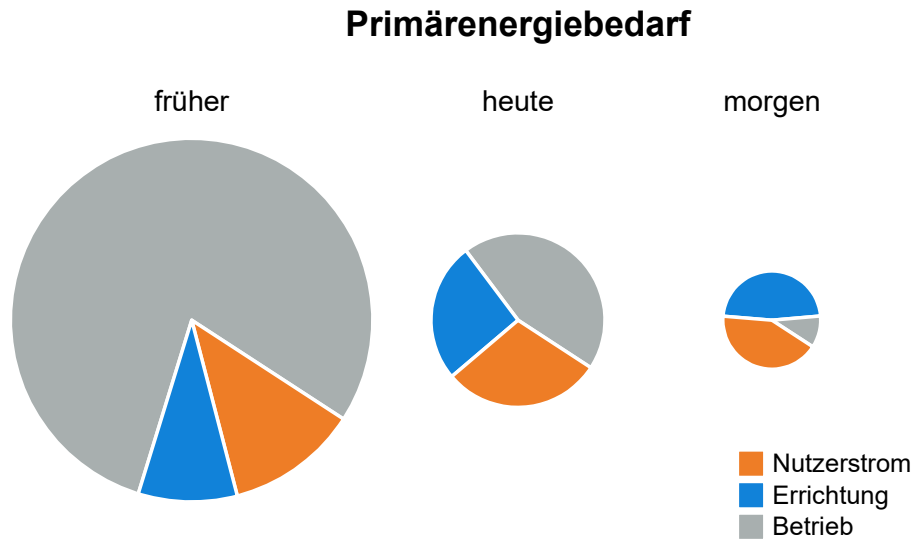


Abbildung 1: Qualitative Entwicklung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes im Laufe der Zeit. Dargestellt sind die absoluten Anteile für Nutzerstrom, Raumwärme inkl. Warmwasser (Betrieb) sowie der Primärenergieeinsatz des Gebäudes für die Herstellungsphase der verwendeten Bauprodukte (Errichtung) bei Annahme einer Nutzungsdauer von 50 Jahren.

In der Diskussion zur Definition künftiger Anforderungen wird in diesem Kontext immer wieder auf die Relevanz des Themas „Graue Energie“ hingewiesen. Damit wird, trotz fehlender genauer Definition, in der Regel die Energiemenge bezeichnet, die für die vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbei-

tungsprozesse, und die Entsorgung inklusive Transporte und Hilfsmittel notwendig ist. In vorliegender Untersuchung wurde anhand eines typischen Einfamilienhauses der Aufwand an Grauer Energie für unterschiedliche Außenwandsysteme in Massiv- und Holzbauweise sowie in unterschiedlicher thermischer Qualität ermittelt. Die Ergebnisse zeigen:

a) *Die zusätzliche Energieeinsparung ist größer als der Mehreinsatz an Grauer Energie*

Die zunehmenden energetischen Anforderungen bedeuten in der Regel Konstruktionen mit höherem Materialbedarf. Dennoch wird der damit verbundene leicht höhere Aufwand an Grauer Energie, unabhängig von der Wahl des Außenwandsystems, durch die erzielbaren Energieeinsparungen schnell überkompensiert.

b) *Der Gebäudebetrieb ist entscheidend*

Der jährliche Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser ist weiterhin entscheidend. Der Anteil des Gebäudebetriebs ist im Vergleich zum Anteil der Grauen Energie deutlich höher und nimmt mit steigendem Nutzungszeitraum auch weiter zu. Selbst wenn sich die Verhältnisse untereinander verschieben, gilt dies auch dann noch, wenn höhere energetische Standards umgesetzt werden (Abbildung 2).

c) *Die Bauweise hat nur geringen Einfluss*

Bei gleichem energetischem Standard und üblichen Nutzungsdauern zeigen die untersuchten Massiv- und Holzbaukonstruktionen für die Außenwand im Gesamtergebnis nur sehr geringe Unterschiede hinsichtlich Grauer Energie. Die Vielzahl der möglichen Varianten erlaubt für nahezu alle Bauweisen die Auswahl vergleichbarer oder gleichwertiger Lösungen. Dabei wurden die anderen wichtigen Bauphysikparameter wie z. B.: die Statik, der Schallschutz und Brandschutz nicht bewertet.

d) *Bestimmung der Grauen Energie ist noch zu aufwändig*

Zur Kalkulation von Grauer Energie und Ökobilanzen existieren verschiedene Werkzeuge. Eine einfache Integration in den Planungsablauf ist derzeit jedoch nicht gegeben. Zur Erfassung und Umsetzung aller notwendigen Angaben sind zusätzliche Planungsleistungen und eine Basisqualifikation notwendig, die sich in den Baunebenkosten niederschlagen werden. Der notwendige Aufwand ist in Anbetracht des symbolischen klimapolitischen Nutzens nicht gerechtfertigt.

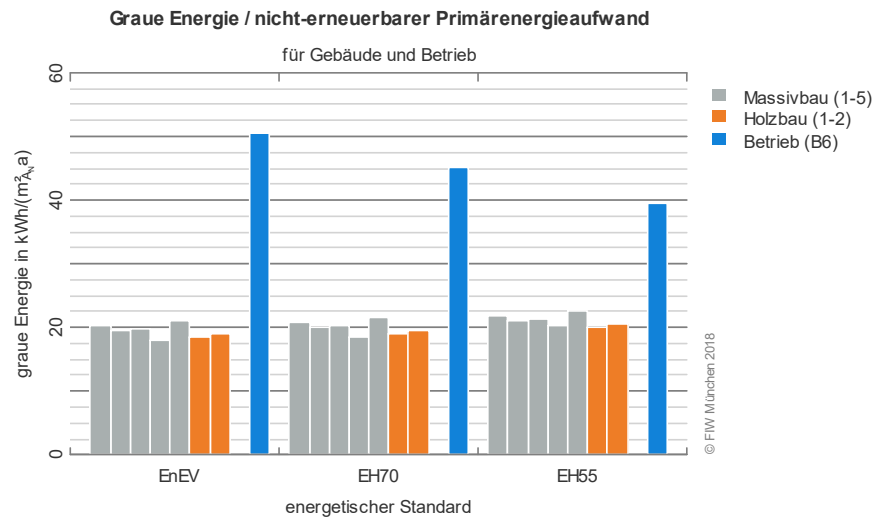


Abbildung 2: Vergleich von der gesamten Grauen Energie für ein typisches Einfamilienhaus mit dem Primärenergieaufwand für den Gebäudebetrieb in Abhängigkeit des energetischen Gebäudestandards. Angaben in kWh/(m²a), bezogen auf die Nutzfläche A_N. Die linken Balken zeigen in grau (Massivbau) und orange (Holzbau) den Einfluss verschiedenen Außenwandkonstruktionen. Die rechten, blauen Balken benennen den Primärenergiebedarf für den Gebäudebetrieb (auf Basis einer Versorgungsvariante mit Wärmepumpe).

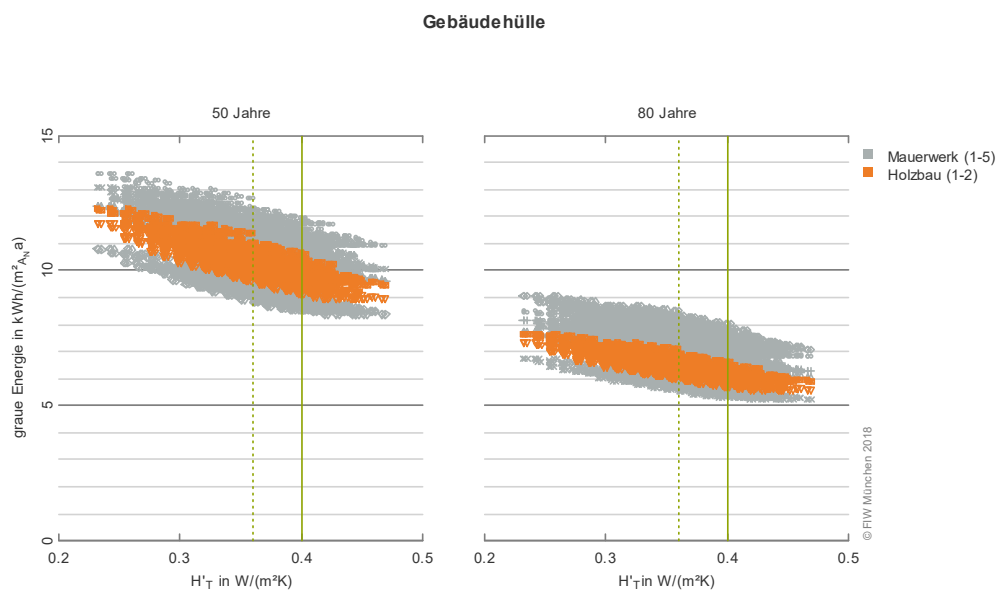


Abbildung 3: Gesamter Aufwand an Grauer Energie in kWh/(m²a) für die Gebäudehülle in Abhängigkeit von H_T bei einem Betrachtungszeitraum von 50a (links) und 80a (rechts). Die vertikalen Linien markieren die Mindestanforderungen nach EnEV 2016 (0,40 W/(m²K) – grüne Linie) und eine Verbesserung um 10% (0,36 W/(m²K) – grün gestrichelte Linie). Die orangenen Punkte stellen die Holzbau- die grauen Punkte die Massivbauvarianten dar.

2 Problemstellung

Im Rahmen der klimapolitischen Beschlüsse und Vereinbarungen von Bundesregierung und EU ist es das Ziel, die Gesamt-CO₂-Emissionen bis 2050 um mindestens 80% zu reduzieren. Dazu soll der Gebäudesektor durch massive Einsparung von Primär- bzw. Endenergie und die verstärkte Nutzung von Erneuerbaren Energien beitragen. Für die Verringerung des aus der Beheizung des Wohnraumes resultierenden CO₂-Ausstoßes stehen im Prinzip zwei unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Eine ist es, auf nachhaltige Heizungssysteme wie z.B. eine Biomassefeuerung oder eine teilsolare Heizung umzusteigen. Dies hat zwar den Vorteil, dass hierdurch die CO₂-Bilanz erheblich verbessert wird, aber der absolute Heizenergieverbrauch unverändert bleibt. Ein zweiter Ansatz ist die Verringerung des Energieverbrauchs durch eine Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäudehülle. Durch die Kombination von nachhaltigen Energieressourcen und einer energieoptimierten Bauweise entstehen so sehr energieeffiziente Wohnräume.

Infokasten

Bisher richtet der normative Rahmen zur energetischen Bilanzierung von Gebäuden seinen Fokus auf die Betriebs- bzw. Nutzungsphase des Gebäudes, indem die Verbrauchs- bzw. Bedarfswerte als wesentliche Kenngrößen verwendet werden. Aufwendungen für die Herstellung der Bauprodukte, die Errichtung des Gebäudes und die letztlich notwendige Entsorgung sind darin nicht enthalten. Die Bunderegierung hat deshalb in ihrem Ende 2016 veröffentlichten Klimaschutzplan 2050 [1] das Ziel formuliert, den Einsatz **nachhaltiger Bau- und Dämmstoffe** zu stärken. Dabei sollen auch vor- und nachgelagerte Klimaschutzaspekte – also Emissionen, die bei der Herstellung, der Verarbeitung, der Entsorgung oder der Wiederverwertung von Baustoffen entstehen – auf Basis frei verfügbarer Ökobilanzdaten berücksichtigt werden. Außerdem sollen Instrumente zur stärkeren Einbeziehung des gesamten **Lebenszyklus** („Cradle to Grave“ oder „Cradle to Cradle“) von Baumaterialien überprüft und stärker in die Praxis der Bauplanung mit einbezogen werden.

Das würde aber in der praktischen Konsequenz bedeuten, dass die von vielen heute schon häufig beklagte, hohe Komplexität bei der energetischen Bewertung von Gebäuden um weitere relevante Phasen im Lebenszyklus von Gebäuden erweitert werden müssten. Erst eine Ausweitung der Bilanzgrenzen erlaubt mit jeder Stufe eine vollständigere Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäudekonzepten.

