

Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung

Kurztitel:

Graue Energie im Ordnungsrecht/Förderung

Endbericht

Stand: 06.02.2019

Forschungsprogramm
Zukunft Bau

Projektlaufzeit
07. Dezember 2017 bis 31. Mai 2018

Aktenzeichen
10.08.17.7-17.07b

im Auftrag
des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von
Dr. Boris Mahler, Steinbeis-Transferzentrum für Energie-, Gebäude- und Solartechnik, Stuttgart
M.Sc. Simone Idler, Steinbeis-Transferzentrum für Energie-, Gebäude- und Solartechnik, Stuttgart
Dr. Johannes Gantner, Fraunhofer IBP, Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
1 Hauptaussagen und Randbedingungen aus dem Projekt FKZ 3715 41 111 0	5
1.1 Randbedingungen	5
1.1.1 Auswahl und Marktabdeckung Typgebäude Wohnungsbau	5
1.1.2 Gewählte Bilanzgrenzen und untersuchte Energiekonzepte	7
1.1.3 Allgemeine Beurteilung des ökobilanziellen Modells	10
1.1.4 Erläuterung zu Auffälligkeiten bei den Ergebnisgrößen	14
1.2 Darstellung der Hauptaussagen	16
1.2.1 Betrachtung der Bedeutung des Energieaufwands im Lebenszyklus	16
1.2.2 Verhältnis von Konstruktion zu Energieaufwand im Betrieb	17
1.2.3 Einfluss in der Konstruktion	20
1.2.4 Einfluss in der Nutzungsphase	23
1.2.5 Lenkungswirkung durch Einbeziehung "graue Energie"	25
1.3 Erste Empfehlungen für umweltpolitische Maßnahmen	26
2 Erfordernisse an Beurteilungsniveaus im Hinblick ordnungsrechtlicher Regelungen	27
2.1 Referenzierung und Benchmarking	27
2.1.1 Existierende Benchmarks und Bewertungssysteme im Wohnungsbau	27
2.1.2 Bezugsgrößenanalyse	29
2.1.3 Erweiterte Randbedingungen und Bilanzgrenzen	29
2.1.4 Ausblick auf erste orientierende Benchmarks	31
2.1.5 Einfluss einer dynamischen Entwicklung	34
2.2 Möglichkeiten einer ordnungsrechtlichen Verankerung	38
2.2.1 Auswirkungen auf bestehende Planungsprozesse und Nachweispflichten	38
2.2.2 Erfordernisse für eine Nachweismethode und bausoftwaretechnische Lösung	39
2.3 Empfehlungen für eine weitere Vorgehensweise	41
Abbildungsverzeichnis	43
Tabellenverzeichnis	43
Literaturverzeichnis	44

Kurzfassung

Die Studie zeigt auf, welche Effekte die bisherige Vernachlässigung der „grauen Energie“ bei Wohngebäuden hat und wie diese bei einer ganzheitlichen Bilanzierung der Gebäudeenergie im Lebenszyklus berücksichtigt werden kann. Unter „grauer Energie“ wird dabei die energiebedingten Aufwendungen für die Herstellung, Instandsetzung und End of Life (EoL) der Baumaterialien verstanden. Neben dem nicht erneuerbaren kumulierten Energieaufwand (KEAne) wird hier vor allem auf die Auswirkungen hinsichtlich Klimawirksamkeit in Form der äquivalenten CO₂-Emissionen¹ (GWP 100) geachtet. Das vom Umweltbundesamt geförderte Vorhaben „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus, FKZ 3715 41 111 0“ bildet die Grundlage der vorliegenden Studie.

Wird nur die Bilanzgrenze der EnEV betrachtet (Heizung, Warmwasser, Lüftung und Hilfsstrom im Gebäudebetrieb), liegt der Anteil „graue Energie“ in Bezug auf den Gesamtbedarf bei Neubauten nach EnEV-Standard bei etwa 40 %. Bei verbesserten Gebäudeenergiestandards mit mehr Dämmung und Technik steigt der Anteil „graue Energie“ auf bis zu 60 % an. Nullenergiegebäude können die CO₂-Emissionen im Betrieb durch lokale, erneuerbare Stromerzeugung drastisch reduzieren. Bei Plusenergiegebäuden verbleiben bilanziell lediglich Emissionen im Umfang der Konstruktion.

Bei typischen Neubauten beträgt die „grauen Energie“ 10 – 16 kgCO₂-Ä./($m^2_{Wfl.} \cdot a$). Durch die Wahl der Baumaterialien und der Baukonstruktion kann der Anteil graue Energie um 6 kgCO₂-Ä./($m^2_{Wfl.} \cdot a$) reduziert werden. Hochgerechnet auf das jährliche Neubauvolumen könnten damit ca. 7 Mio. t CO₂-Ä. jährlich eingespart werden. Um dieses Einsparpotenzial zu nutzen, ist es notwendig Methoden der Ökobilanzierung in der Planungspraxis zu verankern. Die technische Umsetzung durch Kopplung entsprechender Softwareprogramme ist heute bereits möglich. Die vorhandene Datenbasis zu Produktinformationen muss jedoch ausgebaut und standardisiert werden. Bereits vereinfachte Ansätze einer Ökobilanzierung für Gebäude können das Verbesserungspotenzial aufzeigen. Die CO₂-Vermeidungskosten unter Berücksichtigung der Mehrkosten für Bauweise und Ökobilanz belaufen sich auf etwa 180 €/tCO₂.

Für die Bewertung von innovativen Gebäudeenergiekonzepten bis hin zu klimaneutralen Gebäuden ist eine Erweiterung der Bilanzgrenze unumgänglich. Zusätzlich zum Gebäudeenergiebedarf nach EnEV muss der Nutzerstrom betrachtet werden, welcher bei sehr effizienten Gebäuden so hoch ist wie der Energiebedarf für Heizung und Warmwasser zusammen. Außerdem sind für klimaneutrale Gebäude häufig technische Anlagen mit gekoppelter Erzeugung von Wärme und Strom im Einsatz.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorgabe eines Gebäudeenergiestandards (EnEV, KfW, Passivhaus, Nullenergie, Plusenergie) kein Garant für eine Einsparung an CO₂-Emissionen ist und daher die Wirkung hinsichtlich Klimaschutz ggf. verfehlt wird. Eine zukünftige Bewertung muss verpflichtend zum Primärenergiebedarf, die CO₂-Emissionen ausweisen. Weiterhin ist eine Umstellung auf absolute Zielwerte anstatt der Bewertung nach dem Referenzgebäudeverfahren anzustreben.

Ausgehend vom globalen 2 °C Ziel wurde ein CO₂-Zielwert für klimaneutrale Gebäude von 12 – 17 kgCO₂-Ä./($m^2_{Wfl.} \cdot a$) ermittelt. Grundlage ist eine Flächeninanspruchnahme pro Person von 40 $m^2_{Wfl.}$ /Person. Dieser CO₂-Zielwert ist mit den heute verfügbaren Techniken sowohl bei Bestandssanierungen als auch im Neubau erreichbar. Voraussetzung ist die konsequente Nutzung der solar verfügbaren Energie durch Photovoltaik am Gebäude und

¹ Im Bericht wird der Begriff CO₂-Emissionen als Synonym für das CO₂-Äquivalent bzw. das Treibhauspotenzial (GWP 100 =Global Warming Potential) der Varianten verwendet.

ein hoher Anteil regenerativer Wärmeerzeugung. Im Neubau kann die „graue Energie“ durch den Einsatz von (Holz-) Leichtbauweise, alternative Materialien wie Geopolymere anstelle von Zement, Glasfaser- statt Stahlbewehrung und nachhaltigen Dämmstoffe weiter reduziert werden. Speziell im Bereich Photovoltaik muss das Herstellverfahren optimiert werden.

Über Maßnahmen am Gebäude hinaus muss die „Energie-Infrastruktur“ dekarbonisiert d.h. der Anteil kohlenstoffarmer und erneuerbarer Energieträger in den Strom-, Gas- und Wärmenetzen deutlich erhöht werden. Die Dynamik eines sich verändernden Energiemix im Betrachtungszeitraum muss bei Nachweisverfahren berücksichtigt werden. Durch eine veränderte Energiebereitstellung im Jahr 2050 mit einem hohen Anteil regenerativer Energien verschlechtern sich beispielsweise KWK-Varianten und Wärmepumpenlösungen erreichen mit die niedrigsten CO₂-Emissionen.

Durch die Erweiterung der Bilanzgrenze mit Einbezug von „grauer Energie“ und Nutzerstrom sowie der Umstellung der Bewertungsgröße von Primärenergie auf CO₂-Emissionen kann kostenneutral bzw. mit geringen Mehrkosten von 4% pro Jahr eine Verbesserung der Klimaschutzwirkung um 75 - 85 % erreicht werden.

Für die schnelle Umsetzung empfehlen die Autoren die Entwicklung einer vereinfachten Nachweismethode und die Förderung des Mehraufwandes in der Planung in der Einführungsphase. Mittelfristig sollte eine Anpassung der EnEV/GEG die genannten Aspekte berücksichtigen. Dieser neue ganzheitliche Ansatz für die Gebäudebewertung unterscheidet sich stark von der bisherigen Vorgehensweise. Die Rahmenbedingungen für eine ordnungsrechtliche Verankerung müssen im weiteren Verlauf geprüft werden.

1 Hauptaussagen und Randbedingungen aus dem Projekt FKZ 3715 41 111 0

1.1 Randbedingungen

1.1.1 Auswahl und Marktabdeckung Typgebäude Wohnungsbau

Die Untersuchungen wurden anhand von ausgewählten Typgebäuden im Neubau und Bestand durchgeführt. Diese Typgebäude sind repräsentativ für etwa 20 % des gesamten Wohngebäudebestandes von knapp 19 Mio. Wohngebäuden und des anfallenden Heizwärmebedarfes. Stellvertretend für den Neubaubereich wurde ein mittelgroßes Mehrfamilienhaus (MFH) mit 20 Wohneinheiten und ein Reihenendhaus (EFH) ausgewählt (s. Abbildung 1). Rund ein Prozent der Gebäude und Wohnfläche wurde 2015/2016 in Deutschland neu errichtet (s. Abbildung 3).

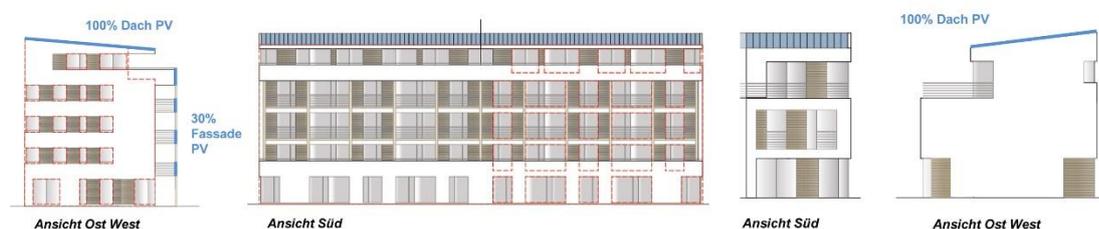


Abbildung 1: Typgebäude Neubau MFH und EFH, Entwurf nach Eble Messerschmidt Partner 2016

Für die Abbildung des Gebäudebestandes wurde auf die Gebäudetypologie und deren Verteilung in Deutschland gemäß IWU (vgl. IWU 2015) zurückgegriffen. Es wurden Typgebäude der Baualtersklassen 1919 – 1978 ausgewählt. Die unmittelbar von einer Sanierung stehenden Gebäude dieser Baualtersklasse wurden vor der ersten Wärmeschutzverordnung errichtet, als die Anforderungen an den Wärmeschutz gering waren. Die Typgebäude nach Abbildung 2 wurden ausgewählt, da sie innerhalb der Baualtersklassen 1919 – 1978 die größte Verbreitung repräsentieren und keinen Denkmalschutzanforderungen unterliegen.



Abbildung 2: Typgebäude Sanierung, Quelle: IWU 2015

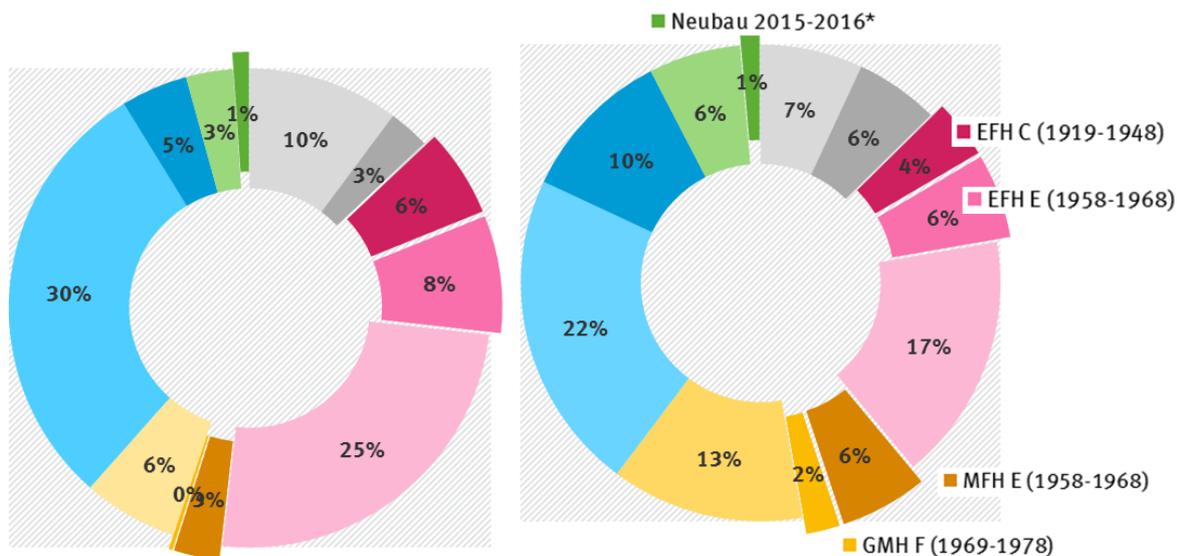


Abbildung 3: Anteil Gebäude (links) und Wohnfläche (rechts), Quelle: IWU 2015,* statistisches Bundesamt 2017

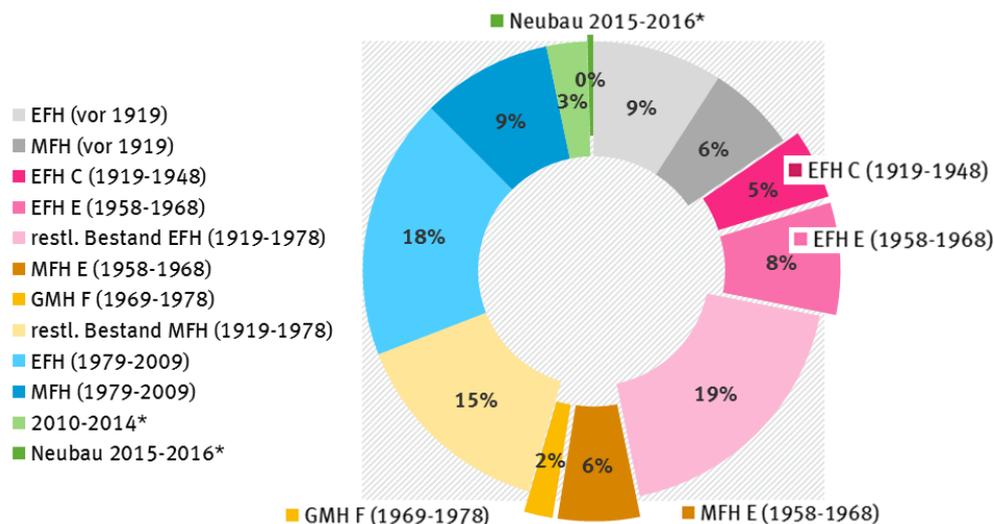


Abbildung 4: Anteil Heizenergieverbrauch, Quelle: IWU 2015

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind weitere Randdaten der ausgewählten Typgebäude dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht Typgebäude, Quelle: IWU 2015, Eble Messerschmidt Partner 2016

	MFH	EFH	EFH C	EFH E	MFH E	GMH F
Baualtersklasse	Neubau	Neubau	1919-1948	1958-1968	1958-1968	1969-1978
Vollgeschosse	4,5	2,5	2	1	4	8
WE	20	1	2	1	32	48
Wohnfläche [m ²]	1.731 (86 m ² /WE)	135	275,0 (138 m ² /WE)	110,2	2.844,6 (88 m ² /WE)	3.020 (63 m ² /WE)

1.1.2 Gewählte Bilanzgrenzen und untersuchte Energiekonzepte

Untersuchte Energiekonzepte

Für die Typgebäude im Neubau wurden insgesamt 160 Variantenkombinationen aus unterschiedlicher wärmeschutztechnischer Qualität der Gebäudehülle und Anlagentechnik untersucht. Im Mehrfamilienhaus wird zusätzlich zur Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach auch eine Fassadenanlage untersucht.