In diesem Zusammenhang fällt häufig auch der Begriff der so genannten **Grauen Energie**. Darunter wird meist jener Energiebedarf verstanden, der nötig war, um die Materialien herzustellen, an die Baustelle zu transportieren und zu verbauen. Der Grauen Energie wird bei den üblichen energetischen Betrachtungen im Bausektor meist geringeres Interesse zuteil. Besonders energieeffiziente Bauweisen wie z.B.

das Passivhaus erfordern jedoch durch den Mehraufwand für den Wärmeschutz evtl. eine genauere Betrachtung dieser Energiebedarfsanteile. Ansonsten könnte der Einwand erhoben werden, dass es zu einer Verschiebung des Energiebedarfs in die Produktion kommt.

Verbesserungen, die zur Einsparung von Energie führen sollen, sind meist mit einem höheren Materialeinsatz und damit auch einem höheren Input an Grauer Energie verbunden. Das bedeutet für das Ziel dieser Studie, dass neben dem Vergleich der Kennwerte für verschiedene Außenwandkonstruktionen auch der primärenergetische Mehraufwand zu bewerten ist, der durch höhere Anforderungen an die Energieeffizienz der Gebäudehülle entsteht und damit, ob sich der Aufwand dazu auch lohnt.

3 Was versteht man unter „Grauer Energie“?

Fragen nach dem Energieaufwand für die Herstellung von Außenwänden wurden in Deutschland bereits 1922 gestellt und beantwortet [2]. Entsprechende Daten wurden für Bauteile veröffentlicht und 1923 die Anforderungen so formuliert, dass bei der Auswahl von Baustoffen auch auf den Energieaufwand infolge der Herstellung zu achten ist (Abbildung 4). Kenngröße war:

- Der Kohlaufwand zur Erzeugung eines Bauteils (z.B. Wand)
- Der Kohlaufwand zur Beheizung

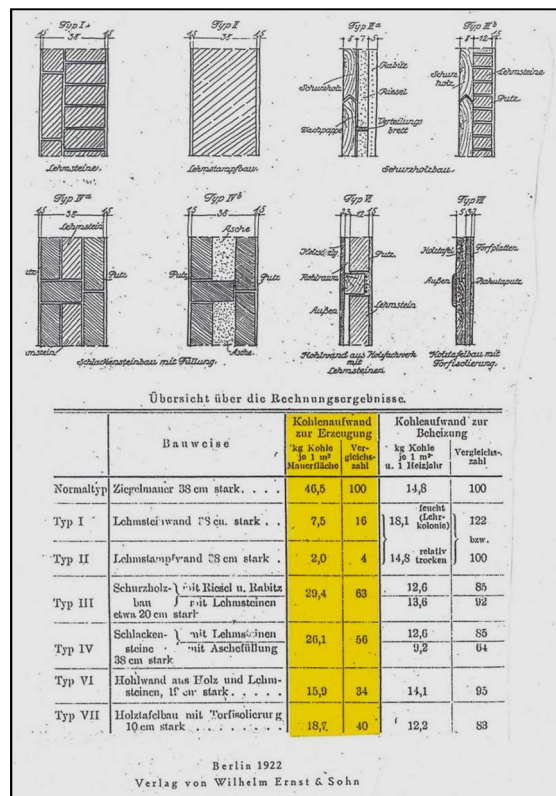


Abbildung 4: Darstellung der „Grauen Energie“ im Jahr 1922 für verschiedene Baukonstruktionen.

Der Begriff „Graue Energie“ kommt ursprünglich aus der Schweiz. Inzwischen wird er vermehrt auch im gesamten deutschsprachigen Raum verwendet. Hierzulande ist er allerdings nicht eindeutig definiert und wird deshalb auch unterschiedlich verwendet bzw. interpretiert. Die Schweizer Definition, laut SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein) Merkblatt 2032, bezeichnet als Graue Energie „die gesamte Menge nicht-erneuerbarer Primärenergie, die für alle vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und für die Entsorgung, inkl. der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel, erforderlich ist.“ Sie wird auch als kumulierter, nicht-erneuerbarer Energieaufwand bezeichnet [3].

Sie berechnet sich aus der Summe aller nicht-erneuerbaren Primärenergieträger und energetisch nutzbaren fossilen Rohstoffe sowie der Wasserkraft eines bestimmten Systems. Das System umfasst in der Regel alle wichtigen Prozesse, vom Rohstoff-

abbau beginnend bis zum Ort der Bereitstellung des Produktes (Werktor) oder der Leistung. Sie besteht aus Primärenergieformen, die begrenzt verfügbar, nicht-erneuerbar und mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden sind. Die Graue Energie für die Herstellung und für die Entsorgung wird separat ausgewiesen.

Der bis zur Erstellung oder Fertigstellung benötigte Energieverbrauch eines Baustoffs bzw. Bauteils wird somit durch den sogenannten Primärenergieinhalt (PE) beschrieben. Es wird zwischen erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Energien unterschieden:

- Nicht-erneuerbare PE ist die Primärenergie, die aus einer Quelle gewonnen wird, die durch ihre Nutzung erschöpft wird.
- Erneuerbare PE ist die Primärenergie, die aus einer Quelle gewonnen wird, die durch ihre Nutzung nicht erschöpft wird.

Folgende Primärenergieträger sind in der Grauen Energie enthalten:

- Erdöl, Erdgas, Kohle und alle daraus gewonnenen Energieträger und Rohstoffe mit dem Energiewert aus der Verbrennung.
- Natururan mit der in Leichtwasserreaktoren nutzbaren Wärme.
- Wasserkraft mit der auf der Turbinenschaufel nutzbaren mechanischen Energie.

Nicht enthalten sind hingegen:

- Holz, Kork und andere pflanzliche und tierische Rohstoffe, sowie daraus gewonnene Energieträger, soweit sie aus nachhaltiger Bewirtschaftung stammen.
- Sonnenenergie, Erdwärme, Windenergie, Umgebungswärme und alle daraus gewonnenen Sekundärenergieformen.
- Altkunststoff, Altpapier, Altreifen, Klärschlamm, und andere Abfälle, die stofflich oder energetisch wiederverwertet werden.

Es gibt noch keine Normierung, die einen zuverlässigen Vergleich der Werte erlauben würde. Die Systemgrenzen spielen eine maßgebende Rolle bei der Berechnung der Grauen Energie. Die Stoff- und Energieflüsse sind grundsätzlich offen. Die Festlegung von Systemgrenzen ist für die Berechnung von Kennwerten für Graue Energie notwendig.

Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Ermittlung der Kenndaten im Rahmen dieser Studie orientiert sich an der Durchführung von Ökobilanzen nach DIN 15804. Die vollständige Bilanz untergliedert sich dabei in vier Phasen (Herstellung, Errichtung, Nutzung und Entsorgung) über den Lebenszyklus sowie einen Sonderbereich zur Wiederverwertung. Für den vollständigen Bilanzrahmen (A1-D) existieren für die meisten Produkte/ Werkstoffe weder in den öffentlichen Datenbanken noch in Umweltproduktdeklarationen (EPDs) vollständige Datensätze. Die normativen Verfahren zur Erstellung von EPDs sehen nur eine Ausweisung der Bilanzgrenzen A1-A3 verpflichtend vor. Dies entspricht einer Bewertung nach dem Prinzip „**Cradle to Gate – von der Wiege bis zum Werkstor**“. Nachfolgende Abbildungen geben einen Überblick der verfügbaren Daten, aufgeteilt nach Bilanzgrenzen (Abbildung 5) bzw. nach Materialgruppen (Abbildung 6). Wie aus den Übersichten erkennbar ist, liegen die

Datengrundlagen hinsichtlich ihrer Qualität (Datentyp) und Vollständigkeit (Bilanzmodule) äußerst heterogen vor. Eine Berücksichtigung aller Module zur Bewertung von Bauteilen oder Gebäuden ist auf dieser Grundlage praktisch nicht möglich.

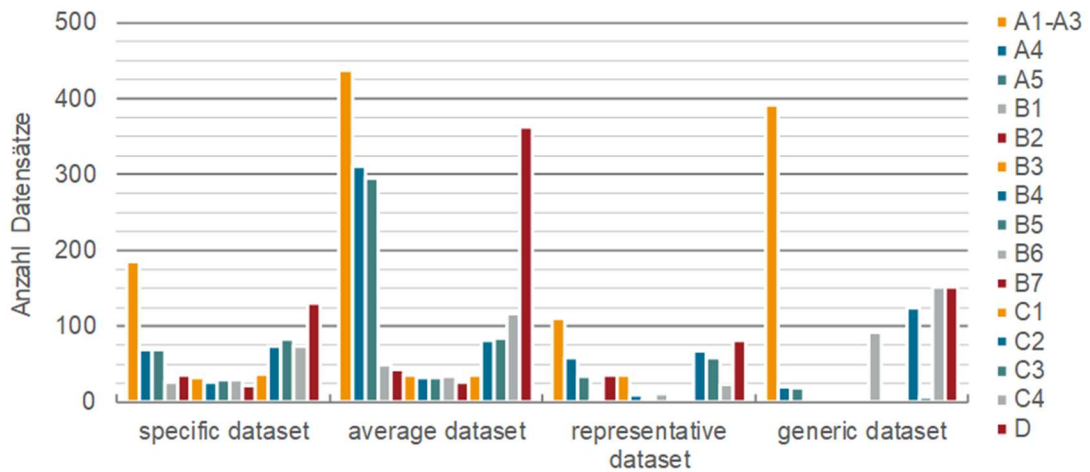


Abbildung 5: Verfügbare Datensätze der Ökobaudat sortiert nach sortiert nach Datentyp und (bzw. Datenqualität) ¹ und Bilanzierungsmodul A-D

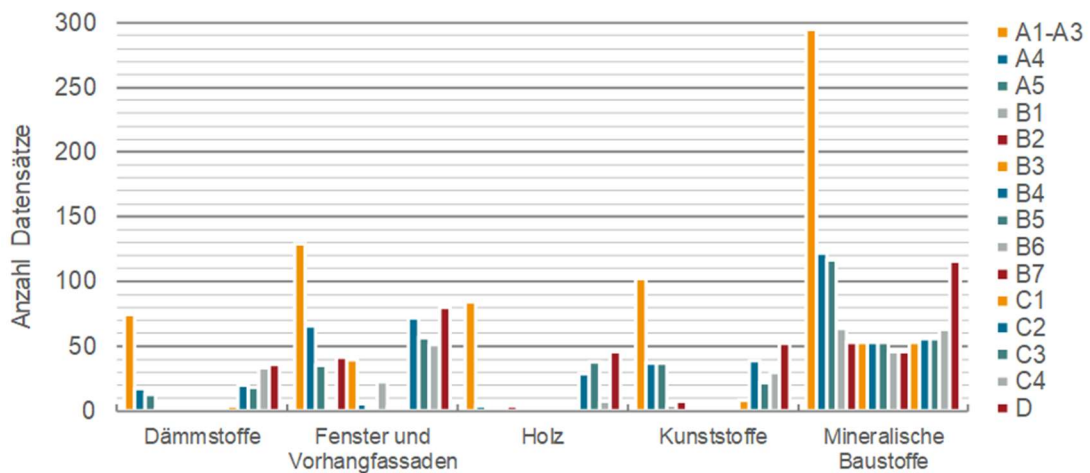


Abbildung 6: Verfügbare Datensätze der Ökobaudat sortiert nach Materialgruppe und Bilanzierungsmodul A-D

Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) beschreibt vor diesem Hintergrund eine vereinfachte Methode, um einen ganzheitlichen Ansatz zu ermöglichen, der nicht ausschließlich die Herstellungsphase betrachtet und damit dem Ansatz der SIA 2032 zu Grauer Energie am stärksten gleicht. Die Bilanzgrenzen werden hier um Module aus den Gebäudebetrieb (B2, B4 und B6) und aus der „End of Life“-Betrachtung, also der Verwertung und Entsorgung von Baustoffen, erweitert

¹ ÖKOBAUDAT unterscheidet vier Datensatztypen:

- Specific dataset: herstellerepezifischer Datensatz für ein konkretes Produkt
- Average dataset: durchschnittliche Datensätze von Industrieverbänden, mehreren Firmen oder Werken
- Representative dataset: Daten, die repräsentativ für ein Land/ einer Region sind
- Generic dataset: generische Daten gemäß EN 15804 sowie andere, nicht auf Basis von Industriedaten modellierte Daten.

(C3, C4). Auch hier gilt, dass die Datenlage nicht ausreichend ist, um jedes Produkt vollumfänglich entsprechend der genannten Module zu bilanzieren. Daher werden Vereinfachungen und Annahmen getroffen. So werden die Bilanzgrenzen B2 und B4 nicht gesondert ermittelt, sondern ersatzweise die mit dem Austausch einer Komponente verbundenen Werte aus der Herstellungs- und Lebensendphase (d.h. A1-A3 sowie C3 und C4) berechnet. Sind für C3 und C4 keine produktspezifischen Daten vorhanden, werden diese einer Stoffgruppe (z.B. Holzwerkstoffe, mineralische Stoffe) zugeordnet und die (generischen) Kennwerte der Stoffgruppe für die weiteren Kalkulationen verwendet. Das hat einen Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnung.

Dennoch stellt das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) derzeit die praktikabelste Methode dar, um Gebäude über alle Lebensphasen hinweg weitgehend abzubilden. Die Berechnungen dieser Studie wurden daher auf Grundlage des BNB-Verfahrens durchgeführt. Die in der Bilanz berücksichtigten Module sind in Abbildung 7 orange markiert. Der Bilanzumfang für Graue Energie umfasst die Module A1-A3, B2 und B4 (Ersatzwerte) sowie je nach Baustoff C3 oder C4. Der betriebliche Energieeinsatz ist nicht Teil der Grauen Energie, ist aber zur vergleichenden Bewertung relevant und wird zusätzlich ausgewiesen.

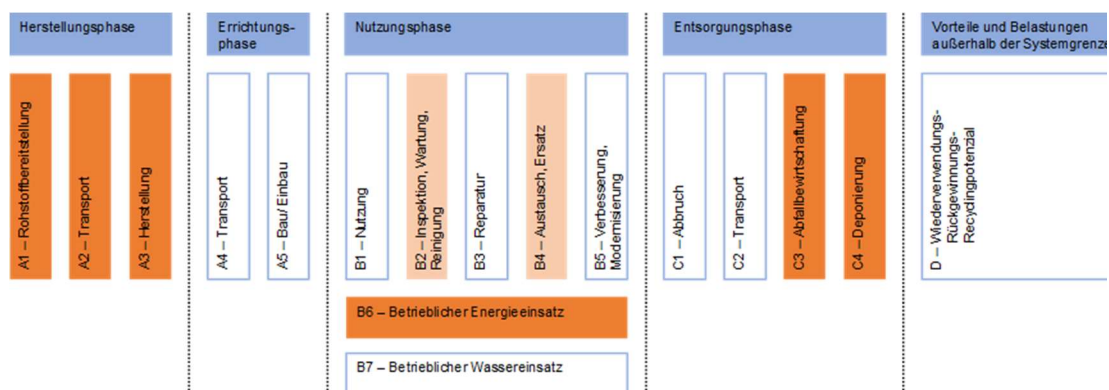


Abbildung 7: Bilanzgrenzen der Ökobilanzierung (DIN EN 15804) [4] sowie die Bilanzierungsmodule nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) in farbiger Darstellung (orange).

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt anhand des nicht-erneuerbaren Primärenergieaufwandes (PENRT). Im Verfahren des BNB sind für eine vollständige Ökobilanz weitere Indikatoren beschrieben, die im Rahmen dieser Studie mit dem Fokus auf Graue Energie nicht weiter untersucht werden. Innerhalb der Systematik der Primärenergiekennwerte wird zwischen dem gesamten, den stofflichen und energetischen Primärenergieaufwand unterschieden. Dabei sind die einzelnen Indikatoren nachfolgendem Prinzip aufgebaut und indiziert:

- PE (Primary Energy)
- NR/R (Non-renewable/ Renewable)
- M/E/T (Material, Energy, Total)

Tabelle 1: Übersicht der nicht-erneuerbaren Primärenergie-Anteile als Grundlage der Grauen Energie.

Abkürzung	Int. Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
PENRT	Primary energy non-renewable, total	gesamte nicht-erneuerbare Primärenergie
PENRM	Primary energy non-renewable, material	nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung
PENRE	Primary energy non-renewable, energy resources	nicht-erneuerbare Primärenergie zur energetischen Nutzung

Wichtig bei der Bewertung des Energieeinsatzes verschiedener Materialien bzw. Konstruktionen ist immer die Betrachtungsebene. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit die Analysen nicht nur für das Bauteil selbst durchgeführt, sondern auch dessen Einfluss im Kontext von

- Gebäudehülle
- gesamtes Bauwerk
- gesamtes Gebäude inkl. Versorgungstechnik untersucht.

Infokasten

Mit **Grauer Energie** wird der kumulierte Aufwand an nicht-erneuerbarer Primärenergie zur Herstellung und Entsorgung eines Baustoffes bezeichnet. Berücksichtigt werden alle vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse, und die Entsorgung, inklusive der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel. In Anlehnung an das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) gehen dazu in dieser Studie die Bilanzgrenzen A1-A3 (Rohstoffbereitstellung, Transport, Herstellung), B2 (Inspektion, Wartung, Reinigung) und B4 (Austausch, Ersatz) oder deren Ersatzwerte sowie C3 (Abfallbewirtschaftung) oder C4 (Deponierung) in die Berechnung mit ein.

4 Typengebäude Einfamilienhaus

Auf Basis und in Ergänzung der Studie „Wirtschaftlichkeit von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie-Gebäudestandard“ [5] wird das zugrunde gelegte Einfamilien-Typengebäude um eine zukünftig mögliche, zusätzliche Betrachtung der „Grauen Energie“ erweitert. Dazu wurden die thermischen Qualitäten der Bauteile und der gesamten Gebäudehülle entsprechend unterschiedlicher energetischer Anforderungen variiert und für die Außenwand verschiedene Baustoffe als Wandbildner (fünf Massivbau- und zwei Holzbaukonstruktionen) abgebildet und deren Einfluss auf die nach BNB definierten Module für die Herstellungs-, Betriebs- und End of Life -Phasen untersucht.

Für jede Außenwandkonstruktion ergeben sich aus der Kombination mit den weiteren Bauteilvarianten insgesamt je nach Konstruktionstyp zwischen 1.296 und 1.944 Varianten. Ergänzend wird noch zwischen sieben Versorgungssystemen unterschieden. Damit liegen dieser Untersuchung alleine für die Gebäudehülle 12.312 Varianten und für die Kombination aus Gebäudehülle und Versorgungstechnik 86.184 Varianten zugrunde. Im Ergebnis wurde der Primärenergieaufwand in allen Variationen (materiell, energetisch und gesamt) für erneuerbare und nicht-erneuerbare Primärenergie zu allen beschriebenen Kombinationen ermittelt.

Alle notwendigen Massen, Flächen und Volumen der verwendeten Bauteile und Materialien werden anhand der Geometrie des Einfamilien-Typengebäudes und der in der vorhergehenden Studie definierten Konstruktionen bzw. Bauteilaufbauten ermittelt.

Tabelle 2: Auszug der wichtigsten Kennwerte und Angaben zum Typengebäude.

Kennwerte/ Angaben	
beheiztes Volumen V_e	565 m ³
Gebäudenutzfläche A_N (nach EnEV 2016)	181 m ²
Nettogrundfläche NGF	148 m ²
Gebäudehüllfläche A	422,7 m ²
A/V_e	0,76 m ⁻¹
Keller	unbeheizt

Als Datengrundlage zur Berechnung der verwendeten Indikatoren werden ausschließlich die Angaben aus der öffentlichen Online-Datenbank „Ökobaudat“ (Version 2017-1) herangezogen [6]. In dieser stehen für die einzelnen Materialien bzw. Produkte sowohl spezifische als auch generische Daten zur Verfügung. Soweit möglich und verfügbar wurden generische Datensätze verwendet, die eine entsprechende Material- oder Produktgruppe abbilden, ohne sich auf ein spezifisches Produkt festzulegen.

Tabelle 3: Auszug der wichtigsten Kennwerte sowie Flächen des Typengebäudes.

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

Während der Nutzungszeit eines Gebäudes unterliegen Werkstoffe und Bauteile von Gebäude und Anlage einem spezifischen Erneuerungszyklus. Je nach Länge des Betrachtungszeitraums werden einzelne Komponenten ein bis mehrfach ersetzt und beeinflussen so die Gesamtbewertung. Als üblicher Betrachtungszeitraum gilt eine Dauer von 50 Jahren, wie er sowohl für Nichtwohngebäude beim Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) als auch für Wohngebäude bei den entsprechenden Bewertungssystemen (BNK [7] bzw. NaWoh) zugrunde gelegt wird. Zusätzlich wird in dieser Studie ein längerer Betrachtungszeitraum von 80 Jahren berücksichtigt, um den langen Nutzungszeiten bei Wohngebäuden Rechnung zu tragen und den Einfluss auf die Bewertung darzustellen.

4.1 Baukonstruktion

Nachfolgend sind die untersuchten Varianten der Gebäudehülle erläutert. Den Schwerpunkt bilden dabei die Außenwandkonstruktionen. Für Fenster, Türen, Dachkonstruktion und unteren Gebäudeabschluss werden zusätzlich, je nach Bauteil, drei bis vier Varianten berücksichtigt. Für einfache Konstruktionen, wie beispielsweise Innenwände und Zwischendecken, die nicht im Fokus der Betrachtung liegen, werden keine Varianten gebildet.

A) Außenwände

Der konstruktive Aufbau der Außenwände und der weiteren Bauteile ist so gewählt, dass sie heute verfügbare und marktübliche Systeme abbilden. Einzelne Elemente der Wandaufbauten sind in den Berechnungen vernachlässigt, wenn diese aufgrund sehr geringer Massen oder unklarer konstruktiver Definitionen ohne Relevanz für das Ergebnis sind. Dies betrifft beispielsweise Innenanstriche, die für alle Varianten

gleichermaßen nicht in den Berechnungen enthalten sind, sowie Haftanstriche zwischen Wandbildner und Innenputz bzw. Außenputz, da hierzu aus den Herstellerangaben keine eindeutige Notwendigkeit abzuleiten ist.

Den Schwerpunkt der Untersuchung bilden sieben verschiedene Außenwandbildner auf Basis von fünf Mauerwerks- und zwei Holzbauvarianten, die in unterschiedlichen thermischen Qualitäten in die Berechnungen eingehen. Damit liegt eine Vielzahl an Varianten vor, die sowohl die aktuellen als auch künftigen Gebäudestandards geeignet abbilden können. Zunächst werden diese Außenwandsysteme für sich – ohne den Kontext der gesamten Gebäudehülle und Anlagentechnik - betrachtet und bewertet. Die U-Werte der Außenwände variieren in etwa zwischen 0,15 und 0,30 W/(m²K). Die Ergebnisse werden entsprechend den folgenden zwei Gruppen zusammengefasst und dargestellt:

Tabelle 4: Gruppierung der Außenwandsysteme.

Abkürzung	Bezeichnung	Typen
MW	Monolithisches Mauerwerk, Mauerwerk mit WDVS	Ziegel, 2 x Porenbeton, Leichtbeton, Kalksandstein mit WDVS
HB	Holzbauweise	Holzständerwand, Holzstapelwand

Ziegel

Alle vorgesehenen U-Werte werden ohne zusätzliche Füllung der Steine (z.B. mit Mineralwolle, Perlite, etc.) durch Variation der Bauteildicke und der spezifischen Wärmeleitfähigkeit erreicht. Damit ist der Ziegelton das maßgebende Material in den Auswertungen der Ergebnisse für diese Produktgruppe. Als Mörtellage wird einheitlich ein Dünnbettmörtel verwendet. Den äußeren Abschluss der Konstruktion bildet ein mineralischer Leichtputz mit 20 mm und eine Dispersionsfarbe. Innenseitig wird ein Gipsputz in 15 mm Stärke aufgebracht. Erneuerungszyklen innerhalb der Betrachtungszeiträume betreffen nur die Außenfarbe, den Außenputz und den Innenputz mit typischen Nutzungszeiten von jeweils 15, 40 und 50 Jahren

Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem

Basis bildet ein Kalksandsteinmauerwerk, das in allen Varianten in gleicher Stärke (175 mm) ausgeführt und entsprechend den thermischen Anforderungen mit Mineralwolle-Wärmedämmverbundsystem kombiniert wird. Um die festgelegten U-Werte zu erfüllen, variiert die Dämmstärke zwischen 100 und 260 mm. Die beiden bestimmenden Materialien dieser Konstruktion sind daher das Kalksandsteinmauerwerk und das Mineralwolle-Dämmsystem. Als Mörtel für das Mauerwerk dient ein Leichtmauermörtel. Der Abschluss nach Innen wird durch einen 15 mm Gipsputz hergestellt. Erneuerungszyklen innerhalb der Betrachtungszeiträume betreffen das Mineralwolle und WDVS sowie den Innenputz mit typischen Nutzungszeiten von jeweils 40 und 50 Jahren.