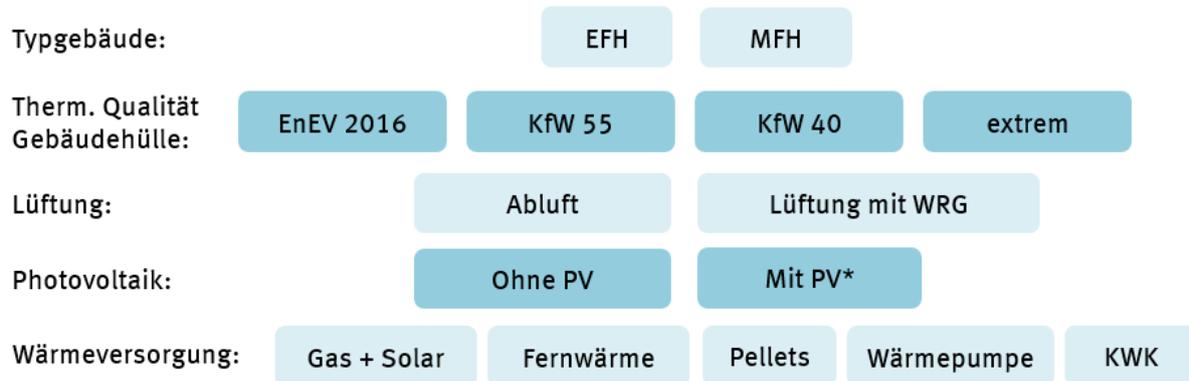


Abbildung 5: Übersicht Variantenmatrix Neubau (*MFH - Varianten mit PV auf Dach und Fassade)

Für die energetische Sanierung bestehender Gebäude werden stellvertretend für den Gebäudebestand je zwei Ein- und Mehrfamilienhäuser betrachtet. Für die vier Typgebäude werden insgesamt 240 Variantenkombinationen aus unterschiedlicher wärmeschutztechnischer Qualität der Gebäudehülle und Anlagentechnik untersucht.

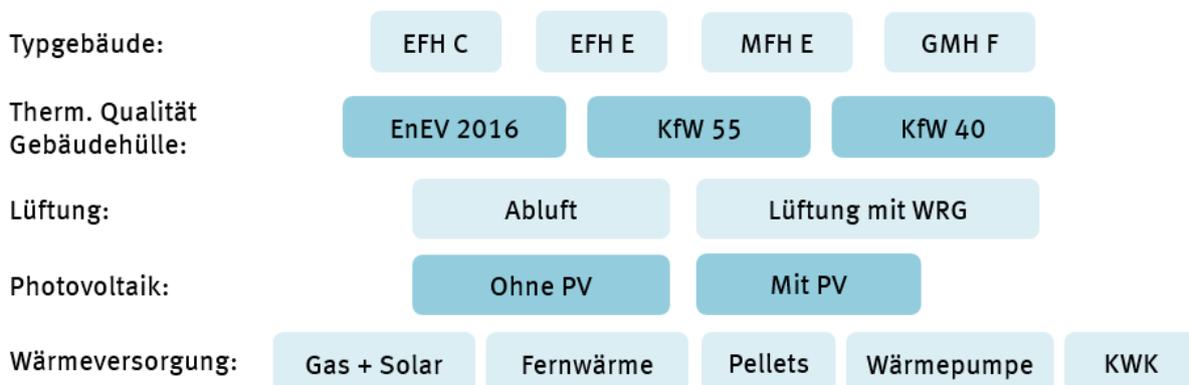


Abbildung 6: Übersicht Variantenmatrix Sanierung

Definition der Gebäudeenergiestandards

Im Rahmen der Studie werden die Gebäudeenergiestandards EnEV-2016 Neubaugebäude, Passivhaus, Nullenergie und Plusenergie untersucht. Für die Einordnung der untersuchten Gebäudeenergiekonzepte hinsichtlich erreichbarer Gebäudeenergiestandards gelten die jeweiligen Bilanzgrenzen und Anforderungen der Energiestandards:

- **EnEV 2016** (EnEV 2014 mit Verschärfung ab 01.01.2016): Gebäudeenergiebedarf nach EnEV ohne Nutzerstrombedarf. Der Jahres-Primärenergiebedarf und der Transmissionswärmetransferkoeffizient H_T' des Referenzgebäudes werden eingehalten.

- **Passivhaus Neubau** nach Passivhausinstitut: Gebäudeenergiebedarf nach EnEV zzgl. Nutzerstrombedarf. Heizwärmebedarf $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, Primärenergiebedarf nicht erneuerbar PE $\leq 95 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
- **Passivhaus Bestand** nach Bauteilverfahren EnerPhit, Passivhausinstitut
- **Nullenergie**: Gebäudeenergiebedarf nach EnEV ohne Nutzerstrombedarf, Jahres-Primärenergiebedarf ≤ 0
- **Plusenergie**: EffizienzhausPlus, Gebäudeenergiebedarf nach EnEV zzgl. Nutzerstrombedarf, Jahres- End- und Primärenergiebedarf < 0

Kosten, Gesamtenergiebilanz und ökobilanzielle Modellierung von Gebäuden

Die Lebenszykluskostenbetrachtung erfolgt auf Basis einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätenmethode in Anlehnung an VDI 2067 mit einem Zeitraum von 30 Jahren. Es liegt ein Kalkulationszinssatz von 3,5 % zugrunde. Die Gesamtkostenberechnung umfasst:

- Kapitalgebundene Kosten: Investitionskosten Bauteile und Anlagentechnik (Lebensdauer nach BNB (vgl. BNB 2017), VDI 2067 (vgl. VDI 2067 2012) und entsprechenden Ersatzinvestitionen bzw. Restwerte für Bauteile und Anlagentechnik)
- Betriebsgebundene Kosten (Instandsetzung, Wartung und Betrieb)
- Verbrauchsgebundene Kosten (Energiekosten der gesamten Gebäudeenergiebedarfe nach EnEV inkl. Nutzerstrom nach Abzug Eigenstromnutzung, EEG-Umlage)
- Fördermittel: Überschüssiger Photovoltaikstrom wird eingespeist und für die ersten 20 Jahre gemäß Erneuerbare-Energien-Gesetz (vgl. EEG 2017) vergütet und die letzten 10 Jahre nach Marktpreis EEX (vgl. Jahresmarktwert Solar 2015). Überschüssiger BHKW-Strom wird nach Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (vgl. KWK-Gesetz 2012) vergütet.

Die Kostenrechnung erfolgt auf der Preisbasis 2015, alle Kosten- und Preisangaben sind also als reale Kosten/Preise zur Preisbasis 2015 zu verstehen. Die Kosten werden inklusive Mehrwertsteuer angegeben. Die ermittelten Investitionskosten basieren auf Kennwerten der sirAdos-Datenbank (vgl. sirAdos 2015), realisierten Projekten der EGS-plan GmbH und Kostenkennwerten für die energetische Modernisierung von Altbauten nach IWU (vgl. Hinz 2015).

Die Bilanzierung der Energiebedarfe nach EnEV erfolgte nach DIN V 18599 mit dem Programm Solar Computer im Modul B55 (vgl. Solar Computer). Die Abschätzung des Nutzerstrombedarfs erfolgte unter der Annahme einer Ausstattung mit hocheffizienten Geräten und einem jährlichen Strombedarf von 2.450 kWh im Einfamilienhausbereich und 1.850 kWh für eine Wohneinheit im Mehrfamilienhaus. Der Anteil KWK (BHKW und Brennstoffzelle) sowie der Eigenverbrauch durch die stromerzeugenden Anlagen (KWK, Photovoltaik) wurden durch Energiebilanzen auf Basis stündlicher Last- und Erzeugungsprofilen berechnet.

Tabelle 2: Betrachtete Systemgrenzen Neubau und Sanierung hinsichtlich Jahresgesamtkosten und Ökobilanz

	Neubau		Sanierung	
	Kosten	Ökobilanz	Kosten	Ökobilanz
Betrachtete Materialien (KG300)				
310 Baugrube	K.	nicht enthalten	nicht enthalten	nicht enthalten
320 Gründung	K., I., W. u B. ²	enthalten	I., W. u. B. (Gesamtbauteil)	nicht enthalten
330 Außenwände	K., I., W. u B.	enthalten	K. (Dämmung), I., W. u. B. (Gesamtbauteil)	enthalten (Dämmung)
340 Innenwände	K., I., W. u B.	enthalten	I., W. u. B.	nicht enthalten
350 Decken	K., I., W. u B.	enthalten	K. (Dämmung Kellerdecke), I., W. u. B. (Gesamtbauteil)	enthalten (Dämmung)
360 Dächer	K., I., W. u B.	enthalten	K. (Dämmung), I., W. u. B. (Gesamtbauteil)	enthalten (Dämmung)
390 Sonstige Baukonstruktionen	K. (Gerüste)	nicht enthalten	K. (Gerüste, Demontage)	nicht enthalten
Betrachtete Anlagentechnik (KG400)				
410 Abwasser-, Wasseranlagen	K., I., W. u B.	enthalten	nicht enthalten	nicht enthalten
420 Wärmeversorgungsanlagen	K., I., W. u B.	enthalten	K., I., W. u B.	enthalten
430 Lüftungsanlagen	K., I., W. u B.	enthalten	K., I., W. u B.	enthalten
440 Starkstromanlagen (PV)	K., I., W. u B.	enthalten	K., I., W. u B.	enthalten
460 Förderanlagen (Aufzug)	K., I., W. u B. (MFH)	enthalten (MFH)	nicht enthalten	nicht enthalten
490 Sonstige Maßnahmen	K., I., W. u B. (Platzbedarf Holzpellet-Silo)	enthalten (Platzbedarf Holzpellet-Silo)	K. (Demontage)	nicht enthalten (kein zusätzl. Platzbedarf)
Betrachtete Energiebedarfe (Nutzungsphase)				
Energiebedarf nach EnEV (Heizung, Warmwasser, Hilfsenergie, Lüftung)	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
Nutzerstrombedarf	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten

Bei der Systemgrenze der Sanierung wurden den Festlegungen nach MBV10 (vgl. DGNB 2010) gefolgt. Demnach wird in der Bestandsbewertung die in der Vergangenheit liegende Herstellungsphase des Gebäudes sowie das unmittelbar von den im Rahmen der Gebäudeerrichtung eingesetzten Baustoffe abhängende „End of Life“ des Gebäudes nicht berücksichtigt um eine durchgängige konsistente Bewertung ohne Doppelzählung sicherzustellen.

² K., I., W. u B. Abkürzung für Kapitalkosten in der Herstellung, Instandsetzung, Wartung und Betrieb

Als konservative Abschätzung für das Lebensende von mineralischen Baustoffen wurde gemäß den Festlegungen der BNB für Beton das EoL-Szenario Deponierung von Bauschutt (Ökobau.dat „Bauschutt-Deponierung“) gewählt. Um zusätzlich das Potenzial einer stofflichen Verwertung darzustellen, wurde nachfolgend auch das EoL-Szenario Bauschuttaufbereitung (Ökobau.dat „Bauschuttaufbereitung“) als Potenzial bei der Massivbauweise untersucht (siehe Vergleich in Abbildung 18). Hierbei wurden die Aufwendung einer Bauschuttaufbereitung in Modul C3 angesetzt (hier: $2,73E-03 \text{ kgCO}_2\text{-Ä./kg Bauschutt}$) und eine Gutschrift in Modul D als in Höhe der vermiedenen Primärproduktion von Kies und Schotter (hier Gutschrift Modul D in Höhe von $9,69 \text{ kgCO}_2\text{-Ä./kg Bauschutt}$) (vergl. EPD Beton 2013).

Würden die Aufwände für End-of-Life (Modul C+D) von Bestandsgebäuden hinsichtlich zukünftiger CO_2 -Zielwerte berücksichtigt, erhöhen sich die CO_2 -Emissionen im Mehrfamilienhausbereich je nach Typgebäude und Bauweise für das EoL-Szenario Deponierung um ca. 1,0 bis 1,2 $\text{kgCO}_2\text{-Ä.}/(\text{m}^2_{\text{WFl}}\cdot\text{a})$ bzw. um ca. 0,7 bis 0,9 $\text{kgCO}_2\text{-Ä.}/(\text{m}^2_{\text{WFl}}\cdot\text{a})$ für das EoL-Szenario mit stofflicher Gutschrift für Bauschutt.

1.1.3 Allgemeine Beurteilung des ökobilanziellen Modells

Methodik und Normkonformität

Die Methode der Ökobilanz ist eine anerkannte Methode zur Quantifizierung der Umweltwirkungen von Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen. Durch die Standardisierung der Methode nach ISO 14040 und 14044 sind der einheitliche Ansatz und die notwendige Transparenz zur Bewertung der verursachten Umweltwirkungen gewährleistet. Basierend auf dem Lebenszyklusgedanken werden mit dieser Methode alle entstehenden Umweltwirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus von der Rohstoffbereitstellung über die Herstellung und Nutzung bis zur Verwertung am Lebensende berücksichtigt.

Eine Ökobilanz erfolgt in vier übergeordneten Schritten: Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung (Wirkungsanalyse/ -bilanz) und Interpretation der Ergebnisse. Entsprechend der definierten Rahmenbedingungen und der funktionellen Einheit der Studie (z.B. die Herstellung eines Bauteils oder der Transport von Handelsgütern) werden in der Sachbilanz alle ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme und entstehenden Emissionen der gesamten Prozesskette erfasst. In der Wirkungsabschätzung werden anschließend alle im Lebenszyklus entstehenden Emissionen den betrachteten Umwelteffekten zugeordnet (Klassifizierung) und anhand ihrer Beiträge in den entsprechenden Wirkungskategorien, wie z.B. dem Treibhauspotenzial, dargestellt (Charakterisierung), siehe Abbildung 7.