Leichtbeton

Während die höheren U-Werte noch alleine auf Basis eines Leichtbetons mit Leichtzuschlagstoffen (z.B. Trass-Zement) erreicht werden können, ist für die niedrigeren U-Werte zusätzlich eine mineralische Füllung (Mineralwolle, Perlite) der Hohlräume notwendig. Der konstruktive Aufbau besteht aus Leichtbetonsteinen in drei Stärken (mit und ohne Füllung, 300/365/425 mm) mit Dünnbettmörtel, einem äußeren Abschluss mit Leichtputz (20 mm) und Anstrich sowie einem inneren Abschluss auf Basis eines Gipsputzes (15 mm). Für die Außenfarbe ist eine Erneuerung nach 15 Jahren, für den Leichtputz außen nach 40 Jahren und für den Innenputz nach 50 Jahren vorgesehen. Für alle anderen Materialien ist innerhalb der beiden Betrachtungszeiträume von 50 bzw. 80 Jahren kein Ersatz notwendig.

Porenbeton

Die Varianten für die Außenwandsysteme auf Basis von Porenbeton erfüllen die Anforderungen an die U-Werte durch bessere λ -Werte und zunehmende Wandstärken. Für die Außenwandkonstruktion mit dem niedrigsten U-Wert wird eine zusätzliche Dämmschicht aus Multipor-Stein eingesetzt, um den vorgegebenen U-Wert zu erreichen. Die Konstruktion wird also von den Porenbetonsteinen und in einem Fall (niedrigster U-Wert) durch den Multipor-Stein bestimmt. Die Konstruktion variiert in der Stärke der Porenbetonsteine zwischen 240 und 425 mm. Steine und Multiporschicht sind mit einem Dünnbettmörtel verklebt. Außenseitig bildet ein 20 mm Leichtputz mit Farbe den Abschluss der Konstruktion, innenseitig ein 15 mm dicker Gipsputz. Die Nutzungszeiträume betragen für den Farbanstrich 15 Jahre, für den Leichtputz 30 Jahre und für den Innenputz 50 Jahre. Alle anderen Bauteile unterliegen für die beiden Betrachtungszeiträume keinem Erneuerungszyklus.

Die zweite Porenbetonkonstruktion erreicht die sechs vorgegebenen thermischen Kennwerte durch unterschiedliche λ -Werte und Steinstärken des Porenbetons. Entsprechend sind die konstruktiven und materialspezifischen Kennwerte durch die Porenbetonsteine geprägt. Die Außenwandkonstruktion variiert je nach thermischer Anforderung in ihrer Stärke zwischen 300 und 480mm. In allen Fällen liegt eine monolithische Bauweise vor, die nach außen mit einem Leichtputz (20mm) und Anstrich, nach Innen mit einem Gipsputz (15 mm) abgeschlossen wird. Farbe, Leichtputz und Gipsputz sind nach 15, 40 bzw. 50 Jahren zu erneuern, woraus sich entsprechende Erneuerungszyklen ergeben.

Holzmassivbau mit Wärmedämmverbundsystem

Die Holzmassivkonstruktion besteht dabei aus einer Holzstapelkonstruktion als tragende Wand (100 mm) und wird mit unterschiedlichen Dämmstärken (100-220 mm) je nach Anforderung kombiniert. Die Kennwerte ergeben sich damit vorwiegend aus dem verwendeten Konstruktionsholz und dem eingesetzten Mineralwollgedämmstoff als WDVS. Den äußeren Abschluss der Konstruktion bildet der Putz des WDV-

Systems, den inneren Abschluss eine Gipskartonplatte. Für das WDVS wird mit einer Nutzungszeit von 40 Jahren, für die Gipskartonverkleidung von 50 Jahren kalkuliert. Alle anderen Bauteile werden innerhalb der gewählten Betrachtungszeiträume nicht-erneuert.

Holzständerbau

Zwei Wandsysteme erreichen die vorgegebenen U-Werte bereits durch eine Dämmung der Gefache, während die beiden weiteren Konstruktionen zusätzlich eine durchgehende außenliegende Dämmschicht besitzen. Als Dämmmaterial wird Mineralwolle angesetzt. Damit variieren die Wandstärken der unverkleideten Konstruktion zwischen 180 und 300 mm. Da der Volumenanteil der Gefache sowie der außenliegenden Dämmebene den höchsten Anteil ausmachen, sind die Kennwerte dieser Konstruktion maßgeblich vom eingesetzten Dämmstoff abhängig. Der Volumenanteil der Holzwerkstoffe ist im Vergleich deutlich geringer (etwa 10% des Wandvolumens). Die Basis der Konstruktion bildet eine Holzständerkonstruktion mit beidseitiger Beplankung aus Sperrholz für die konstruktive Aussteifung. Innenseitig folgen eine Dampfbremse, eine Unterkonstruktion aus Holzlatten (Installationsebene) sowie zum Abschluss eine Gipskartonplatte. Außenseitig folgt je nach Anforderung eine zusätzliche Dämmschicht, ebenfalls eine Unterkonstruktion aus Holzlatten und zuletzt eine Bretterschalung als Fassadenabschluss. Die außenseitige Verkleidung aus Holzlatten, Dämmung und Schalung muss nach 40 Jahren [8] erneuert werden. Innenseitig (Dampfbremse, Installationsebene, Gipskarton) wird von einem Ersatz nach 50 Jahren ausgegangen.

B) weitere Bauteile der Gebäudehülle - Dach, Kellerdecke, Fenster und Tür

Analog zu den Außenwandsystemen werden für alle weiteren Bauteile der Gebäudehülle drei bis vier verschiedene thermische Varianten in den Berechnungen berücksichtigt. Ausgangsbasis bildet die Mindestanforderung der Energie-Einsparverordnung (EnEV 2016) an das jeweilige Bauteil. Bei den Konstruktionen handelt es sich um bewährte Lösungen, die für das entsprechende Bauteil als Standard betrachtet werden können.

Innenbauteile

Mit dem Fokus der Untersuchung auf die Gebäudehülle wurden die Konstruktionen und Bauteile für den Innenbereich in allen Varianten gleich angesetzt, d.h. die Innenbauteile entsprechen nicht der Materialgruppe der Außenwandkonstruktionen. Dadurch verhält sich der Anteil des Innenausbaus in allen Fällen gleich. Berücksichtigt wurden bei den Innenbauteilen massive Innenwandkonstruktionen mit tragender Funktion (verputzte Betonwände), leichte Rauntrennwände ohne tragende Funktion (Ständerkonstruktion mit Dämmung und Gipskartonbeplankung) und die Geschossdecke zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss (Beton mit Fußbodenaufbau).

Damit werden einerseits die hohen Massenanteile der Innenbauteile nicht vernachlässigt und andererseits bleibt dennoch eine Vergleichbarkeit der Varianten gewährt.

Unbeheizter Keller

Die Kellerkonstruktion wird ebenfalls für alle Varianten einheitlich betrachtet. Für den unbeheizten und damit nicht gedämmten Keller bestehen die Außenwände aus 200mm Normalbeton mit einer außenseitigen, bituminösen Abdichtung gegen Feuchte. Gleichermaßen besteht auch die Bodenplatte aus Beton (Fundamentplatte mit 480mm), kombiniert mit einer Abdichtung, Vliestrennlage und einem zum Raum hin abschließenden 50mm starken Estrich.

4.2 Versorgungstechnik

Für nachfolgende Versorgungsvarianten werden die Kennwerte für Primärenergie berechnet. Als Grundlage für die Gesamtbilanzierung des Gebäudes wird die Versorgungsvariante „Luft-Wasser-Wärmepumpe“ (WP1) als Standardsystem verwendet, da damit die Anforderungen der EnEV 2016 in jedem Fall eingehalten werden. Sowohl für Lüftungskanäle (sofern vorhanden) als auch für die Heizungs- und Warmwasserverteilung werden vereinfachte Annahmen für die Massenermittlung getroffen. Die Wärmeübergabe erfolgt im Falle der beiden Wärmepumpen über Fußbodenheizsysteme, in allen anderen Fällen über Konvektoren.

Tabelle 5: Versorgungsvarianten für das Typengebäude. Die grau hinterlegte Variante beschreibt die Basisvariante.

Abkürzung	Wärmeerzeugung	Lüftung
BW0	Öl-Brennwert, Solarthermie	Abluftanlage
BW1	Gas-Brennwert, Solarthermie	Fensterlüftung
BW2	Gas-Brennwert, Solarthermie	Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung
WP1	Luft-Wasser-Wärmepumpe	Abluftanlage
WP2	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung
HnP	Holzpelletkessel	Fensterlüftung
FW	Fernwärme	Fensterlüftung

5 Spezifische Betrachtung von Bauteilen und Versorgungssystemen

Bei der Wahl eines Außenwandsystems entscheidet dessen U-Wert maßgeblich über den Energiebedarf des Gebäudes während der Betriebsphase: Je besser der U-Wert, desto weniger Energie geht durch das Bauteil während der Nutzung verloren. Daher werden mit Verbesserung des U-Werts die Umweltwirkungen und der Energiebedarf relevanter, die im Gebäude „verbaut“ sind. Für die vorliegende Gegenüberstellung wurden unterschiedliche Außenwandaufbauten entwickelt, die für Wohngebäude häufig zum Einsatz kommen. Sie werden anhand der in Kapitel 3 getroffenen Definition für Graue Energie verglichen. Betrachtet werden sieben unterschiedliche Außenwandaufbauten, die sich in den verwendeten Materialien und hinsichtlich ihres U-Werts unterscheiden. Zusätzlich wird auch die Graue Energie für die weiteren Bauteile der Gebäudehülle, relevante Innenbauteile sowie sieben unterschiedliche Versorgungsvarianten dargestellt.

5.1 Außenwandkonstruktionen

Mit steigenden Anforderungen an den U-Wert der Außenwandsysteme nimmt auch der Anteil der Grauen Energie für die verschiedenen Konstruktionen aufgrund des höheren Materialeinsatzes zu. Dies ist für alle Außenwandsysteme in unterschiedlicher Ausprägung zu beobachten. Die spezifische Zunahme unterscheidet sich materialabhängig. Abweichungen/ Ausreißer ergeben sich aus der zum Teil notwendigen Kombination mit zusätzlichem Dämmmaterial.

Abbildung 8 zeigt im Vergleich die Graue Energie der unterschiedlichen Konstruktionen von Gebäudehülle und Innenausbau. Die Kennwerte sind als Median der jeweiligen untersuchten Varianten dargestellt. Der Anteil für die Ersatzinvestitionen, die nach Ende der typischen Nutzungsdauer notwendig sind, ist für alle Außenwandtypen bei einem typischen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren gesondert ausgewiesen. Um die Bedeutung der Einzelergebnisse hervorzuheben, sind diese einmal mit Bauteilflächenbezug (Abbildung links) und einmal mit Nutzflächenbezug (Abbildung rechts) dargestellt.

Zu erkennen ist, dass Haustür und Fenster die im Vergleich höchsten spezifischen Werte aufweisen. Für beide Bauteile fällt die technische Lebensdauer deutlich niedriger als bei den Wand- und Deckenkonstruktionen aus. Entsprechend tragen die notwendigen Ersatzinvestitionen zu einem höheren Primärenergieeinsatz bei. Zu beachten ist dabei allerdings, dass aufgrund der im Vergleich deutlich niedrigeren Flächenanteile die Relevanz für das Gesamtergebnis geringer ist als bei den Außenwandsystemen (Abbildung 8, rechts). Hinsichtlich der Errichtungsphase zeigen die Deckenkonstruktionen (Kellerdecke und Innendecke) ähnliche Ergebnisse. Allerdings fallen die Ersatzinvestitionen aufgrund der höheren Nutzungszeiten geringer aus. Die Medianwerte der Außenwandsysteme liegen im Vergleich im Mittelfeld. Der Unterschied zwischen massiver Bauweise und Holzbau beträgt dabei lediglich etwa

1 kWh/(m²_{Bauteil}a). Aufgrund der einfacheren Bauart fallen die Werte für Innenwände und Kellerbauteile insgesamt niedriger aus. Hier macht sich insbesondere der geringere Materialeinsatz für die schlankeren Konstruktionen (Innenwände) und der Entfall von Wärmedämmung bemerkbar (unbeheizter und daher ungedämmter Keller).

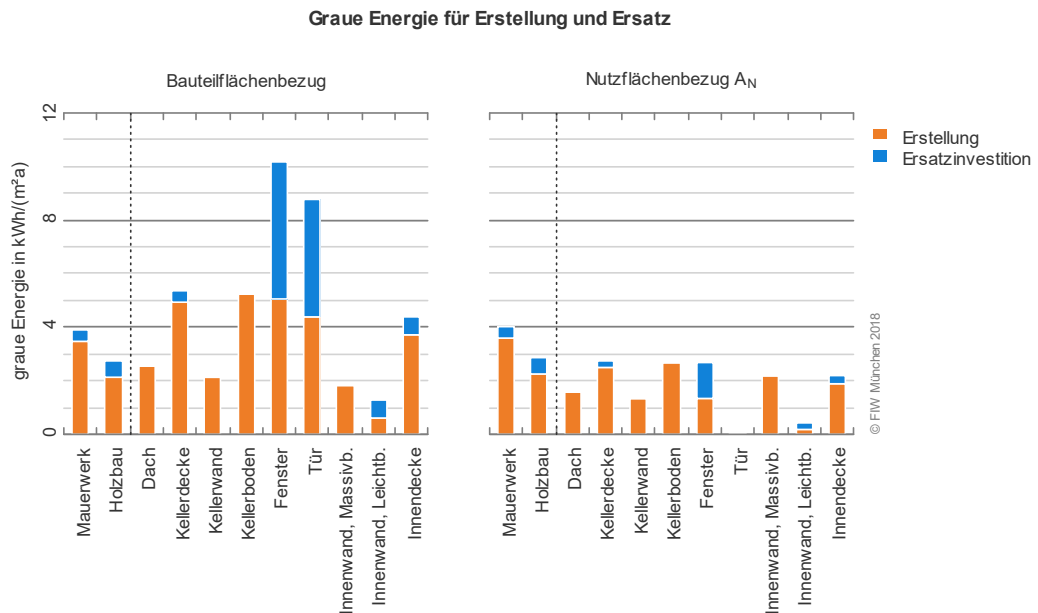


Abbildung 8: Gesamtaufwand an Grauer Energie in kWh/(m²a) für alle Bauteile der Gebäudehülle bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren bezogen auf die Bauteilfläche (links) und die Nutzfläche A_N (rechts).

5.2 Versorgungssysteme

Aufgrund der im Vergleich zur Gebäudehülle kürzeren Nutzungszeiträume der Versorgungstechnik (25 Jahre nach BNB) und daraus resultierenden höheren Ersatzzyklen haben die Ersatzinvestitionen hier einen deutlich höheren Anteil am Gesamtergebnis. Dies macht sich mit einer Ausweitung des Betrachtungszeitraums auf 80 Jahre noch stärker bemerkbar, da sich die Versorgungstechnik dann bereits im 4. Lebenszyklus befindet. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass nicht davon auszugehen ist, dass über mehrere Zyklen die gleiche Basistechnik Anwendung findet. Produkt- und Innovationszyklen sind in der Versorgungstechnik zunehmend kürzer, so dass ein Wechsel der Technologie – insbesondere bei 80-jähriger Betrachtung – sehr wahrscheinlich ist und sich die Ergebnisse langfristig ändern werden. Bei einzelnen Komponenten der Versorgungssysteme ist zudem im realen Betrieb zum Teil von deutlich geringeren Nutzungszeiten auszugehen, was bei diesen Berechnungen keine Berücksichtigung finden kann. Zu den Berechnungen der Versorgungstechnik liegt keine vollständige haustechnische Planung vor, auf deren Basis eine exakte Massenermittlung für die Bewertung durchgeführt werden kann. Für Größe und Leistung der Anlagen, Länge, Masse und Fläche der Verteil- und Übergabesysteme wurden daher plausible Annahmen getroffen, um die Versorgungssysteme in der

Gesamtbilanz mit berücksichtigen zu können. Aufgrund der im BNB-Verfahren empfohlenen Lebenszyklen für die technische Versorgung von 25 Jahren fällt für den ersten Betrachtungszeitraum von 50 Jahren zunächst nur ein Erneuerungszyklus an. Dieser führt aber bereits zu einer Verdopplung der Werte, da praktisch die gesamte Versorgungstechnik einmal komplett erneuert wurde. Dabei schneiden die technisch einfacheren Systeme, wie die beiden Wärmepumpen (WP1, WP2) und die Übergabestation der Fernwärme (FW) am günstigsten ab. Der Aufwand für die Kesselvarianten (Öl-, Gas-, Holzkessel) ist durch die zusätzlichen Komponenten (je nach System z.B. Öltank, Solarthermie, Kamin) im Vergleich höher. Mit 80 Jahren Betrachtungszeit vervierfachen sich die Werte im Vergleich zum Erstellungszeitpunkt. Eine Übersicht der Ergebnisse liefert Tabelle 6, in der die Angaben für den Erstellungszeitpunkt sowie bei 50- bzw. 80-jähriger Betrachtung gegenübergestellt sind.

Tabelle 6: gesamter nicht-erneuerbarer Primärenergieeinsatz der Versorgungstechnikvarianten in kWh zum Erstellungszeitpunkt sowie bei einem Betrachtungszeitraum von 50 a bzw. 80 a.

Versorgungsvariante	Graue Energie in kWh		
	Erstellung	50 a	80 a
BW0	14.069	28.139	56.277
BW1	12.160	24.320	48.641
BW2	13.833	27.666	55.333
WP1	13.382	19.396	38.792
WP2	10.252	20.503	41.007
HzP	12.186	24.373	48.746
FW	7.638	15.277	30.554

6 Gesamtbetrachtung der Grauen Energie

Im folgenden Abschnitt wird die Graue Energie für das gesamte Gebäude betrachtet. Ausgewertet wird dabei der gesamte nicht-erneuerbare Primärenergieeinsatz pro Jahr. Bezugsgröße für die ermittelten Kennwerte bildet die Nutzfläche A_N , die auch für sonstige energetische Kennwerte (Primärenergieverbrauch, Heizwärmeverbrauch) die übliche Basis bildet und somit einfachere Einschätzungen und Vergleiche ermöglicht.

6.1 Gesamte Gebäudehülle

Aus der Kombination der Varianten für die einzelnen Bauteile ergeben sich je nach Außenwandtypus jeweils zwischen 1296 (Holzbau) und 1944 (Mauerwerk) Möglichkeiten für die Gebäudehülle. Berücksichtigt sind dabei unterschiedliche thermische Beschaffenheiten für Dach, Wand, Fenster, Tür, Kellerdecke und Wärmebrücken, aus denen sich der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient der Gebäudehülle H'_T berechnen lässt. Der notwendige Einsatz Grauer Energie der verschiedenen Varianten der Gebäudehülle ist in Abbildung 9 dargestellt. Um den Einfluss von Ersatzmaßnahmen aufzuzeigen, werden in allen Fällen sowohl ein Betrachtungszeitraum von 50 a als auch von 80 a analysiert.

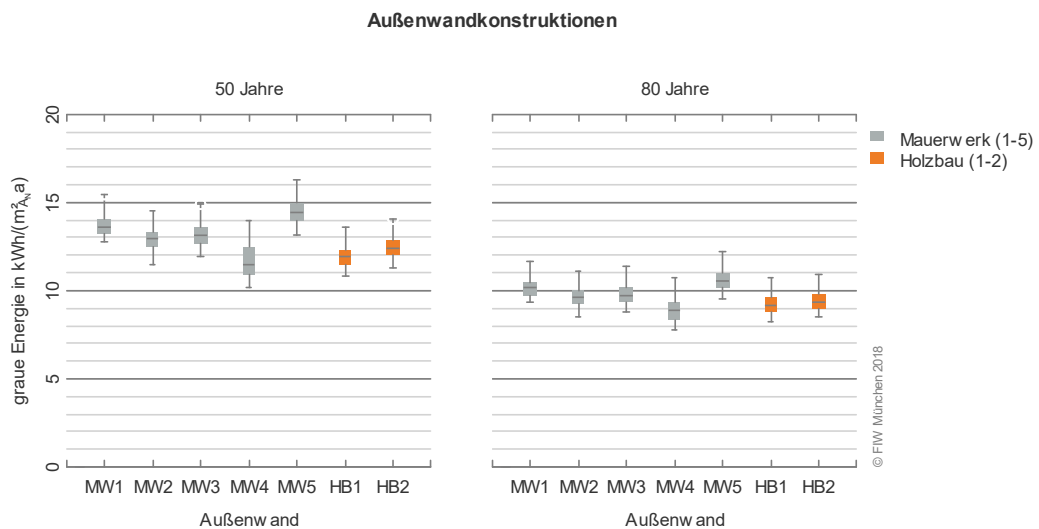


Abbildung 9: Gesamtaufwand Graue Energie in kWh/(m²a) für die Gebäudehülle bei einem Betrachtungszeitraum von 50a (links) und 80a (rechts) bezogen auf die Nutzfläche A_N .

Mauerwerkskonstruktionen (MW1-MW5)

Für den 50-jährigen Betrachtungszeitraum ergeben sich aus den Berechnungen Medianwerte zwischen minimal etwa 11,5 und maximal 14,5 kWh/(m²a) Primärenergie mit einer Bandbreite der Ergebnisse von etwa 2,5-4 kWh/(m²a) abhängig vom betrachteten Außenwandsystem. Bei Verlängerung des Betrachtungszeitraums auf

80 Jahre reduzieren sich die spezifischen Werte auf einen Bereich zwischen knapp 9 bis 10,5 kWh/(m²a). Die Bandbreite der Ergebnisse beträgt dann nur noch etwa 2 bis 3 kWh/(m²a).

Holzbauweise (HB1, HB2)

Der Primärenergieeinsatz für Holzbaukonstruktionen (HB1, HB2) fällt gegenüber den massiven Wandbildnern mit Ausnahme der Variante MW4 etwas geringer aus. Die Ergebnisse zeigen einen Primärenergiebedarf von knapp 12 (HB1) bzw. 12,5 kWh/(m²a) (HB2) für 50 Jahre. Auch hier liegt die Bandbreite der Ergebnisse je Konstruktionstypus im Bereich von 2,5-3 kWh/(m²a). Nach 80 Jahren beträgt der spezifische Primärenergiebedarf für beide Konstruktionen noch etwa 9 kWh/(m²a).

6.2 Anteil der Gebäudehülle an gesamter Grauer Energie

Die Gebäudehülle trägt aufgrund ihres hohen Flächenanteils und der im Vergleich zu den Innenbauteilen aufwändigeren, konstruktiven Aufbauten wesentlich zum Primärenergieaufwand des gesamten Gebäudes bei (Abbildung 10). So beträgt der Anteil der Gebäudehülle am gesamten Bedarf an Grauer Energie für 50 Jahre etwa 62-67% und für 80 Jahre etwa 60-63% (Median). Innerhalb eines Konstruktionstypus liegt der Schwankungsbereich bei etwa 5-8%.