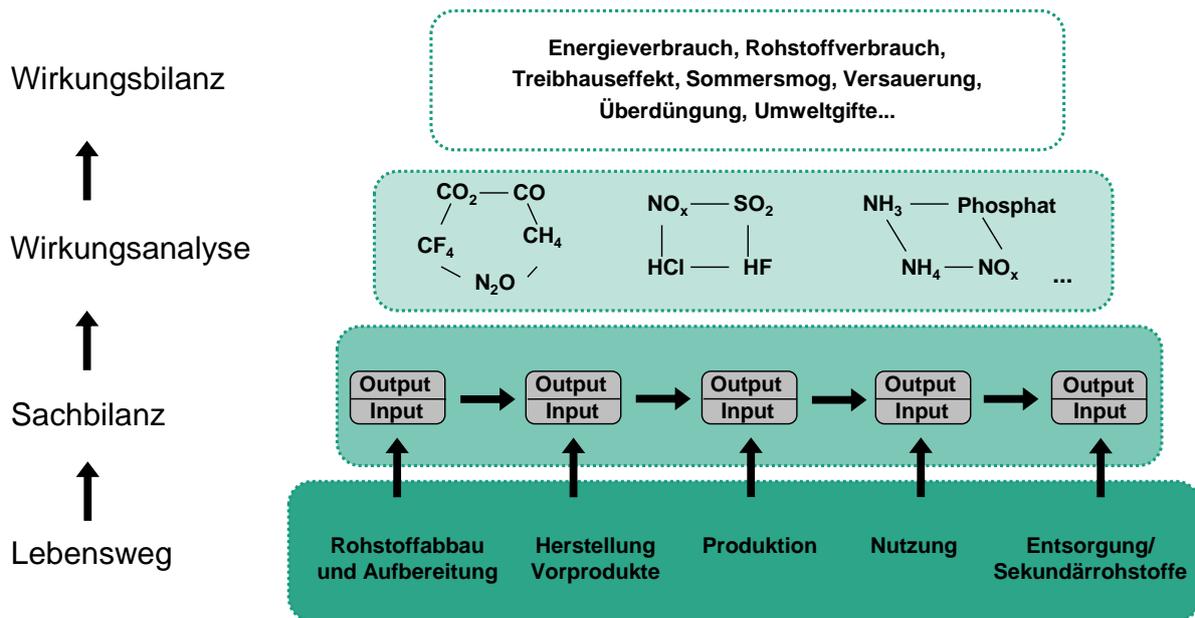


Abbildung 7: Lebenszyklusanalyse in der Ökobilanz, Quelle: Fraunhofer IBP in Anlehnung nach ISO14040

Mit Hilfe der Ökobilanzergebnisse lassen sich die potentiellen Umweltwirkungen des betrachteten Systems darstellen, mögliche Schwachstellen erkennen und Maßnahmen zur ökologischen Optimierung eines Produktes ableiten.

Die Ergebnisse einer Ökobilanz bilden eine belastbare Grundlage zur Bewertung der produktbezogenen Umweltwirkungen. Auf dieser Basis lassen sich:

- signifikante Umweltwirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus identifizieren,
- potentielle Umweltwirkungen zukünftiger Produktenwicklungen entwicklungsbegleitend einschätzen und somit mögliche Schwachstellen und Hot-Spots im Lebenszyklus zukünftiger Produkte ermitteln und vermeiden (Design for Environment),
- Umweltwirkungen von Produkten und Systemen quantitativ vergleichen.

Datenbasis und Datenbanken

Die Definitionen des Ziels und Untersuchungsrahmens wurde entsprechend den Definitionen der DGNB und nach BNB getroffen. Tabelle 3 fasst die wichtigsten Festlegungen zusammen.

Tabelle 3: Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens

Aspekt	Definition
Betrachtete Umweltwirkungen	Treibhauspotenzial (GWP 100) Kumulierter Energiebedarf nicht erneuerbar (KEAnr)
Datenbasis	ÖKOBAUDAT 2015 und zusätzliche IBU EPD Datensätze
Funktionales Äquivalent	gesamtes Gebäude, ohne Außenanlagen
Betrachtete Lebenszyklusphasen	Herstellung (A1 – A3) Instandsetzung (B3) Energiebedarf im Betrieb (B6) EoL (C3, C4)

Aspekt	Definition
	Potenziale für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling (D)
Rechenverfahren	Detailliertes Rechenverfahren (kein Sicherheitsaufschlag)
Betrachtete Materialien (KG300)	310 Baugrube: vernachlässigt 320 Gründung: enthalten 330 Außenwände: enthalten 340 Innenwände: enthalten 350 Decken: enthalten 360 Dächer: enthalten 370 Baukonstruktive Einbauten: vernachlässigt 390 Sonstige Maßnahmen: vernachlässigt
Betrachtete Anlagentechnik (KG400)	410 Abwasser-, Abwasser, Gasanlagen: inkl. TWW Leitung, Abwasser vernachlässigt 420 Wärmeversorgungsanlagen: enthalten, detaillierte Eingabe nach Leistungsklasse, inklusive Wasserleitungen, Dämmung der Wasserleitungen und Speicher (z.B. Pellet Silo) 430 Lüftungsanlagen: enthalten inklusive Lüftungsleitungen 440 Starkstromanlagen: PV Anlage enthalten; weitere elektrische Komponenten vernachlässigt 450 Fernmelde- und informationstechnische Anlagen: vernachlässigt 460 Förderanlagen: Aufzug im MFH Neubau enthalten 490 Sonstige Maßnahmen: Platzbedarf für Pelletsilo im Neubau
Betrachtungszeitrahmen	50 Jahre
Lebensdauern	Nach Leitfaden nachhaltiges Bauen
Energiebedarf	Energiebedarf nach EnEV und Integration des Nutzerstroms [Kap.1.1.2]
PV Strom	Aufgeteilt in Eigennutzung und Einspeisung; Gutschrift in Höhe des gewählten Strommixes gewährt; Effekte durch Netzbelastung bleiben außen vor.

Als Datenbasis wurde die ÖKOBAUDAT 2015 verwendet um einerseits eine möglichst umfangreiche Datenbasis für die Auswahl von Ökobilanzdaten von Baumaterialien und Energieträgern zu haben, andererseits in sich konsistente Ökobilanzdaten zu nutzen. Weiterhin bildet die ÖKOBAUDAT die Datengrundlage für die deutschsprachigen Nachhaltigkeitsbewertungssysteme BNB und DGNB. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Studien und eingereichten Projekten im Gebäudebereich zu ermöglichen wurde diese gängige Datenbasis gewählt. Für fehlende Datensätze – wie PV Anlage für verschiedene Technologien und Brennstoffzelle bzw. Blockheizkraftwerk – wurden Ökobilanzmodelle in der Ökobilanzsoftware GaBi auf Basis von Literaturdaten und Herstellersteckbriefen erstellt. Die GaBi-Datenbank bildet auch die Datengrundlage der ÖKOBAUDAT, wodurch die Konsistenz der Daten gewährleistet wurde. Für Strom und Gasbedarf des Gebäudes in der Nutzungsphase wurde auf Wunsch des Umweltbundesamtes die Emissionsfaktoren nach UBA (vgl. UBA 2017) verwendet, s. hierzu auch Kap. 1.1.4.

Bei der Abbildung der Nutzungsphase wurde abweichend von den Festlegungen nach BNB bzw. DGNB der Nutzerstrombedarf auf Basis der Angaben aus Kapitel 1.1.2 berücksichtigt, um auch Effekte durch Stromproduktion vor Ort, z.B. durch eine PV Anlage oder einem BHKW – und den damit einhergehenden Eigenbedarf bzw. Einspeisung abbilden zu können. Der PV Strom wird in Eigennutzung und Einspeisung aufgeteilt; in beiden Fällen wird eine Gutschrift in Höhe des gewählten Strommixes gewährt; Effekte durch Netzbelastung bleiben außen vor.

Abweichend zu der Festlegung nach BNB wurden Umweltwirkungen des Moduls D in der Darstellung der Ergebnisse berücksichtigt. Die Thematik des Berücksichtigens von Gutschriften jenseits der Systemgrenze unterliegt stark dem wissenschaftlichen Diskurs. Die eine Seite verweist darauf, dass die EoL Szenarien auf Grund des Betrachtungszeitrahmens von 50 Jahren und damit möglichen Änderungen der Recyclingtechnologien starken Unsicherheit unterworfen sind. Vor allem bei der thermischen Verwertung von Holz können hierbei starke Veränderungen auftreten. Damit soll ein Vernachlässigen der Gutschriften (Modul D) eine konservative Abschätzung darstellen. Bei einem Vernachlässigen der Gutschriften kann jedoch das Potenzial, das ein Material oder eine Konstruktion am Lebensende mit sich bringt, nicht abgebildet werden kann. Zwar werden die Aufwendungen des Recyclings in Modul C erfasst, Aspekte wie Trennbarkeit oder Kaskadennutzung werden dort jedoch nicht abgebildet. Für die Verwendung des Moduls D spricht zudem, dass die Datenstruktur und die Datensätze der ÖKOBAUDAT zwingend die Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen erfordert, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. In Modul D wird zudem eine Gutschrift für den durch KWK oder Photovoltaikanlagen überschüssig erzeugten und ins Netz eingespeisten Strom berücksichtigt.

In der Version ÖKOBAUDAT 2015 ist eine Aufteilung in Modul C und Modul D möglich, allerdings keine Aufteilung zwischen stofflicher und energetischer Verwertung in Modul D. In dieser Version der Datenbank ist für die Bauteile- und Komponenten ein vorgegebenes Standard-EoL auf Basis des heutigen Stands der Technik hinterlegt. Für PS-Dämmstoffe und Holz wird beispielsweise eine energetische Verwertung angesetzt und für Beton oder Mineralwolldämmstoffe eine stoffliche Verwertung. Diese den Datensätzen zu Grunde liegenden Modellannahmen sind in den Datensätzen dokumentiert und wirken sich sowohl auf Modul C (Aufwand der Aufbereitung, konkret C3 und C4) als auch auf Modul D aus. In späteren ÖKOBAUDAT Versionen wird zwischen einer thermischen Verwertung und einer stofflichen Verwertung unterschieden. Die gewählte Vorgehensweise ist normkonform. Auf die Ergebnisse hat die Veränderung Ausgabe keinen Einfluss.

Modellbetrachtung vs. Realabbildung

Das Gebäude wurde detailliert ohne Sicherheitsaufschlag eingegeben. Bilanzgrenze ist das Gebäude ohne Außenanlagen. Im Neubau wurden Herstellung, Instandsetzung, EoL Konstruktionen und Materialien der KG 300 und KG 400 gemäß Tabelle 3 sowie Energiebedarf und –erzeugung gemäß Tabelle 2 in Kapitel 1.1.2 abgebildet. In der Sanierung wurde die Instandsetzung der ursprünglichen eingebauten Konstruktionen der KG 300 und KG 400 sowie die Herstellung, Instandsetzung, EoL der neueingebrachten Konstruktionen und Materialien der KG 300 und KG 400 sowie Energiebedarf und –erzeugung abgebildet. Die Eingabe der Komponenten erfolgte detailliert für die vorliegenden Typgebäude. Die Anlagentechnik wurde gemäß ihrer Leistungsklasse abgebildet, Leitungslängen für Wasser und Lüftung wurden überschlägig berechnet. Nicht abgebildet sowohl in Neubau und Sanierung wurden Elektroleitungen, welche unabhängig vom Energieversorgungskonzept in den Gebäuden gleich installiert werden und bei Wohngebäuden in der Ökobilanz einen vernachlässigbaren Einfluss haben³. Das Gebäudemodell wurde detaillierter eingegeben als in bestehenden Nachweissystemen gefordert wird. Der gewählte Ansatz ist somit sehr nahe am realen Gebäude. Die Abweichungen des Modells gegenüber einer Realabbildung sind vernachlässigbar s. Abbildung 8.

³ Ansatz Elektrokabel nach Aktiv Plus e.V. mit 8,5 m Kabel/m²W_{th}. (KG 440 und 450):
Kabel 3-Adrig: 0,4665 kgCO_{2-Ä}/m Kabel entspricht 0,079 kgCO_{2-Ä}/ (m²W_{th}·a), Kabel 5-Adrig: 0,6133 kgCO_{2-Ä}/m Kabel entspricht 0,104 kgCO_{2-Ä}/ (m²W_{th}·a), Quelle: eigene Berechnung mit Datenbasis ÖKOBAUDAT 2015

	Modellbetrachtung	Realabbildung
310 Baugrube	<i>vernachlässigt</i>	✓
320 Gründung	✓	✓
330 Außenwände	✓	✓
KG 300 340 Innenwände	✓	✓
350 Decken	✓	✓
360 Dächer	✓	✓
390 Sonstige Baukonstruktionen	<i>vernachlässigt</i>	<i>Gerüste</i>
410 Abwasser-, Wasseranlagen (Wasserleitungen)	✓	✓
420 Wärmeversorgungsanlagen (Erzeugung, Verteilung, Übergabe)	✓	✓
430 Lüftungsanlagen (Anlage, Verteilungen)	✓	✓
KG 400 440 Starkstromanlagen	✓ <i>PV</i>	<i>zzgl. Elektroleitungen</i>
460 Förderanlagen (Aufzug MFH)	✓	✓
450 Fernmelde- und Informationstechnik	<i>vernachlässigt</i>	✓
480 Gebäudeautomation	<i>vernachlässigt</i>	✓
490 Sonstige Maßnahmen	<i>vernachlässigt</i>	<i>Baustelleneinrichtung</i>
Energie Energiebedarf nach EnEV (Hzg, WWB, Hilfsenergie, Lüftung)	✓	✓
Nutzerstrombedarf	✓	✓

Abbildung 8: Betrachtete Komponenten in Modellbetrachtung vs. Realabbildung

1.1.4 Erläuterung zu Auffälligkeiten bei den Ergebnisgrößen

Bei der schrittweisen Verbesserung eines Gebäudes korrelieren die Verbesserungen in GWP und KEAne tendenziell. Ein Unterschied liegt in der Primärenergiebetrachtung nach EnEV mit den politisch festgelegten Faktoren für die Energieträger nach Tabelle 4 und Abbildung 9. Die Primärenergiefaktoren für Strombezug und die Fernwärme aus fossiler KWK werden nach EnEV besser bewertet, als dies die Ökobilanzberechnungen für Deutschland zeigen. Zudem gibt der Verdrängungsstrommix vor, dass selbst erzeugter und eingespeicherter Strom im Netz fossil erzeugten Strom verdrängt. Diesen Unterschied gibt es in der Ökobilanz nicht, da Bezugsstrom und eingespeicherter Strom gleich bewertet werden. Dies führt dazu, dass Nullenergie-Gebäude mit einem Primärenergiebedarf ≤ 0 mit Primärenergiefaktoren nach EnEV in der ökobilanziellen Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus immer noch einen kumulierten Energiebedarf nicht erneuerbar (KEAne) von 20 bis 100 kWh/(m²_{Wfl.}·a) oder CO₂-Emissionen in Höhe von 10 bis 40 kgCO₂-Ä./(m²_{Wfl.}·a) aufweisen. Die Bewertung nach EnEV bewirkt zwar, dass stromgeführte und stromerzeugende Anlagentechniken (WP, PV, KWK) gegenüber anderen Techniken nachhaltiger eingestuft und damit vermehrt gefördert und umgesetzt werden, sie spiegelt jedoch nicht die realen Emissionen wieder.

Tabelle 4: Faktoren der Wirkungsindikatoren KEAne und GWP im Vergleich zu Primärenergie nach EnEV

	KEAne [MJ/kWh]	GWP [kg CO ₂ -Ä./kWh]	Primärenergie- faktoren nach EnEV [-]
Erdgas	3,958	0,247*	1,1
Fernwärme KWK fossil ⁴ / verbessert ⁵	3,384 / 0,957	0,292 / 0,082	0,7 / 0,35
Pellets	0,412	0,035	0,2
Strombezug	7,183	0,605*	1,8
Verdrängungsstrommix	7,183	0,605*	2,8

Quelle: ÖKOBAUDAT 2015, *UBA 2016 (vgl. UBA 2017), DIN V 18599, Teil 1

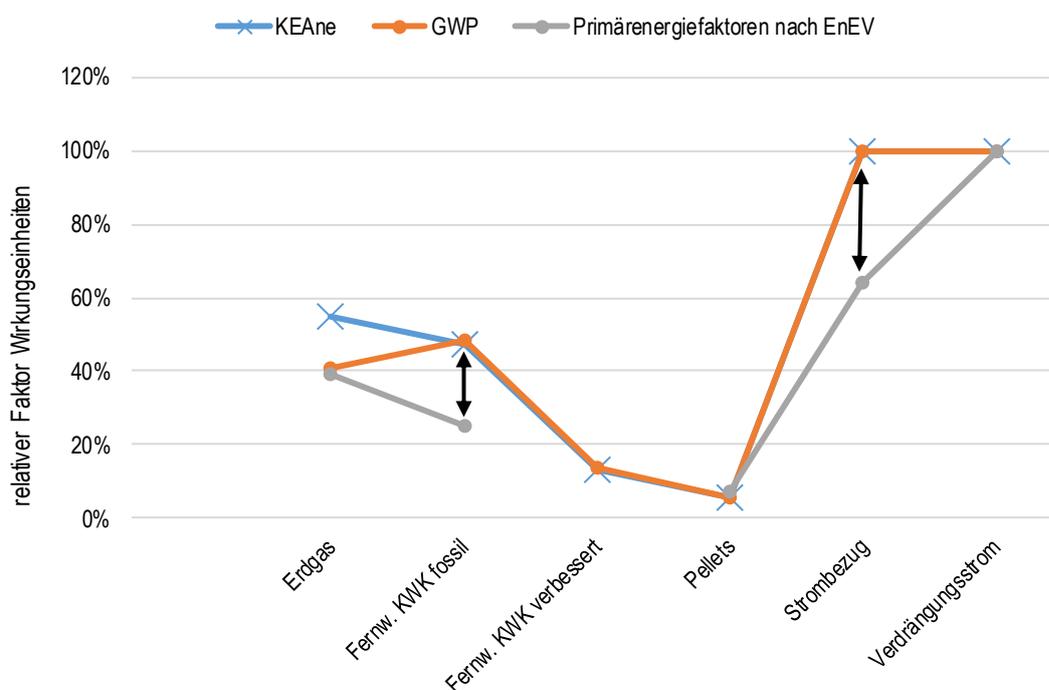


Abbildung 9: rel. Faktoren der Wirkungsindikatoren KEAne, GWP und Primärenergie nach EnEV

Eine weiterführende Analyse der Wirkungsindikatoren wird in Kap. 2.1.2 Bezugsgrößenanalyse durchgeführt.

⁴ ÖKOBAUDAT Datensatz „Nutzung - Fernwärme (20 - 120 kW, entspr. EnEV)“

⁵ Vorgehensweise nach BNB und DGNB: Abschätzung über den ÖKOBAUDAT Datensatz „Nutzung - Fernwärme (20 - 120 kW, entspr. EnEV)“ und Abschätzung des regenerativen Anteils durch den ÖKOBAUDAT Datensatz „Nutzung - Hackschnitzelkessel (< 20 kW, entspr. EnEV)“: entspricht fPE = 0,35 (Durchschnitt Fernwärmeversorgung DE 2015 nach AGFW)

1.2 Darstellung der Hauptaussagen

1.2.1 Betrachtung der Bedeutung des Energieaufwands im Lebenszyklus

In der folgenden Abbildung 10 ist die gesamte Bandbreite des Energieaufwands im Lebenszyklus über 50 Jahre für sämtliche Varianten der Typgebäude Mehrfamilienhaus im Neubau und Bestand dargestellt. Die Ergebnisse für CO₂-Emissionen (GWP 100) und KEAne verlaufen ähnlich.

Je nach gewählter Variantenkombination zur Erreichung der Gebäudeenergiestandards gibt es erhebliche Unterschiede im Energieaufwand. So können die äquivalenten CO₂-Emissionen eines MFH Neubaus im EnEV-2016-Standard ca. 50 bis 15 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) betragen wie im rosa Balken in der Abbildung links dargestellt. Wird das Gebäude statt als Massivbau in Holzbauweise ausgeführt, können weitere 6 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) eingespart werden, wie aus dem hellrosa Balken hervorgeht, so dass im besten Fall unter 10 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) erreicht werden können. Je nach Energiestandard werden unterschiedliche Maßnahmenkombinationen bevorzugt umgesetzt, welche im Folgenden als übliche Bauweise bezeichnet werden und durch einen schwarzen Querbalken gekennzeichnet sind. Grundlage zur Auswahl der „üblichen Varianten“ bilden Daten des statistischen Bundesamtes, der KfW-Bankengruppe und die Passivhaus-Datenbank (vgl. Statistisches Bundesamt 2015, Diefenbach 2016, Passivhaus-Datenbank 2017). Im EnEV-Standard werden beispielsweise meist noch fossile Energieträger eingesetzt, im Nullenergiestandard dominiert im Neubaubereich die Wärmepumpe und im Bestand Holzpellets mit einem niedrigeren Energiebedarf. Innerhalb der Energiestandards ist eine große Spreizung an GWP/ KEAne möglich und der Energieaufwand für ein Nullenergie-Gebäude kann gleich hoch sein wie für ein Gebäude das nur EnEV-2016-Standard erfüllt, jedoch einen Energieträger mit sehr niedrigen CO₂-Emissionen verwendet. Die Vorgabe eines Gebäudeenergiestands vor allem auf Null- und Plusenergieniveau kann zu einer Reduzierung des Energieaufwands führen, ist jedoch aufgrund der großen Spreizung innerhalb der Gebäudestandards kein Garant für eine Einsparung an CO₂-Emissionen oder KEAne.

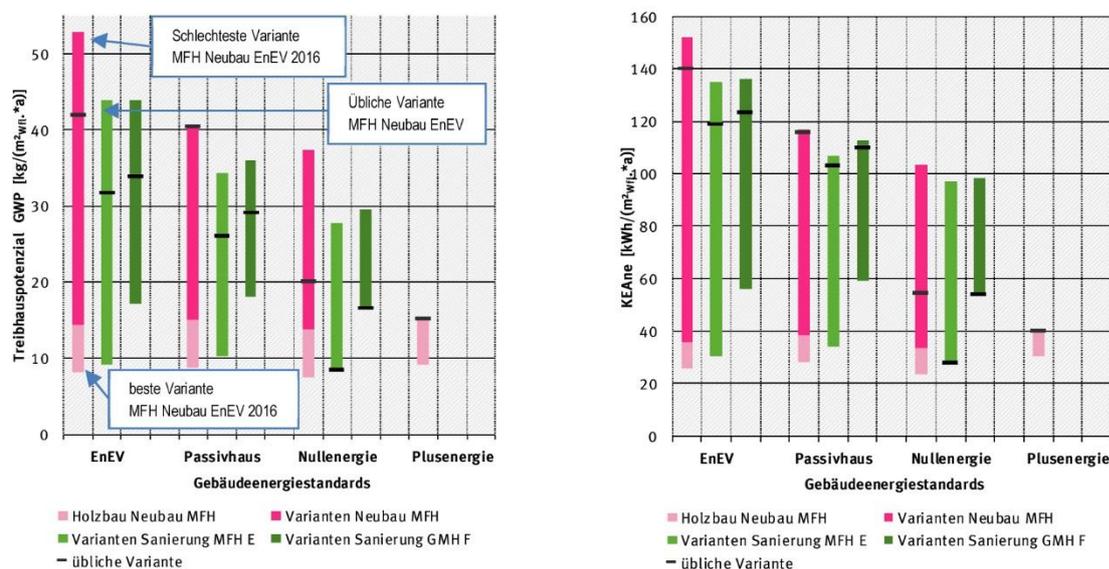


Abbildung 10: Neubau und Sanierung Mehrfamiliengebäude, GWP (links) & KEAne (rechts)

Die CO₂-Emissionen bei üblichen Varianten liegen für den sanierten Bestand im Schnitt um 20 – 30 % unter dem Neubau aufgrund des Bestandserhalts der Baukonstruktion. Im Mehrfamilienhausbereich sind 10 bis 15 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) bzw. 25 bis 40 kWh/(m²_{WFl}·a) für Neubau und Bestandssanierung erreichbar. Die Kostenunterschiede

aller Gebäudekonzepte im Neubau liegen bei +/- 15 €/m²_{WFl}·a). Mehrkosten können durch die Ausführung im Plusenergie- oder Passivhaus-Standard oder in Holzbauweise entstehen. Die höheren Kosten für ein Passivhaus sind stark abhängig von der Bauweise und die Holzbaukosten stellen sich regional sehr unterschiedlich dar. Im Vergleich zum energetisch sanierten Bestandsgebäude sind die Kosten für Neubauvorhaben jedoch fast dreimal so hoch.

In Abbildung 11 sind die Ergebnisse der Einfamilienhäuser im Neubau und Bestand dargestellt. Im Neubaubereich führt die Vorgabe eines Gebäudeenergiestandards am eher zu Einsparungen an CO₂-Emissionen wie im Bestand, ist jedoch ebenfalls kein Garant dafür. Durch ein Plusenergiegebäude sind im Vergleich zum einem üblichen Nullenergiegebäude keine weiteren Einsparungen erreichbar.

Im Unterschied zum Mehrfamilienhaus kann im Einfamilienhausneubau ein geringerer Energieaufwand als im Bestand bis hin zu einem fast klimaneutralen Gebäude erreicht werden. Die Kosten für einen Neubau gegenüber einer Sanierung nähern sich an. Die Sanierung von Einfamilienhäusern erreicht jedoch nicht immer das energetische Niveau wie im Neubau.

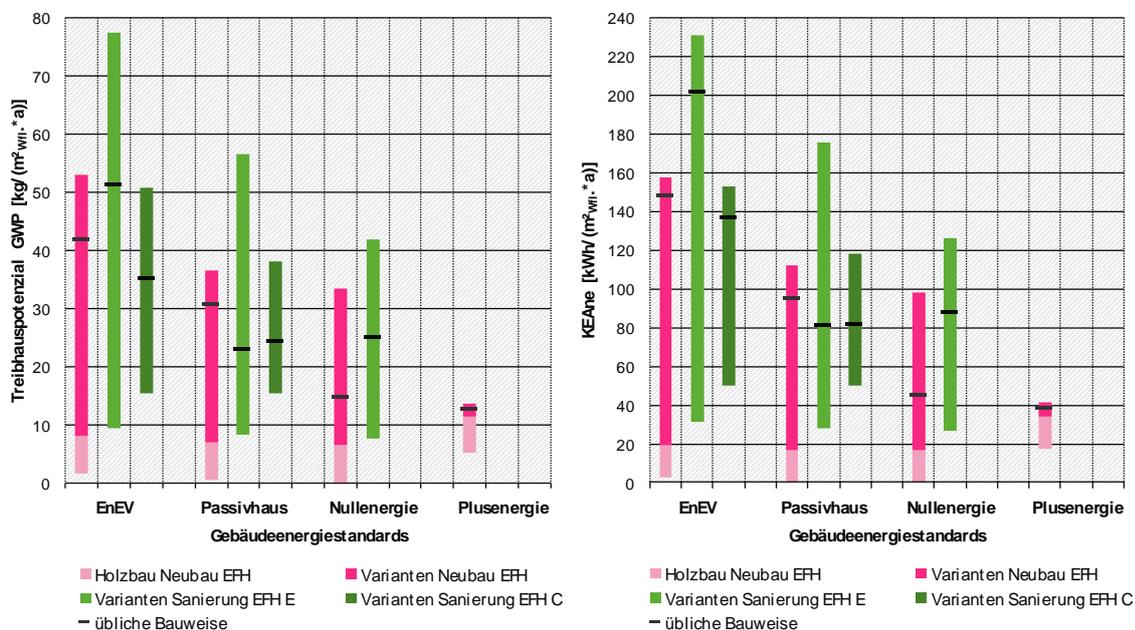


Abbildung 11: Neubau und Sanierung Einfamilienhaus, GWP (links) & KEAne (rechts)

1.2.2 Verhältnis von Konstruktion zu Energieaufwand im Betrieb

Am Beispiel des Mehrfamilienhaus Neubau und den üblichen Ausführungen je Energiestandard⁶ werden in der Abbildung 12 die Anteile der CO₂-Emissionen im Lebenszyklus dargestellt. Auf der linken Balkenseite sind jeweils die CO₂-Emissionen für Konstruktion (Modul A - D), Gebäudebetrieb (B) und Nutzerstrom (B*), rechts die Emissionsreduzierungen durch Stromeigennutzung (B) und -gutschriften (D) bzw. die verbleibenden Netto-

⁶ Übliche Ausführung der Neubaugebäude je nach Gebäudeenergiestandard in Massivbauweise mit folgenden Spezifikationen:
 EnEV 2016 Standard: Gas + Solarthermie, KfW 55 (HT'), Abluftanlage, ohne PV;
 Passivhaus-Standard: Fernwärme, KfW 40 (HT'), Lüftung mit WRG, ohne PV;
 Nullenergie-Standard: Wärmepumpe, KfW 55 (HT'), Abluftanlage, PV Dach;
 Plusenergie-Standard: Wärmepumpe, KfW 40 (HT'), Lüftung mit WRG, PV Dach und Fassade

Emissionen dargestellt. Auf die Gebäudekonstruktion mit Herstellung, Instandsetzung und EoL (graue Säule) entfallen insgesamt 12 – 16 kgCO₂-Ä./(m²Wfl.·a). Der Anteil der CO₂-Emissionen für die Konstruktion in Bezug auf die Gesamtemissionen ohne Gutschriften (linke Säule) beträgt für Gebäude im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard rund 30 %. Durch den Einsatz von PV-Anlagen steigt der Konstruktionsanteil bei üblichen Null- und Plusenergiegebäuden auf rund 35 – 40 %. Beim Plusenergiegebäude führt die konsequente lokale Stromerzeugung zur Kompensation der nutzungsbedingten CO₂-Emissionen, so dass bilanziell lediglich Emissionen im Umfang der Konstruktion verbleiben.