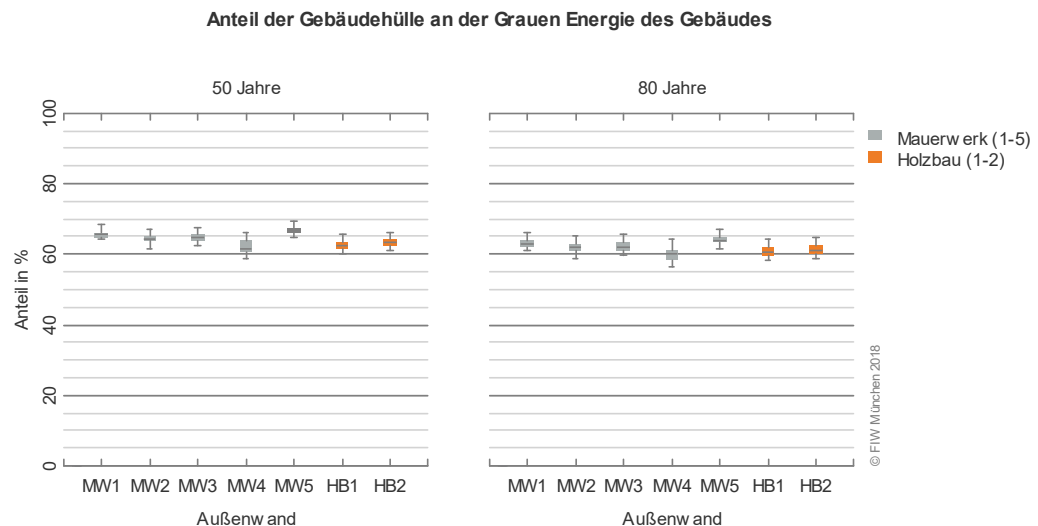


Abbildung 10: Anteil der Gebäudehülle an der gesamten Grauen Energie des Gebäudes in %.

6.3 Anteil der Außenwand an gesamter Grauer Energie

Abbildung 11 zeigt allein den Anteil der Außenwand am gesamten Aufwand an Grauer Energie des Gebäudes. Ohne die übrigen Bauteile der Gebäudehülle fällt dieser damit im Vergleich auch deutlich niedriger aus und beträgt zwischen minimal etwa 11

und maximal etwa 23% für 50 Jahre bzw. 10 und 20% für 80 Jahre. Der Schwankungsbereich liegt konstruktionsabhängig bei etwa 5-10%. Die energetisch günstigste Konstruktion wird im Vergleich der Außenwandsysteme hier durch einen massiven Wandbildner (MW4) erzielt.

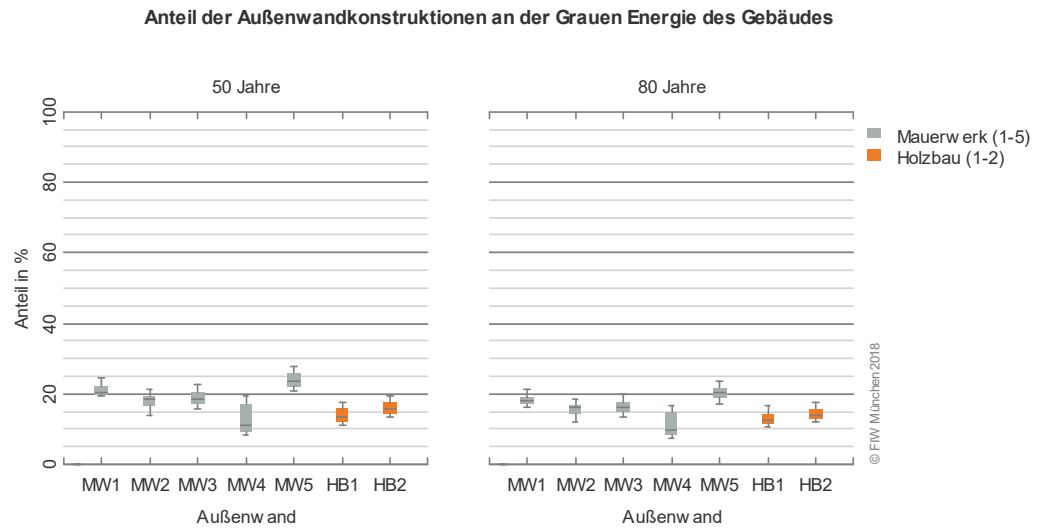


Abbildung 11: Anteil der Außenwand an der gesamten Grauen Energie des Gebäudes in %.

7 Auswirkung einer Anhebung der Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz in Sinne eines zukünftigen Niedrigstenergiegebäudes

Im Sinne einer weiteren Reduktion von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen von Gebäuden, taucht bei einer fortschreitenden Reduzierung gegen Null ein gewisses »Last-Mile-Problem« auf: Je mehr eingespart werden soll, desto kostenintensiver und aufwändiger erweisen sich die einzuleitenden Maßnahmen. Auch steigt mit höheren Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz der Primärenergieaufwand für die Herstellung des Gebäudes. Verbesserungen, die zur Einsparung von Energie führen sollen, sind meist mit einem höheren Materialeinsatz und damit einem höheren Input an Grauer Energie verbunden.

Im Rahmen der Studie zur Wirtschaftlichkeit von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie-Gebäudestandard [5] wird gezeigt, dass hinsichtlich der thermischen Qualität der Gebäudehülle ein Grenznutzen erreicht ist. Eine deutliche Verschärfung der Anforderung bewirkt – insbesondere in Kombination mit effizienter oder auf erneuerbaren Energien basierender Versorgungstechnik – nur noch geringe Primärenergieeinspareffekte bei steigenden jährlichen Kosten. Bei einer leichten Erhöhung der Anforderungen an die Gebäudehülle ($H'_T/H'_{T,Ref}=0,90$) gegenüber der EnEV 2016 entspricht dies einer Kostensteigerung von 0,6%. Deshalb soll im Folgendem betrachtet werden, wie sich eine solche Anhebung der Anforderungen an H'_T auf den Aufwand an Grauer Energie auswirkt.

7.1 Außenwandkonstruktionen

Die Graue Energie der verschiedenen Varianten der Gebäudehülle kann in Abhängigkeit des spezifischen Transmissionswärmeverlustkoeffizienten H'_T dargestellt werden (Abbildung 12), um die Wechselwirkungen von besserer thermischer Qualität und Primärenergieeinsatz abzubilden. Berücksichtigt werden in allen Fällen ein Betrachtungszeitraum von 50 a und 80 a. Bezugsgröße für die ermittelten Kennwerte bildet die Nutzfläche A_N .

Die Ergebnisse für die Gebäudehülle zeigen einen klaren Zusammenhang zwischen Primärenergieeinsatz und thermischer Qualität der Gebäudehülle. Mit steigenden Anforderungen an H'_T nimmt auch der Primärenergieaufwand zu. Wie Abbildung 13 zeigt, nimmt der Einsatz an Grauer Energie für die Gebäude mit zunehmenden Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz linear zu. In Abbildung 13 sind der durchschnittliche Einsatz an Grauer Energie in $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für die Gebäudehülle bei zwei unterschiedlichen Wärmeschutzniveaus abgebildet. Dargestellt sind die Werte für die beiden Betrachtungszeiträume von 50 bzw. 80 Jahren in Abhängigkeit der gewählten Außenwandkonstruktion. Sowohl bei der 50 als auch 80-jährigen Betrachtung nimmt der gesamte Primärenergiebedarf für den höheren Materialaufwand um 0,5 bis 0,6 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ zu. Dieser Mehraufwand wird durch die rechnerischen

Energieeinsparungen ausnahmslos für alle Versorgungsvarianten überkompensiert. Aus rein primärenergetischer Sichtweise lohnt sich der höhere Aufwand für die untersuchten Konstruktionen daher immer. Die energetische Amortisationszeit liegt bei wenigen Monaten.

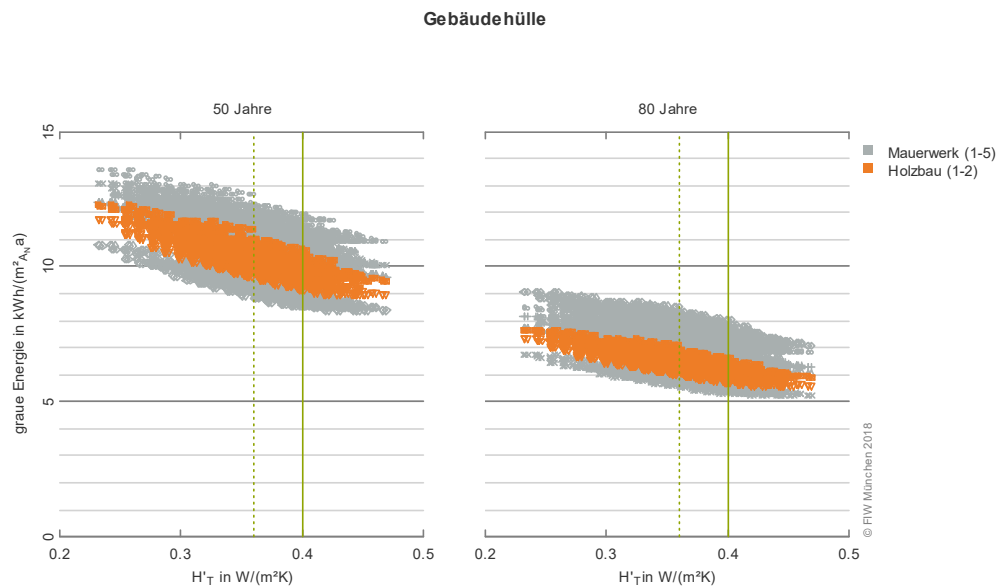


Abbildung 12: Graue Energie in kWh/(m²a) für die Gebäudehülle in Abhängigkeit von H'T bei einem Betrachtungszeitraum von 50a (links) und 80a (rechts). Die vertikalen Linien markieren die Mindestanforderungen nach EnEV 2016 (0,40 W/(m²K) – grüne Linie) und eine Verbesserung um 10% (0,36 W/(m²K) – grün gestrichelte Linie).

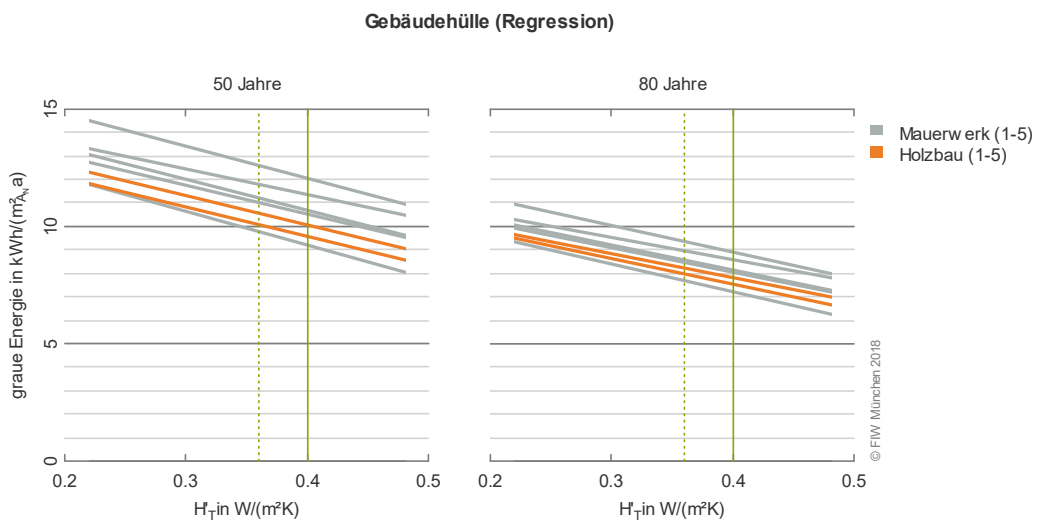


Abbildung 13: Graue Energie in kWh/(m²a) für die Gebäudehülle in Abhängigkeit von H'T bei einem Betrachtungszeitraum von 50a (links) und 80a (rechts) als lineare Regression der Ergebnisse.