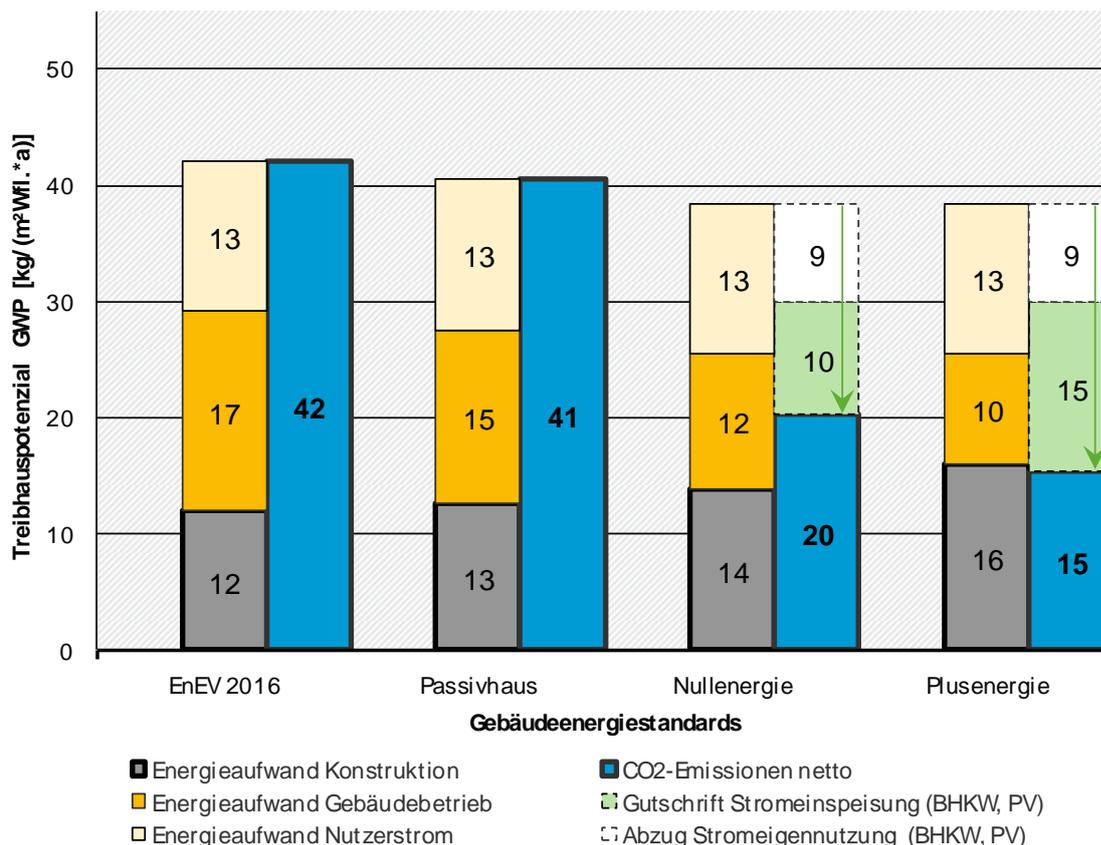


Abbildung 12: CO₂-Bilanz der Energiekonzepte übliche Bauweise Neubau Mehrfamilienhaus

Etwa 20 – 35 % der CO₂-Emissionen für den Anteil Konstruktion ist auf die KG 400 zurückzuführen, s. Abbildung 13.

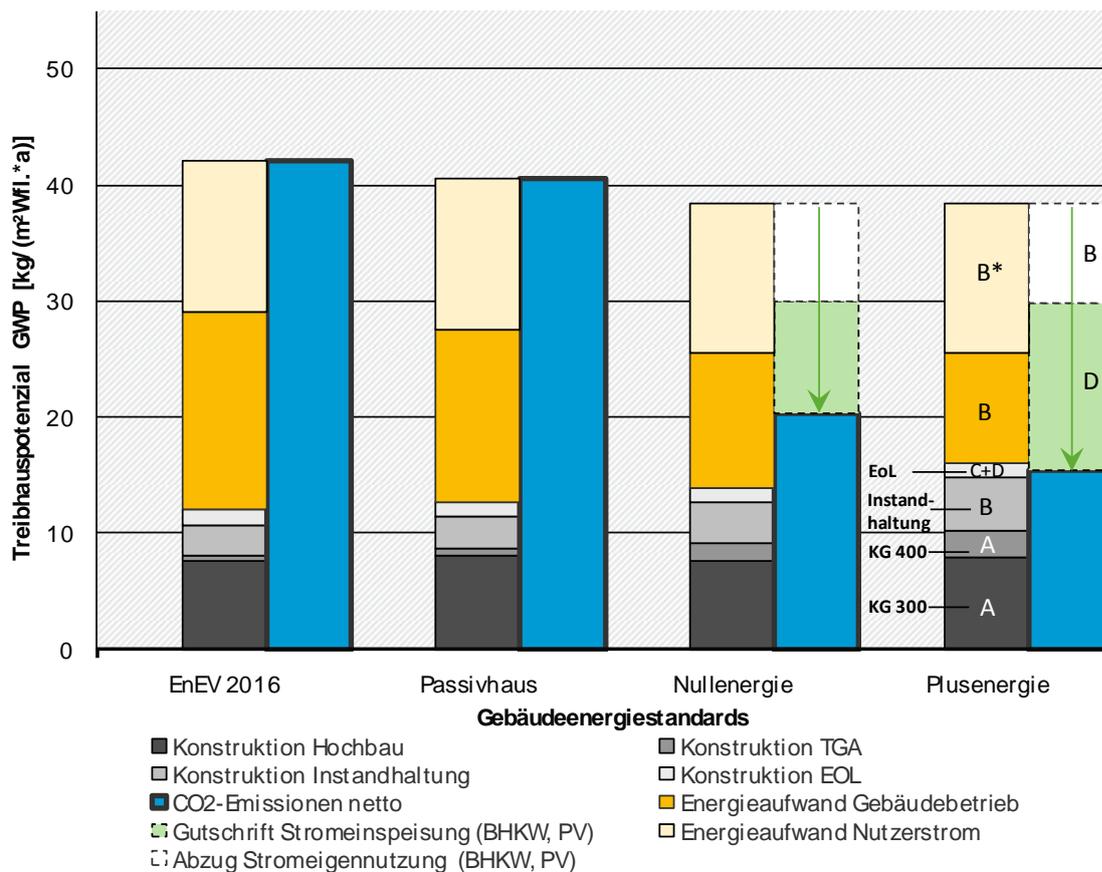


Abbildung 13: CO₂-Bilanz im Detail der Energiekonzepte übliche Bauweise Neubau Mehrfamilienhaus

Die CO₂-Emissionen für die Konstruktion sind im Einfamilienhaus mit 10 – 14 kgCO₂-Ä./((m²Wfl.·a) je nach Gebäudeenergiestandard etwas geringer. Beim EnEV-2016-Gebäude entfallen rund 25 % der CO₂-Emissionen auf die Konstruktion. Bei den Gebäuden im Passivhaus-, Null- und Plusenergiestandard beträgt der Konstruktionsanteil bedingt durch einen höheren technischen Aufwand rund 35 – 40 % der Emissionen. Beim Plusenergiegebäude führt auch im Einfamilienhaus die konsequente lokale Stromerzeugung zur Kompensation der nutzungsbedingten CO₂-Emissionen, so dass bilanziell lediglich Emissionen im Umfang der Konstruktion verbleiben.

Bei einer Sanierung im Mehrfamilienhausbereich entfallen bei allem Gebäudeenergiestandards⁷ insgesamt nur 3 – 5 kgCO₂-Ä./((m²Wfl.·a) auf die Gebäudekonstruktion, siehe Abbildung 14. Im Gegensatz zum Neubau ist die Bestandskonstruktion vorhanden und es fallen nur CO₂-Emissionen für neue Fenster, eine nachträgliche Dämmung und eine neue Anlagentechnik an. Bei sanierten Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard entfallen weniger als 10 % der CO₂-Emissionen auf die Konstruktion. Bei einem üblichen sanierten Nullenergiegebäude steigt der Konstruktionsanteil durch die lokale Stromerzeugung auf über 20 % der CO₂-Emissionen an.

⁷ Übliche Ausführung der Sanierung des MFH E je nach Gebäudeenergiestandard mit folgenden Spezifikationen:

EnEV 2016 Standard: Gas + Solarthermie, KfW 55 (HT'), Abluftanlage, ohne PV;

Passivhaus-Standard: BHKW, KfW 55 (HT'), Lüftung mit WRG, ohne PV;

Nullenergie-Standard: Holzpellets, KfW 55 (HT'), Abluftanlage, PV Dach;

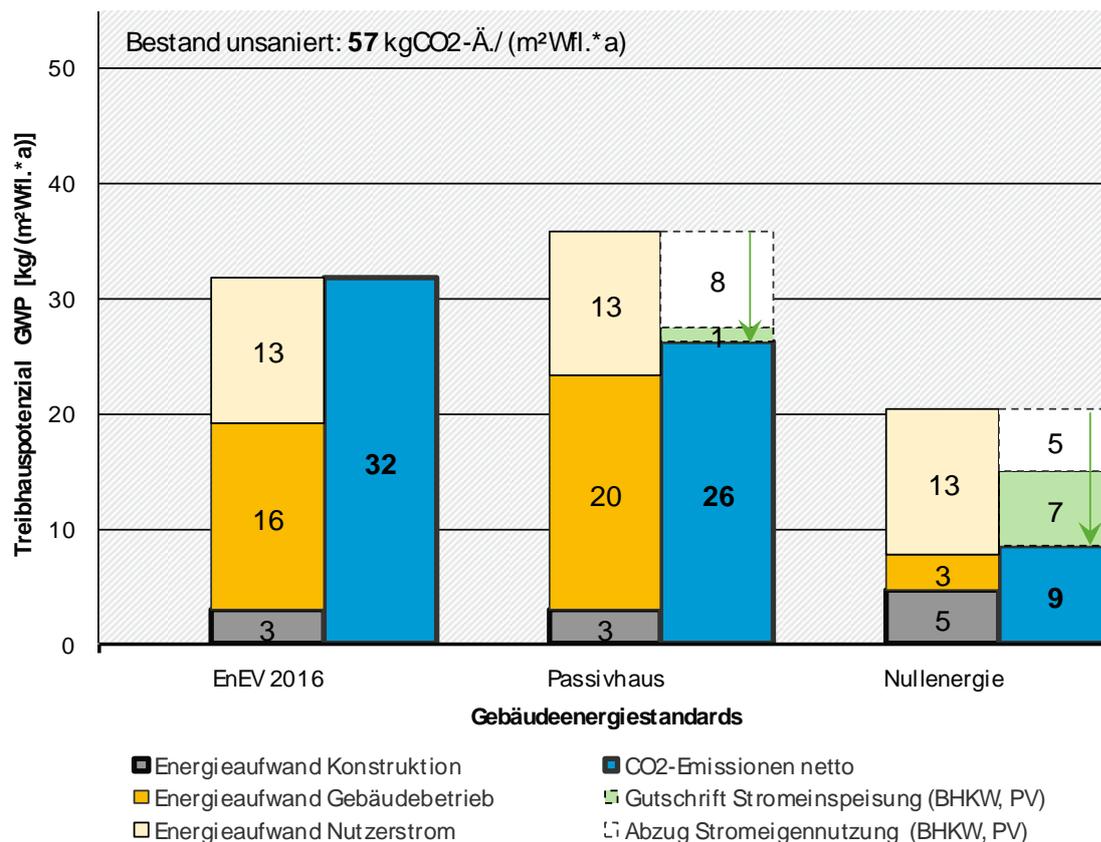


Abbildung 14: CO₂-Bilanz der Energiekonzepte übliche Bauweise Sanierung Mehrfamilienhaus MFH E

Im Vergleich dazu fällt für die Konstruktion der Bestandssanierung im Einfamilienhausbereich höhere CO₂-Emissionen von 3 – 9 kgCO₂-Ä./ (m²Wfl.*a) an.

1.2.3 Einfluss in der Konstruktion

Neubau in Massivbauweise

Etwa 80 % der CO₂-Emissionen in der Herstellungsphase (Modul A) entfällt auf die KG 300 Bauwerk wie aus Abbildung 15 am Beispiel des Plusenergiegebäudes hervorgeht. Materialeitig dominieren mit 46 % der Stahlbeton für die Gebäudekonstruktion gefolgt von Photovoltaikanlagen auf Dach und Fassade mit 17 %. Die Kunststoffenster haben einen Anteil von 10 % und die Dämmung der Gebäudehülle mit EPS-Dämmstoff und Mineralwolle entsprechen noch 6 % der CO₂-Emissionen. Die abgebildete Anlagentechnik ohne Photovoltaik bestehend aus Wärmepumpe mit Wärmequelle und Pufferspeicher, Wasserleitungen, Fußbodenheizung und zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung hat einen geringen Anteil von rund 6 %. Nicht abgebildet wurde anlagenseitig die Elektroverteilung, da diese bei allen Varianten gleich ist und erfahrungsgemäß einen vernachlässigbaren Anteil am Energieaufwand der Herstellungsphase hat.

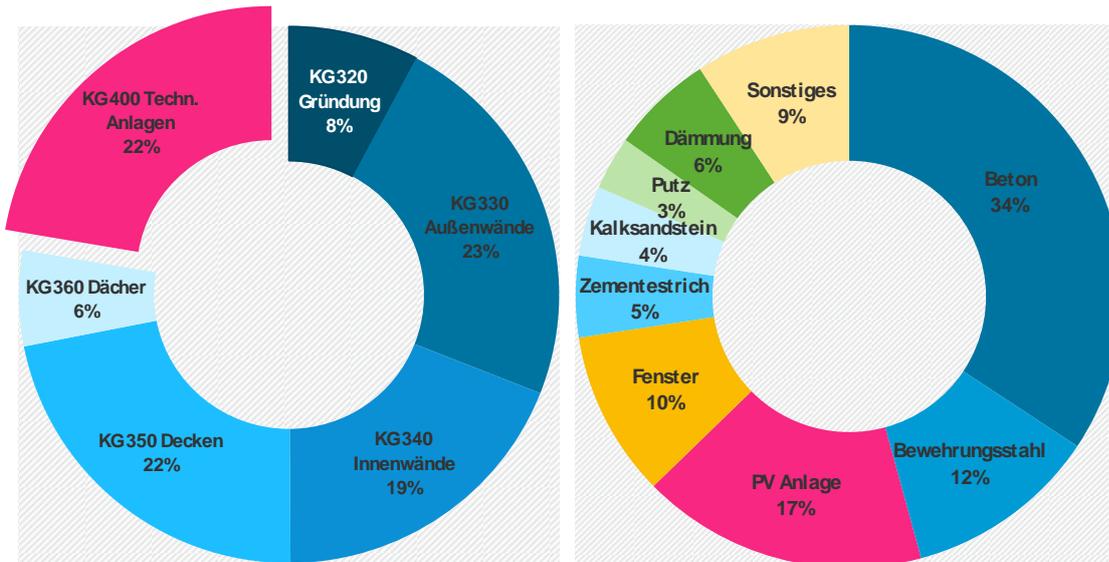


Abbildung 15: Anteile GWP an Herstellung (A1-A3) am Beispiel Neubau MFH im Plusenergie-Standard

Außenwandkonstruktionen und Dämmstoffe

Aufgrund des vergleichbar geringeren Materialeinsatzes schneidet eine Stahlbetonbauweise im Neubau gegenüber anderen Massivbauweisen mit ca. $95 \text{ kgCO}_2\text{-Ä./m}^2_{\text{AW}}$ für einen Wandaufbau gemäß KfW Effizienzhaus 55 relativ gut ab. Das mit Abstand höchste Energieeinsparpotenzial liegt jedoch in einer Holzkonstruktion mit nachwachsendem Dämmstoff mit einer Gutschrift von bis zu $20 \text{ kgCO}_2\text{-Ä./m}^2_{\text{AW}}$. In der Abbildung 16 sind die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus für verschiedene Außenwandkonstruktionen gemäß EnEV-2016 und KfW Effizienzhaus 55 (zzgl. heller Balken) dargestellt.

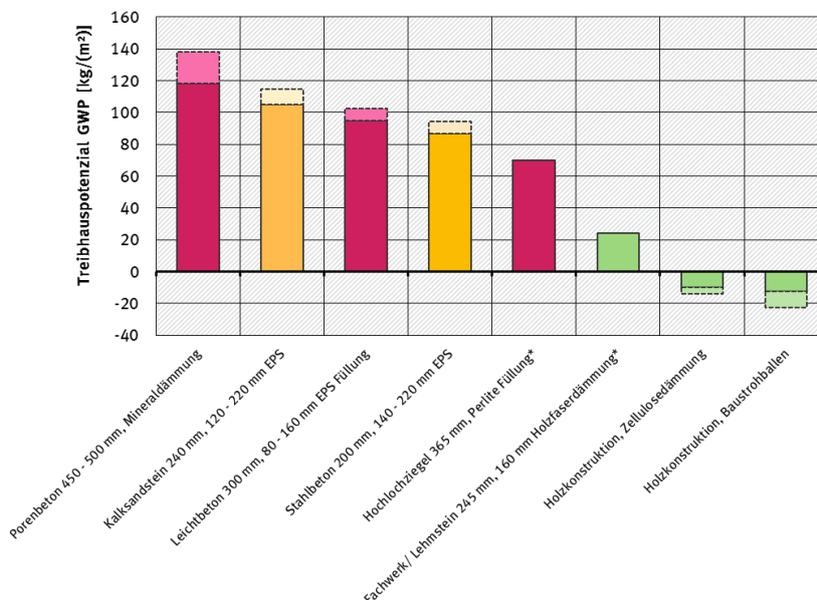


Abbildung 16: GWP von Außenwandkonstruktionen (*nur EnEV 2016)

Auch die in den Typgebäuden verwendeten Dämmstoffe EPS, Mineralwolle und PUR liegen im guten Mittelfeld. Lediglich die nachwachsenden Dämmstoffe Zellulose und Stroh schneiden mit großem Abstand besser ab. Die

Perimeter-Dämmstoffe Schaumglas und XPS-Dämmstoffe aber auch Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) schneiden in Bezug auf den Energieeinsatz pro Dämmeigenschaft schlechter ab.

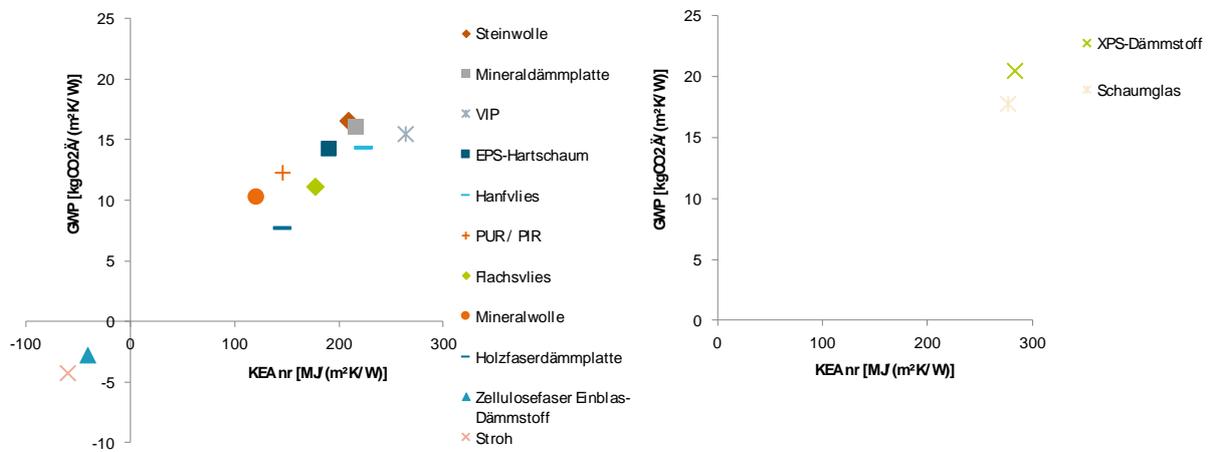


Abbildung 17: Ökobilanz Ranking Wärmedämmmaterialien links, Perimeter-Dämmmaterialien rechts

Einsparpotenzial durch Substitution treibender Baumaterialien

Durch eine beispielhafte Ausführung des Gebäudes in Holzleichtbauweise mit Zellulosedämmung und Holzfenster lassen sich bis zu $6 \text{ kgCO}_2\text{-Ä.}/(\text{m}^2_{\text{Wfl}}\cdot\text{a})$ im gesamten Lebenszyklus einsparen. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse für das Plusenergiegebäude in Massivbauweise mit den unterschiedlichen EoL Szenarien für Beton mit Deponierung (Landfill) und Recycling (Bauschutttaufbereitung) einer Ausführung in Holzbauweise gegenübergestellt. Die EoL-Gutschriften für die Konstruktion durch das Modul D bewegen sich bei den Massivbauvarianten zwischen $2,10$ und $2,50 \text{ kgCO}_2\text{-Ä.}/(\text{m}^2_{\text{Wfl}}\cdot\text{a})$ bis hin zu $3,35 \text{ kgCO}_2\text{-Ä.}/(\text{m}^2_{\text{Wfl}}\cdot\text{a})$ für die Variante in Holzbauweise s. rechte Balkenseite (dunkelgrün).

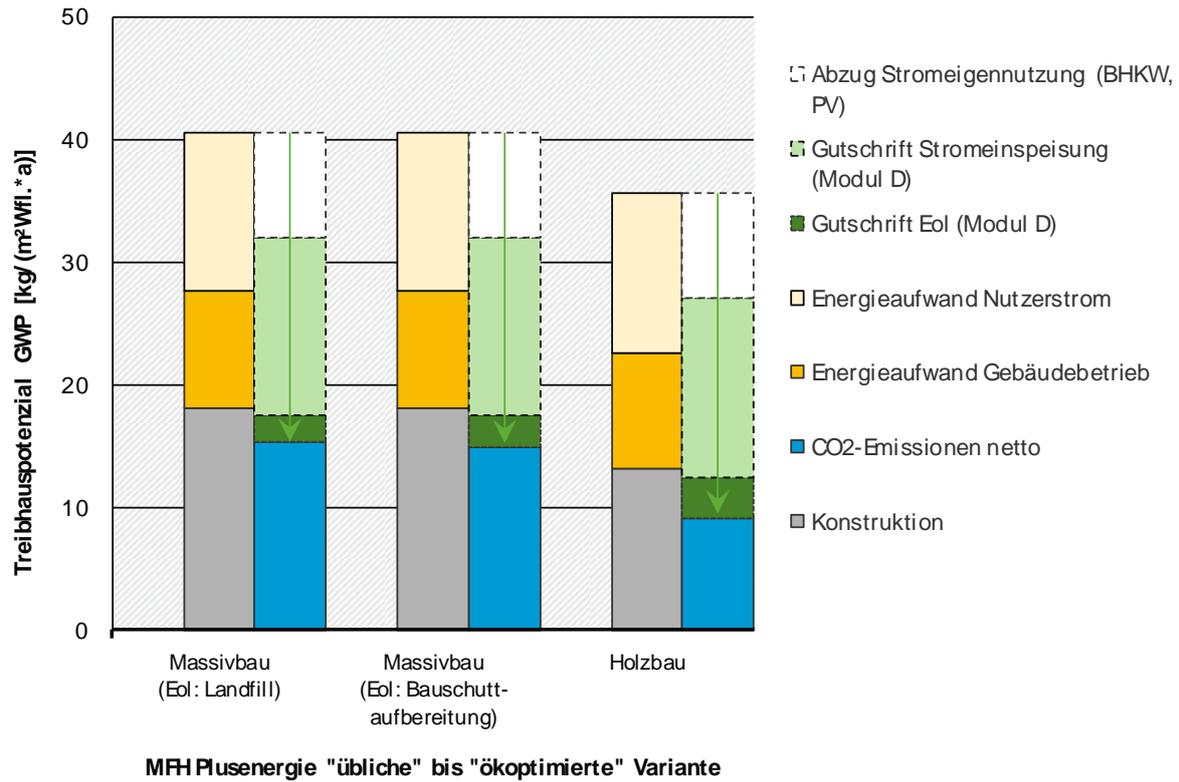


Abbildung 18: Neubau MFH Plusenergie: Massivbauweise vs. Holzbauweise mit EoL-Szenarien

1.2.4 Einfluss in der Nutzungsphase

Die größten Unterschiede im Energieaufwand der Varianten sind auf die Nutzungsphase zurückzuführen. In Abbildung 19 sind die einzelnen Varianten und die damit verbundenen CO₂-Emissionen (GWP 100) und Jahresgesamtkosten am Beispiel des MFH Neubau dargestellt. Die Symbole stellen die Ausführung der Gebäudehülle (weiß = Dämmung gemäß EnEV-2016-Standard, grün = Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55, rot = Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40), Photovoltaikanlage (Schraffur = mit PV) und die Lüftungsart (Quadrat = Abluftanlage, Kreis = Lüftung mit WRG) dar, durch die farbigen Linien wird die Art der Wärmeversorgung gekennzeichnet.

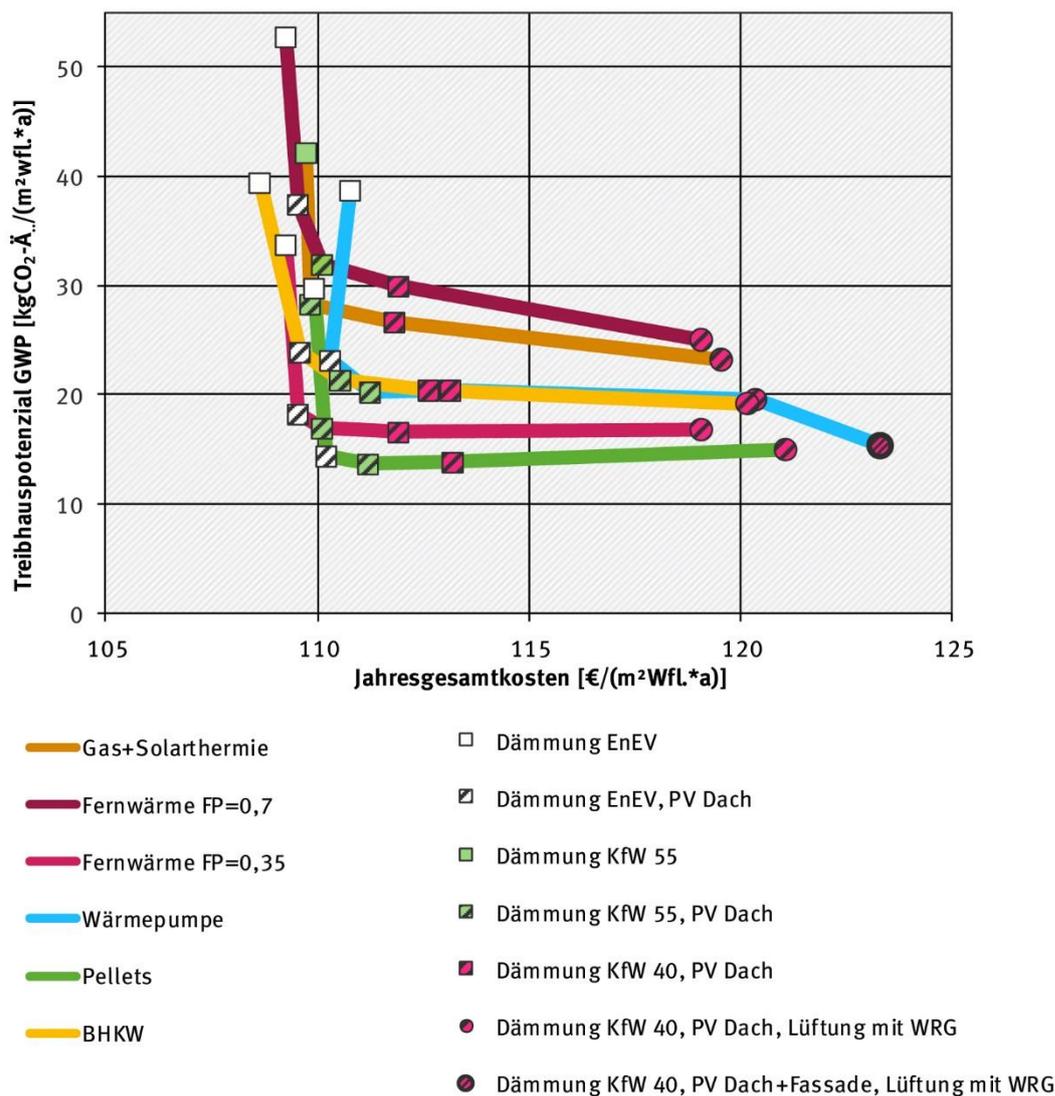


Abbildung 19: GWP und Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau MFH (Massivbauweise)

Die Art der Wärmeversorgung hat den größten Einfluss auf den gesamten Energieaufwand. So lassen sich am Beispiel Neubau MFH durch eine regenerative Wärmeversorgung mit Holzpellets im Vergleich zu einer fossilen Versorgung durch Fernwärme fast 45 % der CO₂-Emissionen einsparen (> 20 kgCO₂-Ä./(m²Wfl.*a)). Eine Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach kann die CO₂-Emissionen um weitere 30 - 60 % senken (15 kgCO₂-Ä./(m²Wfl.*a)). Eine Verbesserung der Gebäudehülle gemäß KfW Effizienzhaus 55 wirkt sich je nach Energieträger mit einer weiteren Reduktion zwischen 5 - 15 % (1 - 5 kgCO₂-Ä./(m²Wfl.*a)) aus. Eine zusätzliche Verschärfung der Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 oder die Integration einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung wirken sich aus energetischer Sicht nur bei fossil dominierter Versorgung positiv aus. Bei einer regenerativen Energieversorgung führen sowohl eine Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 als auch die Lüftungsanlage mit WRG sogar zu höheren CO₂-Emissionen.