Mauerwerkskonstruktionen (MW1-MW5)

Mit steigenden Anforderungen an H'T nimmt der Primärenergieaufwand zu. Für den 50-jährigen Betrachtungszeitraum ergeben sich daraus Werte zwischen 8,9 und 12,5 kWh/(m²a), für den 80-jährigen Betrachtungszeitraum zwischen 7,5 und 9,4 kWh/(m²a). Die Ergebnisse lassen erkennen, dass mit der Mauerwerksbauweise ein großes Feld an Wahlmöglichkeiten für die Konfiguration der Gebäudehülle

gegeben ist, das sehr unterschiedliche Einflussmöglichkeiten auf den Primärenergiekennwert zulässt.

Der Anteil der Außenwand am Primärenergieeinsatz für die Gebäudehülle bleibt für alle thermischen Varianten nahezu gleich oder geht zum Teil sogar leicht zurück, obwohl der Aufwand mit dem steigenden Materialeinsatz zunimmt. Dies hängt damit zusammen, dass alle Bauteile von diesem Ansatz gleichermaßen betroffen sind und sich somit das Verhältnis untereinander nur gering verändert. Die Werte liegen bei 50 a zwischen 10 und 27%. Bei der längerfristigen Betrachtung reduziert sich der Anteil der Außenwand weiter (zwischen 8 und 23%), da die Ersatzzyklen bei den sonstigen Bauteilen in der Regel kürzer sind.

Holzbauweise (HB1, HB2)

Die Holzbaukonstruktionen (HB1, HB2) benötigen bei einer 50-jährigen Betrachtung einen Primärenergieeinsatz zwischen 9,5 und 10,5 kWh/(m²a). Diese Werte verändern sich bei einem Zeitraum von 80a und ergeben einen Bereich zwischen 7,2 und 8,2 kWh/(m²a). Im Vergleich zum überwiegenden Teil der Mauerwerksvarianten ergeben sich daraus leichte Vorteile zugunsten der Holzbauvarianten.

Durch Holzverbundwerkstoffe (z.B. Spanplatten) oder die Kombination mit WDVS (auf Basis von Mineralwolle) weisen auch die Holzkonstruktionen Primärenergieanteile für die stoffliche Verwendung aus. Dieser Anteil kann etwa zwischen 5 und 15% bei 50 Jahren und zwischen 4 und 12% bei 80 Jahren liegen. Alle übrigen Anteile an Grauer Energie sind für den energetischen Einsatz notwendig. Bei den Holzbaukonstruktionen ist zu beobachten, dass der stoffliche Anteil der Primärenergie für die Außenwand im Verhältnis zur Gebäudehülle bei niedrigeren H'_{T} -Werten leicht abnimmt, da der Einfluss anderer Konstruktionen/ Bauteile offenbar größer wird.

Der Anteil an Grauer Energie für die Außenwand in Holzbauweise reicht von etwa 13 bis 25% im Verhältnis zum Primärenergieeinsatz für das gesamte Gebäude bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Für 80 Jahre liegt dieser Bereich mit 12 bis 22% etwas niedriger, da andere Bauteile stärker auf das Ergebnis einwirken.

Das Verhältnis aus Energieeinsatz für die Gebäudehülle und für das Gesamtgebäude ergibt für die Holzbaukonstruktionen Anteile zwischen 54 und 64% für 50 Jahre und zwischen 52 und 62% für 80 Jahre. Die Gebäudehülle dominiert zwar insgesamt den Einsatz an Grauer Energie, die Unterschiede zwischen den verschiedenen Bauweisen sind aber gering. Für eine bestimmte thermische Qualität der Hülle (z.B. $H'_{T}=0,30$) liegen alle möglichen Varianten in einem Korridor von etwa 10-15%, das als Potenzial für Einsparungen durch die Auswahl der Konstruktion gegeben ist.

7.2 Vergleich mit möglicher Energieeinsparung

Nachfolgende Tabellen zeigen den Bedarf an Grauer Energie (Median) der verschiedenen Außenwandtypen in Abhängigkeit der thermischen Qualität der Gebäudehülle (H'_T). Eine leichte Verbesserung der Gebäudehülle ($H'_{T,soil} = H'_{T,Ref} \cdot 0,9$) bewirkt, je nach Konstruktion und Betrachtungszeitraum, einen Anstieg des Primärenergieeinsatzes zwischen 0,4 und 1,0 kWh/(m²a). Dem steht, abhängig von der Wahl des Versorgungssystems, eine Einsparung zwischen 1,3 und 7,7 kWh/(m²a) gegenüber. Dies bedeutet, dass die Energieeinsparungen im Betrieb dem Mehraufwand durch die aufwändigeren Wandkonstruktionen überwiegen. Dieser Trend zeigt sich auch bei höheren energetischen Gebäudestandards.

Tabelle 7: durchschnittlicher Einsatz Grauer Energie in kWh/(m²a) für die Gebäudehülle bei einem Betrachtungszeitraum von 50 a bzw. 80 a und zwei unterschiedlichen Wärmeschutzniveaus.

	Graue Energie in kWh/(m ² a)					
	Betrachtungszeitraum: 50 a			Betrachtungszeitraum: 80 a		
	Anforderung an den baulichen Wärmeschutz nach:			Anforderung an den baulichen Wärmeschutz nach:		
	EnEV 2016	EnEV 2016 - 10%	Differenz	EnEV 2016	EnEV 2016 - 10%	Differenz
MW1	11,3	11,8	+0,5	8,5	8,9	+0,4
MW2	10,5	11,0	+0,5	8,0	8,4	+0,4
MW3	10,6	11,2	+0,6	8,1	8,5	+0,4
MW4	8,9	9,4	+0,5	7,0	7,6	+0,6
MW5	11,9	12,5	+0,6	8,9	9,4	+0,5
HB1	9,5	10,0	+0,5	7,5	8,0	+0,5
HB2	10,0	10,5	+0,5	7,2	8,2	+1,0

Tabelle 8: Veränderung des errechneten Primärenergiebedarfs nach EnEV 2016 bei Verringerung der Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz um 10%. Die Varianten, die die Gesamtanforderungen der EnEV 2016 erfüllen, sind grau hinterlegt.

Versorgungsvariante	Primärenergiebedarf in kWh/(m ² a)		
	Anforderung an den baulichen Wärmeschutz nach		Einsparung
	EnEV 2016	EnEV 2016 - 10%	
BW0 (Ref)	90,2	82,5	7,7
BW1	92,6	84,9	7,7
BW2	75,4	68,5	6,9
WP1	50,5	46,8	3,7
WP2	34,7	32,6	2,1
Hz	23,9	22,6	1,3
FW	66,9	62,0	4,9

Nachfolgende Grafik (Abbildung 14) zeigt den Vergleich der Grauen Energie für das gesamte Gebäude in Abhängigkeit der verschiedenen Außenwandkonstruktionen und den Primärenergiebedarf für den Gebäudebetrieb bei Anwendung einer Wärmepumpe (Variante WP1). Deutlich ist zu erkennen, dass bei allen dargestellten energetischen Gebäudestandards (EnEV 2016, Effizienzhaus 70 und Effizienzhaus 55) der Primärenergieaufwand im Betrieb den Aufwand für Errichtung, Ersatz und Entsorgung bei Weitem übertrifft. So beträgt der bauliche Primärenergieaufwand ungefähr zwischen 18 und 20 kWh/(m²a), während der Betrieb je nach Standard zwischen knapp 40 und 50 kWh/(m²a) benötigt. Außerdem ist gut zu erkennen, dass der Sprung zum nächsthöheren energetischen Standard baulicherseits nur geringen zusätzlichen Aufwand an Grauer Energie bedeutet. Dem stehen aber deutliche Einsparungen beim Betrieb gegenüber. Die Angaben sind pro Jahr und bezogen auf die Nutzfläche A_N .

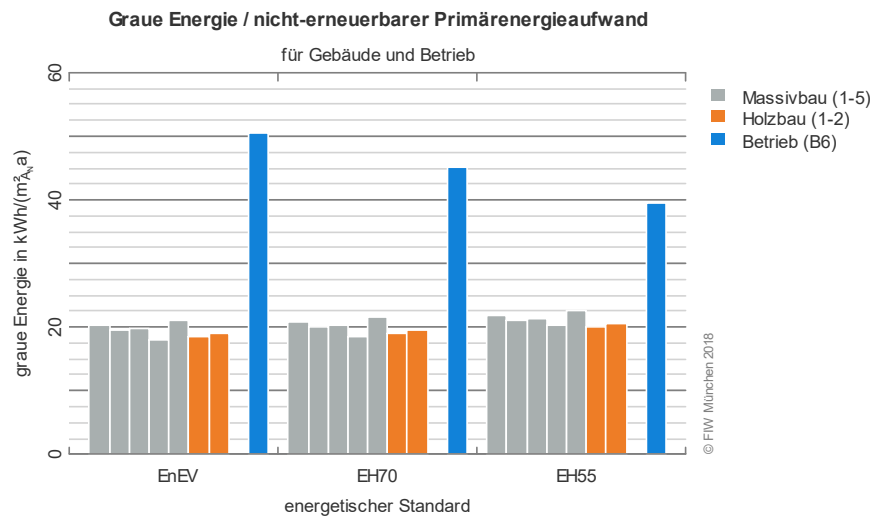


Abbildung 14: Vergleich von Grauer Energie für das Gebäude und Primärenergie für den Gebäudebetrieb in Abhängigkeit des Gebäudestandards. Die linken, grauen und orangen Balken zeigen den Primärenergieaufwand der verschiedenen Außenwandtypen (MW1-MW5, HB1+HB2). Die rechten, blauen Balken benennen den Primärenergiebedarf für den Gebäudebetrieb bei Anwendung der Versorgungsvariante mit Wärmepumpe (WP1).

8 Fazit

Bisher richtet der normative Rahmen zur energetischen Bilanzierung von Gebäuden seinen Fokus auf die Betriebs- bzw. Nutzungsphase des Gebäudes, indem die Verbrauchs- bzw. Bedarfswerte als wesentliche Kenngrößen ausgewiesen werden. Aufwände für die Herstellung der Bauprodukte, die Errichtung des Gebäudes und die letztlich notwendige Entsorgung sind darin nicht enthalten. Wie Abbildung 15 qualitativ beschreibt, konnte der gesamte Primärenergiebedarf im Laufe der Jahre stark reduziert werden. Gleichzeitig nimmt jedoch der Anteil, der zur Errichtung von Gebäuden aufgrund des höheren Materialeinsatzes für aufwändigere Konstruktionen notwendig ist, im Verhältnis stetig zu.

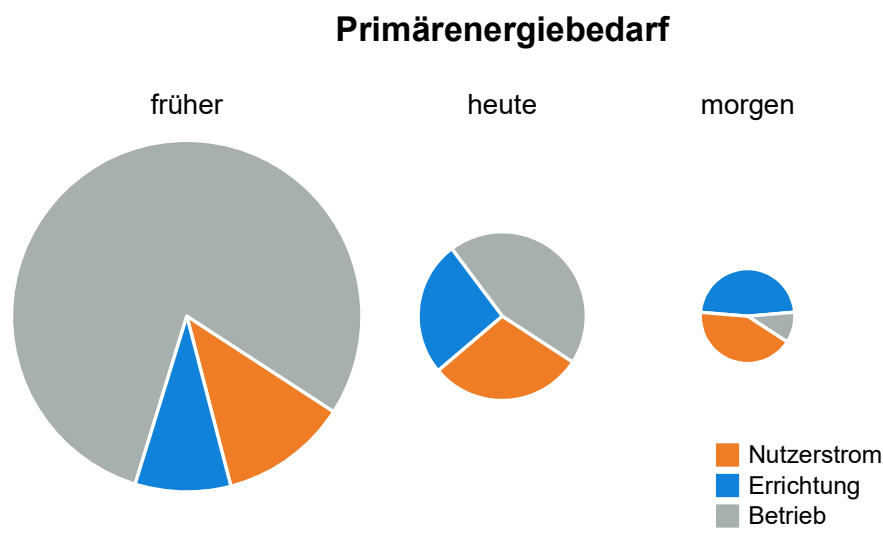


Abbildung 15: Qualitative Entwicklung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes im Laufe der Zeit. Dargestellt sind die absoluten Anteile für Nutzerstrom, Raumwärme inkl. Warmwasser (Betrieb) sowie der Primärenergieeinsatz des Gebäudes für die Herstellungsphase der verwendeten Bauprodukte (Errichtung) bei Annahme einer Nutzungsdauer von 50 Jahren.