1.2.5 Lenkungswirkung durch Einbeziehung "graue Energie"

Ableitung signifikanter Verhältnisfaktoren

Geht man davon aus, dass neue Gebäude künftig nahe Nullenergiestandard oder sogar im Plusenergiestandard errichtet werden, ergibt sich eine Bandbreite für den gesamten Energieaufwand im Lebenszyklus von ca. 10 – 35 kgCO₂-Ä./((m²_{WFl}·a) je nach Gebäudetyp und gewählter Variantenkombination. Auf die Gebäudekonstruktion mit Herstellung, Instandsetzung und EoL entfallen davon 14 – 16 kgCO₂-Ä./((m²_{WFl}·a). Der Anteil an "grauer Energie" am Energiebedarf im Lebenszyklus dieser Gebäude beläuft sich demnach auf 35 – 40 % des Energieaufwands im gesamten Lebenszyklus. Durch beispielsweise eine alternative Holzkonstruktionsbauweise lassen sich in etwa 6 kgCO₂-Ä./((m²_{WFl}·a) einsparen.

Bestimmung von Größenordnungen

Im Jahr 2016 wurden 27.137 Tausend m² Wohnfläche errichtet und davon etwa 60 % im Ein- und Zweifamilienhausbereich. 16 % der neu gebauten Wohngebäude wurden bereits in Holzbauweise ausgeführt (vgl. Holzbau Deutschland 2017). Durch eine Ausführung z.B. in Holzbauweise anstatt in Massivbauweise lassen sich pro Mehrfamilienhaus bis zu 540 tCO₂-Ä. und pro Einfamilienhaus bis zu 43 tCO₂-Ä. einsparen. Hochgerechnet auf das jährliche Neubauvolumen in Deutschland könnten ca. 7 Mio. tCO₂-Ä. jährlich eingespart werden. Voraussetzung ist eine vergleichbare Qualität der Leichtbauweise im Wohnungsbau hinsichtlich Wärme- und Schallschutz ohne die Notwendigkeit einer aktiven Kühlung im Sommer. Unter Berücksichtigung von 3 % Investitionsmehrkosten für eine alternative Holzbauweise⁸ und dem Aufwand für die Durchführung einer Ökobilanz (vgl. Tabelle 7) von insgesamt 1,3 Mrd. € resultiert dies in CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von durchschnittlich ca. 180 €/t CO₂.

Beurteilung der Eignung für zukünftige Steuerungsprozesse

Die ganzheitliche Betrachtung der Gebäude inklusive der grauen Energie macht vor allem bei Neubauvorhaben Sinn. Bei Plusenergiegebäuden führt die konsequente lokale Stromerzeugung zur Kompensation der nutzungsbedingten CO₂-Emissionen, so dass bilanziell lediglich Emissionen im Umfang der Konstruktion verbleiben. Je nach Gebäudetyp und Gebäudeenergiestandard können durch Bauweisen mit niedrigem Einsatz an grauer Energie (z.B. Holz- und Leichtbauweisen) die CO₂-Emissionen für die Konstruktion um etwa 40 – 60 % reduziert werden. Nur durch eine ganzheitliche Betrachtung von Gebäudekonstruktion und Betrieb können diese Energieeinsparungen transparent dargestellt und die Umsetzung durch entsprechende Förderprogramme oder gesetzliche Forderungen forciert werden.

⁸ 3 % Investitionsmehrkosten für Holzbauweise gegenüber Massivbauweise bezogen auf KG 300 + 400 (vgl. SirAdos 2015)

1.3 Erste Empfehlungen für umweltpolitische Maßnahmen

Aus den Ergebnissen gehen folgende Themenfelder für künftige umweltpolitische Schwerpunkte hervor:

1. Ressourcenschonendes Bauen im Lebenszyklus

Der Bestandserhalt mit einer energetischen Sanierung von Mehrfamiliengebäuden nimmt eine zentrale Rolle im ressourcenschonenden und kosteneffizienten Bauen ein. Aufgrund des guten Kosten-/Nutzen-Verhältnisses hat eine Sanierung von großen Mehrfamiliengebäuden Priorität vor einem Neubau. Im Neubaubereich müssen alternative Leicht- und Holzbauweisen mit niedrigem Anteil an grauer Energie für die Gebäudekonstruktion verbreitet umgesetzt werden.

- Ganzheitliche Bilanzierung von Gebäuden einführen (inkl. graue Energie)
- Die schnelle Einführung durch Förderprogramme unterstützen

2. Neuausrichtung der Gebäudebewertung an Klimaschutzziele

Im Kontext der Klimaschutzziele ist dringend eine Neuorientierung zur Beurteilung der ganzheitlichen Gebäudeperformance erforderlich. Dazu sind bestehende Gesetze, Verordnungen und die Nachweisverfahren zum nachhaltigen Bauen zu vereinfachen und in Richtung eines holistischen Ansatzes für mehr Klimaschutz zu entwickeln.

- CO₂-Label für Gebäude einführen
- Bilanzgrenzen für Gebäudebewertung erweitern inkl. Graue Energie, Nutzerstrom und Elektromobilität
- Quartiers-Ansätze entwickeln und Kompensationsmaßnahmen ermöglichen
- Individuelle Sanierungsfahrpläne für Gebäude fordern
- Förderung für CO₂-Einsparungen in Planung und Betrieb

3. Dekarbonisierung der „Energie-Infrastruktur“

Der Anteil kohlenstoffarmer und erneuerbarer Energieträger in den Strom-, Gas- und Wärmenetzen muss deutlich erhöht werden. Die dezentrale und zentrale Strombereitstellung aus Sonnen- und Windenergie hat dabei eine Schlüsselrolle.

- Ausbau der Förderung von Eigenstromnutzung durch einfache, rechtssichere Umsetzungsmöglichkeiten
- Abbau von Hürden bei Sektorkopplung
- Flexible Erzeugungs- und Verbraucherinfrastruktur mit variablen Stromtarifen
- Infrastrukturmaßnahmen für ein flexibles Stromsystem (Netzausbau, Speicher, P2G)
- Einführung einer CO₂-Steuer über alle Sektoren

2 Erfordernisse an Beurteilungsniveaus im Hinblick ordnungsrechtlicher Regelungen

2.1 Referenzierung und Benchmarking

2.1.1 Existierende Benchmarks und Bewertungssysteme im Wohnungsbau

Bestehende Bewertungssysteme im Wohnungsbau liefern Angaben zu Ziel- und Grenzwerten für die Wirkungskategorien Treibhauspotenzial (GWP), Primärenergie gesamt (PE_{ges}) und Primärenergie nicht erneuerbar (PE_{ne}). In Tabelle 5 werden die aktuellen Kriterien der Bewertungssysteme „Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh)“ und „Nachhaltiger Kleinwohnhausbau (BNK)“ des BMI (vgl. BMI 2018) sowie das Bewertungssystem nach DGNB (vgl. DGNB Marktversion 2018) untersucht und den Zielwerten der Schweiz für die 2000-Watt- Gesellschaft gemäß „SIA-Effizienzpfad Energie“ (vgl. SIA 2011) gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass große Unterschiede in Bezug auf die Datenbasis⁹, Bezugsgrößen, Bilanzgrenzen, Verfahren und der Bewertung bestehen. Die Zielwerte der SIA für Neubau und Sanierung enthalten neben dem Energiebedarf für den Gebäudebetrieb auch einen Energiebedarf für den Nutzerstrom. Der Gesamtenergiebedarf kann um den Anteil selbst erzeugtem Strom aus erneuerbarer Energien reduziert werden. Im Gegensatz zu den deutschen Bewertungssystemen wird hier der Betrachtungszeitraum auf 60 Jahre angesetzt. Zusätzlich zu den betrachteten Lebenszyklusphasen Herstellung (A), Betriebsphase (B) und EoL (C) berücksichtigen die Bewertungssysteme der DGNB mit dem Modul D „Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze“ eine zusätzliche Phase.

Tabelle 5: Tabellarische Gegenüberstellung der Bewertungssysteme

Bewertungs-system	SIA	Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh)	Nachhaltiger Kleinwohnhausbau (BNK)	DGNB (Marktversion 2018)
Bewertungs-system	Wohngebäude (Neubau und Sanierung)	Mehrfamilienhaus (Neubau)	Ein- bis Fünffamilienhäuser (Neubau)	Mehrfamilienhaus (Neubau)
Funktionales Äquivalent	Gebäude inkl. Außenanlagen, ggf. Mobilität	Gebäude ohne Außenanlagen	Gebäude ohne Außenanlagen	Gebäude ohne Außenanlagen
Bezugsfläche	A_E	NRF ¹⁰	NRF	NGFa
Bilanzumfang	Konstruktion: KG 300 - 500 Energiebedarf: Gebäudeenergiebedarf (vgl. EnEV) und Nutzerstrom ^{11*} abzüglich selbsterzeugter EE Strom	Konstruktion: KG 300, KG 400 Energiebedarf: Endenergiebedarf nach EnEV (Strom und Wärme) ohne Nutzerstrom	Konstruktion: KG 300, KG 400 Energiebedarf: Endenergiebedarf nach EnEV ohne Nutzerstrom	Konstruktion: KG 300, KG 400 Energiebedarf: Endenergiebedarf nach EnEV (Strom und Wärme) ohne Nutzerstrom

⁹ ÖKOBAUDAT (DE) und Ökobilanzdaten Baubereich (SIA)

¹⁰ NRF: Netto-Raumfläche gemäß DIN 277-1 (ehemals NGF)

¹¹ Nutzerstrom SIA: Neubau: 1.214 kWh/WE*a, 14 kWh/(m²_{Wfl.}*a); Bestand: 2.429 kWh/WE*a, 28 kWh/(m²_{Wfl.}*a)

Bewertungs-system	SIA	Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh)	Nachhaltiger Kleinwohnungsbau (BNK)	DGNB (Marktversion 2018)
Betrachtete Lebenszyklusphasen	Herstellung, Instandsetzung, Energiebedarf im Betrieb, EoL, Potenziale für Rezyklierung	Module A-C: Herstellung, Instandsetzung, Energiebedarf Betrieb, EoL	Module A-C: Herstellung, Instandsetzung, Energiebedarf Betrieb, EoL	Module A-D: Herstellung, Instandsetzung, Energiebedarf Betrieb, EoL, Gutschriften und Lasten außerhalb Systemgrenze
GWP-Faktoren (g CO₂-Ä./kWh)	Strom: 148 g/kWh Wärme: 238 g kWh	aktuelle ÖKOBAUDAT	aktuelle ÖKOBAUDAT	Strom: 579 g/kWh Wärme: 231 g kWh
Betrachtungszeitraum	60 a	50 a	50 a	50 a
Bewertung	Feste Zielwerte	Feste Ziel- und Grenzwerte	Feste Ziel- und Grenzwerte	Feste Ziel- und Grenzwerte auf Basis Gebäudereferenzverfahren nach EnEV

Um eine Vergleichbarkeit der Benchmarks zu erhalten, wurden beispielhaft die Ziel- und Grenzwerte der Bewertungssysteme für die CO₂-Emissionen auf einen einheitlichen Flächenbezug umgerechnet und in der nachfolgenden Abbildung 20 dargestellt. Die Zielwerte der SIA liegen für Neubau und Sanierung mit 15 bzw. 9 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) weit unterhalb der deutschen Grenzwerte. Die festen Benchmarks für die Konstruktion nach SIA und DGNB 2018 liegen mit 5 – 12 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) näher beieinander.

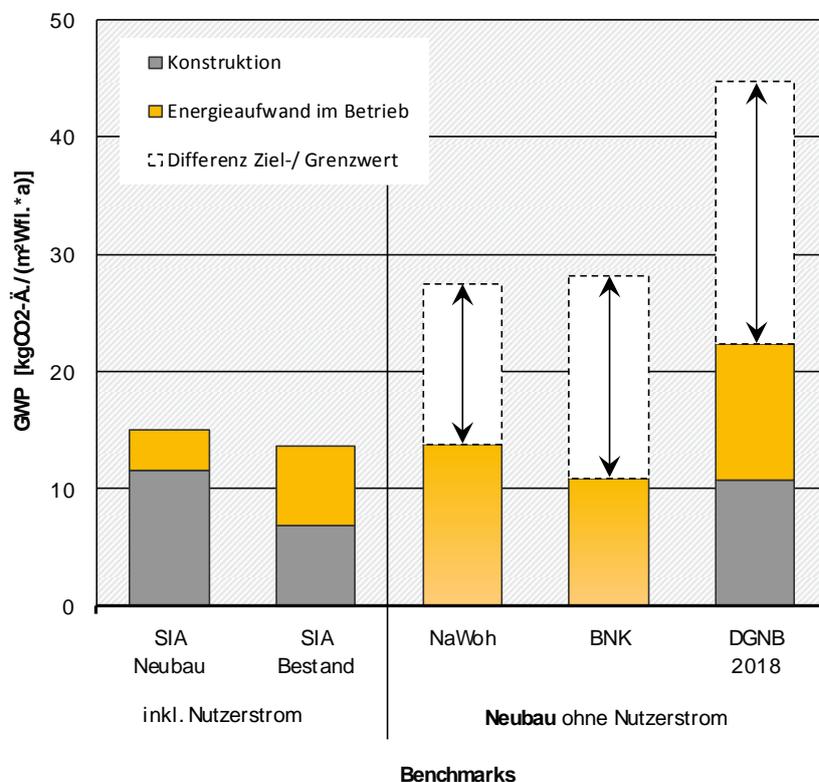


Abbildung 20: Ziel- und Grenzwerte existierender Benchmarks mit Bezug Wohnfläche

Die existierenden Ziel- und Grenzwerte für Wohngebäude in der Schweiz und in Deutschland sind aufgrund der unterschiedlichen Bilanzgrenzen (mit/ ohne Nutzerstrom) und der zu Grunde liegenden CO₂-Faktoren (aktuell/ 2050) nicht vergleichbar. Die Werte können ohne eine weitere Überprüfung nicht als Benchmarks übernommen werden.