In diesem Zusammenhang fällt häufig auch der Begriff der so genannten **Grauen Energie**. Darunter wird meist jener Energiebedarf verstanden, der nötig ist, um die Materialien herzustellen, an die Baustelle zu transportieren und zu verbauen. Allerdings ist dieser Begriff hierzulande nicht eindeutig definiert und wird deshalb auch unterschiedlich verwendet bzw. interpretiert. Häufig ist damit eine Bilanzierung der Herstellungsphase nach dem Prinzip „**Cradle to Gate**“ verbunden, die damit aber nur einen sehr begrenzten Teilbereich bilanziert. Diese Studie bedient sich daher des Bewertungssystems für nachhaltige Bauten (BNB) des Bundes. Betrachtet werden der kumulierte, nicht-erneuerbare Primärenergieaufwand für die Herstellungs- sowie Teile der Betriebs- und Entsorgungsphase. Aussagen zum Energieeinsatz für die Herstellung und Verarbeitung von Bauprodukten sind ein wesentlicher und wichtiger Schritt, um Gebäude ganzheitlich zu bewerten. Der allgemein praktizierte Fokus auf

den Gebäudebetrieb und damit Energieverbrauch von Gebäuden lässt den Energieaufwand für die Errichtung außer Acht. Oft wird argumentiert, dass mit der Auswahl der Wandbaustoffe allein ein wichtiger Beitrag zur Nachhaltigkeit erbracht wird. Regelwerke und Normen existieren viele, die das methodische Vorgehen beschreiben. Allerdings ist die Datenlage zu den Bauprodukten weiterhin begrenzt. In dieser Studie wurden öffentlich verfügbare Daten der „Ökobaudat“ als Grundlage der Berechnungen verwendet, die in der heterogenen Mischung aus spezifischen und generischen Angaben zu Produkten oder Produktgruppen möglichst repräsentative Aussagen zu den Konstruktionen ermöglichen sollen. Die Ergebnisse beschreiben damit für die untersuchten Bauteile und Konstruktionen einen allgemeinen Trend.

Aus den Berechnungen und Analysen des Typengebäude auf Basis des EnEV 2016-Standards aus der vorliegenden Arbeit lassen sich daher folgende Thesen zusammenfassen:

- (1) Bei der bauteilspezifischen Betrachtung (eingesetzte Graue Energie pro m² Bauteilfläche) ergeben sich je nach Wahl des Baustoffes (z.B. Holz, Mauerwerk, sonstige) Unterschiede. Dieser Unterschied hat aber nur einen geringen Einfluss auf den Gesamtbedarf an Grauer Energie.
- (2) Die Differenzen der einzelnen Außenwandsysteme werden umso kleiner, je weiter der Betrachtungshorizont in der Zukunft liegt. Bei langen Nutzungszeiten definiert sich die Nachhaltigkeit einer Konstruktion zusätzlich durch Langlebigkeit und Robustheit der Konstruktion mit geringen Wartungs- und Instandhaltungsaufwand. Dies ist bei der Bewertung von Wandkonstruktionen zu berücksichtigen.
- (3) Für das Typengebäude auf Basis des EnEV 2016-Standards beträgt die Differenz im Maximum gerade einmal 3 kWh/(m²a) bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren und nur noch 2 kWh/(m²a) bei 80 Jahren. Dies entspricht für das Typengebäude nach EnEV 2016-Standard 4 bis 7% (abhängig vom Versorgungssystem). Zum Vergleich: der maximale Unterschied des Primärenergiebedarfs für den Betrieb des untersuchten Einfamilienhauses beträgt etwa 70 kWh/(m²a).
- (4) Betrachtet man nur die Graue Energie, ist ein deutlich besserer baulicher Wärmeschutz anzustreben. Für alle Außenwandsysteme ist der zusätzliche Primärenergieeinsatz für die energetisch hochwertigere Konfiguration so gering, dass die berechneten Einsparungen in der Nutzungsphase die höheren Aufwände in der Herstellungsphase deutlich überkompensieren.
- (5) Die Grenzen der Wirtschaftlichkeit sind für die Gebäudehülle bei etwa 90% der bereits heute geltenden Anforderungen (EnEV 2016) an die thermische Qualität (Transmissionswärmeverlust H'T) gegeben (siehe Studie „Wirtschaftlichkeit von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie-Gebäudestandard“).

- (6) Neben der energetischen Qualität von Gebäuden spielen aber auch andere Faktoren wie ein angenehmes Raumklima, guter Schallschutz, effiziente Raumaufteilungen und hochwertige und nachhaltig erzeugte Materialien für viele Menschen eine mindestens ebenso große Rolle.

Berücksichtigt man alle ökonomischen und ökologischen Kriterien, wird schnell klar: Kein Baustoff ist uneingeschränkt zu empfehlen oder zu verwerfen. Aber durch die Auswahl von angemessenen umweltgerechten Baustoffen und Fügungsweisen ist ressourcenschonendes und nachhaltiges Bauen realisierbar.

Es ist angesichts der Komplexität und des notwendigen Aufwands weder möglich noch sinnvoll, allen Auswahlkriterien die gleiche Beachtung zu schenken. Der ideale Baustoff steht in einem ausgewogenen Verhältnis hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und bautechnischer Aspekte und wird auch weiteren individuellen Anforderungen wie Schall- und Brandschutz gerecht.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung 2016.
- [2] Friedrich, E.G.; Müller, G.: Die Bauwirtschaft im Kleinwohnungsbau. Kritische Betrachtung der neuzeitlichen Bauweisen und Mitteilung von Erfahrungen mit Baustoffen. Berlin 1922.
- [3] Schweizer Ingenieur- und Architektenverein SIA: Graue Energie von Gebäuden (2010) 32. Zürich.
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V.: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklaration - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013 91.010.99 (2014) 15804. Berlin.
- [5] Holm, A. H.; Kagerer, F.; Maderspacher, C.; Sprengard, C.; Walberg, D.; Gniechwitz, T.: Wirtschaftlichkeit von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie-Gebäudestandard. Berlin 2017.
- [6] Figl, H.; Brockmann, T.; Kerz, N.; Kusche, O.; Rössig, S.: Ökobaudat. Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung. Bonn 2017.
- [7] BNK Bewertungskriterien Neubau Ein- bis Fünffamilienhäuser 2015.
- [8] Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Berlin 2011.

10 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Qualitative Entwicklung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes im Laufe der Zeit. Dargestellt sind die absoluten Anteile für Nutzerstrom, Raumwärme inkl. Warmwasser (Betrieb) sowie der Primärenergieeinsatz des Gebäudes für die Herstellungsphase der verwendeten Bauprodukte (Errichtung) bei Annahme einer Nutzungsdauer von 50 Jahren. 3
- Abbildung 2: Vergleich von der gesamten Grauen Energie für ein typisches Einfamilienhaus mit dem Primärenergieaufwand für den Gebäudebetrieb in Abhängigkeit des energetischen Gebäudestandards. Angaben in kWh/(m²a), bezogen auf die Nutzfläche A_N. Die linken Balken zeigen in grau (Massivbau) und orange (Holzbau) den Einfluss verschiedenen Außenwandkonstruktionen. Die rechten, blauen Balken benennen den Primärenergiebedarf für den Gebäudebetrieb (auf Basis einer Versorgungsvariante mit Wärmepumpe). 5
- Abbildung 3: Gesamter Aufwand an Grauer Energie in kWh/(m²a) für die Gebäudehülle in Abhängigkeit von H'_T bei einem Betrachtungszeitraum von 50a (links) und 80a (rechts). Die vertikalen Linien markieren die Mindestanforderungen nach EnEV 2016 (0,40 W/(m²K) – grüne Linie) und eine Verbesserung um 10% (0,36 W/(m²K) – grün gestrichelte Linie). Die orangen Punkte stellen die Holzbau- die grauen Punkte die Massivbauvarianten dar. 5
- Abbildung 4: Darstellung der „Grauen Energie“ im Jahr 1922 für verschiedene Baukonstruktionen. 8
- Abbildung 5: Verfügbare Datensätze der Ökobaudat sortiert nach sortiert nach Datentyp und (bzw. Datenqualität) und Bilanzierungsmodul A-D 10
- Abbildung 6: Verfügbare Datensätze der Ökobaudat sortiert nach Materialgruppe und Bilanzierungsmodul A-D 10
- Abbildung 7: Bilanzgrenzen der Ökobilanzierung (DIN EN 15804) [4] sowie die Bilanzierungsmodule nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) in farbiger Darstellung (orange). 11
- Abbildung 8: Gesamtaufwand an Grauer Energie in kWh/(m²a) für alle Bauteile der Gebäudehülle bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren bezogen auf die Bauteilfläche (links) und die Nutzfläche A_N (rechts). 20

- Abbildung 9: Gesamtaufwand Graue Energie in kWh/(m²a) für die Gebäudehülle bei einem Betrachtungszeitraum von 50a (links) und 80a (rechts) bezogen auf die Nutzfläche A_N. 22
- Abbildung 10: Anteil der Gebäudehülle an der gesamten Grauen Energie des Gebäudes in %. 23
- Abbildung 11: Anteil der Außenwand an der gesamten Grauen Energie des Gebäudes in %. 24
- Abbildung 12: Graue Energie in kWh/(m²a) für die Gebäudehülle in Abhängigkeit von H'T bei einem Betrachtungszeitraum von 50a (links) und 80a (rechts). Die vertikalen Linien markieren die Mindestanforderungen nach EnEV 2016 (0,40 W/(m²K) – grüne Linie) und eine Verbesserung um 10% (0,36 W/(m²K) – grün gestrichelte Linie). 27
- Abbildung 13: Graue Energie in kWh/(m²a) für die Gebäudehülle in Abhängigkeit von H'T bei einem Betrachtungszeitraum von 50a (links) und 80a (rechts) als lineare Regression der Ergebnisse. 27
- Abbildung 14: Vergleich von Grauer Energie für das Gebäude und Primärenergie für den Gebäudebetrieb in Abhängigkeit des Gebäudestandards. Die linken, grauen und orangen Balken zeigen den Primärenergieaufwand der verschiedenen Außenwandtypen (MW1-MW5, HB1+HB2). Die rechten, blauen Balken benennen den Primärenergiebedarf für den Gebäudebetrieb bei Anwendung der Versorgungsvariante mit Wärmepumpe (WP1). 31
- Abbildung 15: Qualitative Entwicklung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes im Laufe der Zeit. Dargestellt sind die absoluten Anteile für Nutzerstrom, Raumwärme inkl. Warmwasser (Betrieb) sowie der Primärenergieeinsatz des Gebäudes für die Herstellungsphase der verwendeten Bauprodukte (Errichtung) bei Annahme einer Nutzungsdauer von 50 Jahren. 32

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der nicht-erneuerbaren Primärenergie-Anteile als Grundlage der Grauen Energie.	12
Tabelle 2:	Auszug der wichtigsten Kennwerte und Angaben zum Typengebäude.	13
Tabelle 3:	Auszug der wichtigsten Kennwerte sowie Flächen des Typengebäudes.	14
Tabelle 4:	Gruppierung der Außenwandsysteme.	15
Tabelle 5:	Versorgungsvarianten für das Typengebäude. Die grau hinterlegte Variante beschreibt die Basisvariante.	18
Tabelle 6:	gesamter nicht-erneuerbarer Primärenergieeinsatz der Versorgungstechnikvarianten in kWh zum Erstellungszeitpunkt sowie bei einem Betrachtungszeitraum von 50 a bzw. 80 a.	21
Tabelle 7:	durchschnittlicher Einsatz Grauer Energie in kWh/(m ² a) für die Gebäudehülle bei einem Betrachtungszeitraum von 50 a bzw. 80 a und zwei unterschiedlichen Wärmeschutzniveaus.	29
Tabelle 8:	Veränderung des errechneten Primärenergiebedarfs nach EnEV 2016 bei Verringerung der Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz um 10%. Die Varianten, die die Gesamtanforderungen der EnEV 2016 erfüllen, sind grau hinterlegt.	30