2.1.2 Bezugsgrößenanalyse

Die Bewertungssysteme weisen Benchmarks für unterschiedliche Wirkungskategorien auf (s. Darstellung GWP im vorigen Kap. 2.1.1). Im existierenden Ordnungsrecht werden die Gebäude hinsichtlich ihres Primärenergiebedarfs nach EnEV (DIN V 18599) bewertet. Dadurch sind eine Vergleichbarkeit der Energieträger und damit eine Bewertung der fossilen oder erneuerbaren Energieversorgung möglich. „Primärenergie nach EnEV“ ist jedoch keine physikalische, sondern eine politische Größe, der eine Fülle von methodischen Annahmen und politischen Interessen, u.a. Faktor für Verdrängungsstrommix, Bewertung erneuerbarer Brennstoffe, zugrunde liegt. Es handelt sich weder für Laien noch für Fachleute um eine transparente Größe. Kohle, Erdgas und Heizöl, welche in ihrer Klimaschädlichkeit gravierend unterschiedlich sind, werden mit einem einheitlichem Primärenergiefaktor von 1,1 bewertet. Zudem ist der „Primärenergiebegriff nach EnEV“ nicht kompatibel zum sonstigen Begriffsgebrauch z.B. den Statistiken der AG-Energiebilanzen, welche als Grundlage für die Bewertung der bundespolitischen Ziele herangezogen werden. Als „politische Größe“ besteht ein Konflikt zwischen den Anforderungen, sowohl normativ zu beschreiben (Dokumentation des Status Quo) als auch eine Lenkungswirkung zu entfalten (Umsetzung der Energiewende). Sie führt nicht zu international vergleichbaren Kennwerten. Im Sinne der DIN V 18599 ist Primärenergie eine sich verändernde Größe, im Wesentlichen sind davon die Faktoren für Strom und für KWK-Wärme betroffen. Die Folge ist, dass in ihrer energetischen Qualität gleichwertige Gebäude in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Erstellung des Energieausweises unterschiedliche Kenngrößen aufweisen. „Primärenergie nach EnEV“ kommt in der Praxis nicht an. Der Gebäudenutzer denkt in Endenergie und die Politik in der klimaschutzrelevanten Größe Treibhausgasemissionen. Das Treibhauspotenzial ist eine anerkannte Größe und ein verständlicher und bereits bekannter Begriff z.B. für PKW in gCO₂/km. Eine Bewertung der Energieträger bezüglich ihrer realen Klimaschädlichkeit ist möglich. Mit GWP als Bezugsgröße kann ein direkter Zusammenhang zu den klimapolitischen Zielen der Bundesregierung hergestellt werden und zu international vergleichbaren Kennwerten führen. Es besteht die Steuerungsmöglichkeit des Treibhauspotenzials über CO₂-Zertifikate im Europäischen Emissionshandel und einer Energiebesteuerung aller Sektoren durch CO₂-basierte Besteuerung fossiler Brenn- und Kraftstoffe. Eine zusätzliche Angabe von Endenergie kann sinnvoll sein. Diese Größe hat Praxis- und Kostenbezug: Energiemenge, die mit Lieferanten abgerechnet wird und damit für die Bewertung in der Nutzungsphase einfach ermittelbar. Der tatsächlichen Energie- und damit Ressourcenaufwand für den Gebäudebetrieb wird dargestellt und es kann zusätzlich ein klarer Rückschluss auf die gesamte Effizienz eines Gebäudes gezogen werden, ohne dass die Beeinflussung durch Faktoren vorliegt.

2.1.3 Erweiterte Randbedingungen und Bilanzgrenzen

Flächeninanspruchnahme pro Person

Die anhand der Typgebäude und deren Belegung festgelegten Wohnflächen pro Person von knapp 40 m²_{Wfl.}/Person mit Ausnahme des EFH C und GMH F entsprechen den Angaben des Umweltbundesamts für das Jahr 2000. Bis 2014 ist die Wohnfläche pro Person deutlich gestiegen und liegt nun bei 46,5 m²/Person (vgl. UBA 2018). Hier gibt es jedoch einen Unterschied zwischen ländlichen Regionen und Städten. In Ballungsräumen ist die Entwicklung rückläufig und die Tendenz geht aufgrund der gestiegenen Wohnungspreisen wieder zu 40 m²/Person zurück.

Tabelle 6: Wohnfläche /Person der untersuchten Typgebäude

Wohnfläche pro Person in m ²						2000	2014	SIA 2050
MFH	EFH	EFH C	EFH E	MFH E	GMH F	(DE)	(DE)	(Schweiz)
38	39	39	31	39	27	39,5	46,5	44

Die Inanspruchnahme der Wohnfläche pro Person hat einen erheblichen Einfluss auf die pro Kopf Emissionen und damit auf die Definition eines künftigen festen Ziel- oder Grenzwertes für den Gebäudeenergiebedarf. Dies wird anhand der Belegungsszenarien für das saniertes Einfamilienhaus „EFH E“ auf EnEV-2016-Neubauniveau s. Abbildung 21 deutlich. Ein 2-Personenhaushalt im Einfamilienhaus führt im Vergleich zu einem 3,5 Personenhaushalt zu einer Reduktion von 8 % des flächenspezifischen Kennwertes. Die pro Kopf Emissionen steigen jedoch um 60 % von 1,6 auf 2,6 tCO₂-Ä./Person und Jahr.

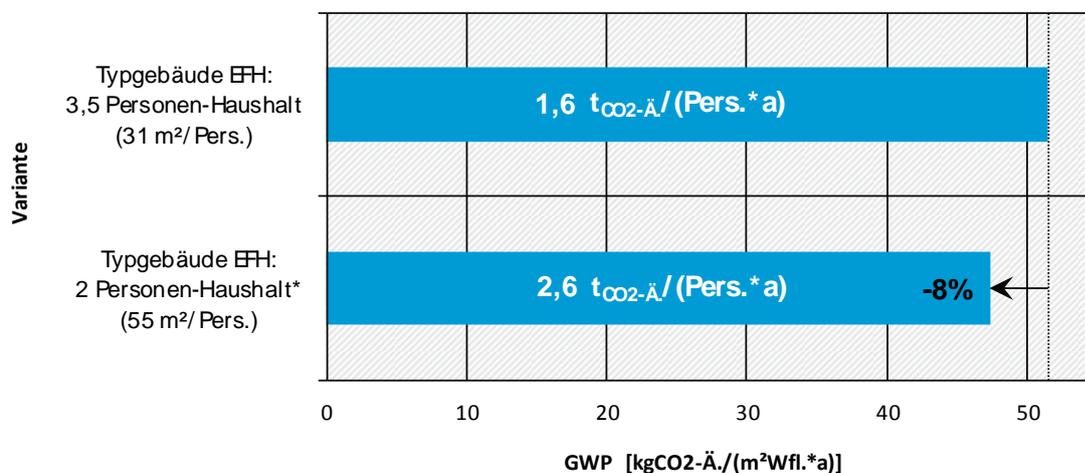


Abbildung 21 Einfluss Flächeninanspruchnahme pro Person anhand Belegungsszenario Einfamilienhaus

Individuelles Nutzerverhalten

Um den Einfluss eines individuellen Nutzerverhaltens zu untersuchen, wurde der angesetzte Nutzerstrombedarf pro Wohneinheit ausgehend vom Grundansatz der Studie mit einer effizienten Ausstattung mit A+ Geräten und einem Bedarf von 1.850 kWh pro Jahr variiert. Dieser Ansatz liegt gemäß Stromspiegel 2016 (vgl. BMUB 2016) unter dem durchschnittlichen Strombedarf deutscher Haushalte gleicher Größenordnung mit einem Verbrauch von 2.410 kWh pro Jahr und über dem optimalen Stromverbrauch besonders energiesparender Haushalte mit 1.450 kWh pro Jahr. Der nach SIA für die 2000-Watt Gesellschaft angesetzte Strombedarf für 2050 ist mit 1.214 kWh pro Jahr noch niedriger (vgl. SIA 2011). In Abbildung 22 sind die gesamten CO₂-Emissionen für das Typgebäude MFH Neubau im EnEV-2016-Standard mit unterschiedlichen Ansätzen für den Nutzerstrombedarf dargestellt. Durch entsprechendes Nutzerverhalten mit unterschiedlichem Strombedarf sind 20 % Abweichung in Bezug auf die gesamten CO₂-Emissionen des Gebäudes möglich. Wird in der Bilanz kein Nutzerstrom angesetzt, reduziert sich der flächenspezifische Energiebedarf für das Gebäude um 30 %. Bezogen auf die Einhaltung eines Benchmarks kann hier zusätzlicher Spielraum in der Planungsphase entstehen. Beim Einsatz von besonders sparsamen Haushaltsgeräten können die Anforderungen an die Gebäudetechnik und -dämmung etwas sinken.

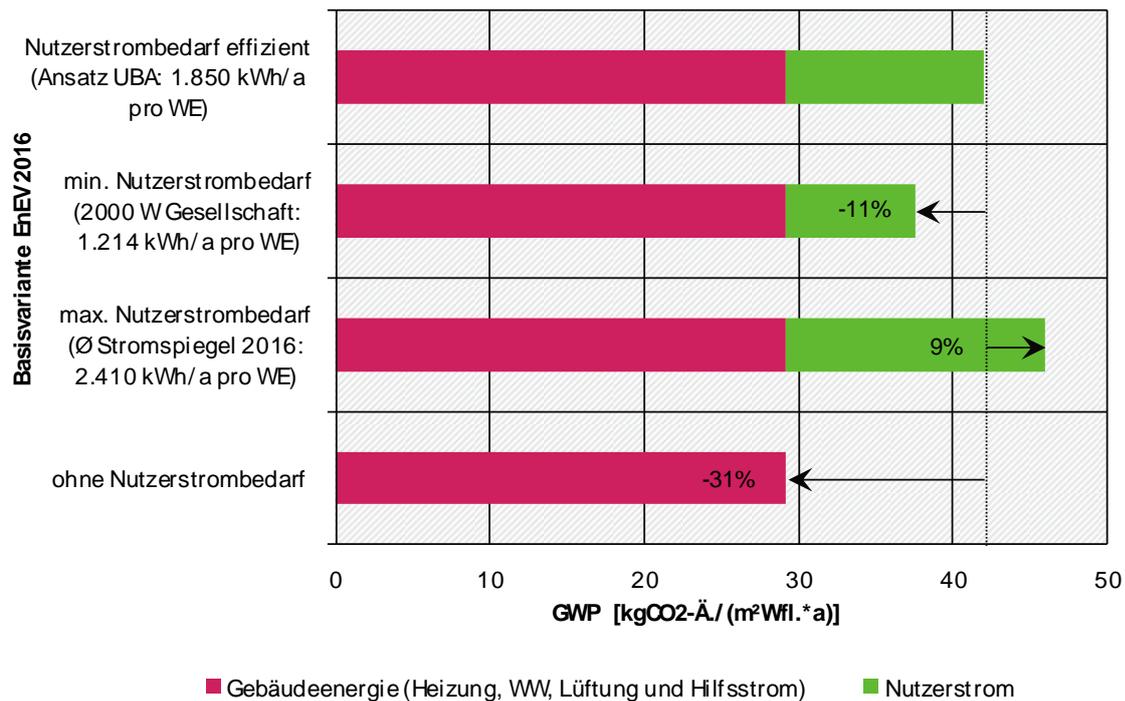


Abbildung 22 Einfluss Nutzerverhalten durch Stromverbrauch am Beispiel Mehrfamilienhaus

2.1.4 Ausblick auf erste orientierende Benchmarks

Auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen werden für künftige Benchmarks folgende Kernforderungen formuliert:

- CO₂ - basierte Zielgröße
- Bewertung anhand absoluter Grenzwerte statt Referenzgebäudeverfahren
- Erweiterung des bestehenden Bilanzrahmens nach EnEV mit Einbezug von Gebäudekonstruktion „grauer Energie“, dem Energiebedarf für Nutzerstrom und einer Gutschrift für Netzeinspeisung dez. Stromerzeugung aus EE (Modul D)
- Gleicher Zielwert für Neubau und Sanierung
- Berücksichtigung der Flächeneffizienz je Person

Als Vorgehensweise für die Festlegung eines zukünftigen Benchmarks wird ein Top-down Ansatz ausgehend vom globalen 2°C Ziel vorgeschlagen. Die Flächeninanspruchnahme pro Person darf dabei als wichtige Einflussgröße nicht vernachlässigt werden. Ein Abgleich mit dem Energiekonzept der Bundesregierung und einem Benchmarking-Prozess über die besten heute realisierten Gebäudekonzepte anhand den Ergebnisse der UBA-Studie liefert eine Einschätzung über Zieldefinition und Realisierbarkeit. Im Hinblick auf das Jahr 2050 muss zudem der Einfluss des externen Faktors Energiebereitstellung über einen veränderten Energiemix untersucht werden.

Die durchschnittlichen pro Kopf-Emissionen für Wohnen, Mobilität, Ernährung, sonstiger Konsum und Infrastruktur belaufen sich in Deutschland im Jahr 2016 auf 11 tCO₂-Ä./Pers.*a (vgl. Statista 2018a und Statista 2018b). Davon entfallen laut ifeu 25 % auf den Sektor Wohnen. Um das 2°C Ziel einzuhalten ist es notwendig die pro Kopf Emissionen auf 2 tCO₂-Ä./Pers.*a in 2050 zu reduzieren (vgl. Rogelj 2011). Die 2000-Watt Gesellschaft leitet für 2050 einen Grenzwert für Wohnen zwischen 0,6 und 0,66 tCO₂-Ä./a pro Person für Neubau und Sanierung ab (vgl.

SIA 2011). Aus beiden Quellen lässt sich ein erster Zielwert für den Sektor Wohnen (o. Mobilität) für 2050 zwischen 0,5 – 0,66 tCO₂-Ä./a pro Person ableiten. Dieser Wert muss im weiteren Verlauf auf Basis eines Szenarios für die Ressourcenverteilung in Deutschland 2050 für die einzelnen Sektoren überprüft werden.

Unter Berücksichtigung einer Flächeninanspruchnahme pro Person zwischen 30 und 50 m² Wohnfläche lässt sich ein linearer Zielwertkorridor ableiten (s. Abbildung 23). Mit einem mittleren Ansatz von 40 m² Wohnfläche pro Person ergibt sich ein Zielwert zwischen 12 – 17 kgCO₂-Ä./(m²_{Wfl}·a).

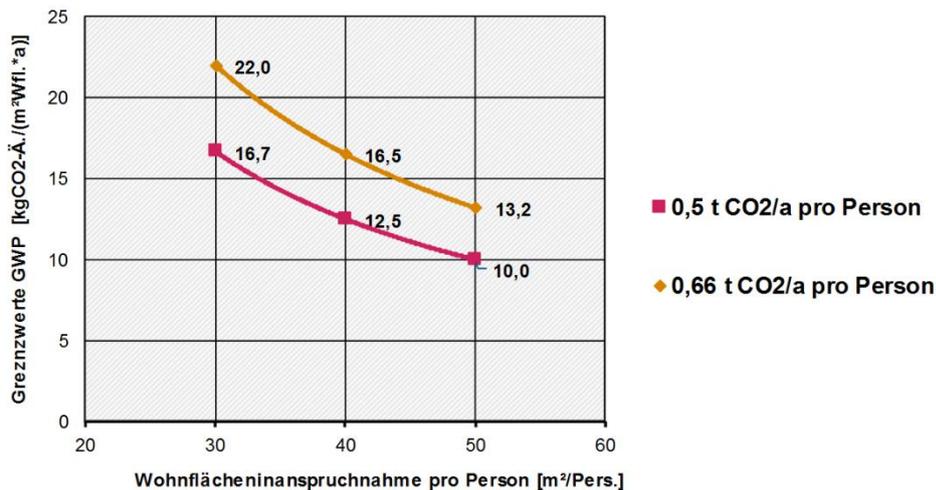


Abbildung 23 Ableitung flächenspezifischer Grenzwerte

Die Berücksichtigung der Flächeninanspruchnahme pro Person kann im Nachweis über das theoretische Personenbelegungspotenzial im Auslegungsfall (vgl. TU Darmstadt 2009), mit Ausnahmen für z.B. Barrierefreiheit, erfolgen. Im Betrieb kann die reale Personenbelegung zugrunde gelegt werden.

Die Treibhausgasemissionen eines beispielhaften Mehrfamilienhauses mit entsprechender Gebäudehülle und Wärmeversorgung über Niedertemperatur-Gaskessel aus dem Jahr 1990 lagen bei ca. 55 kgCO₂-Ä./(m²_{Wfl}·a). Eine Reduktion über 80 % gemäß Energiekonzept der Bundesregierung im Jahr 2050 führt zu einem Zielwert in Höhe von 11 kgCO₂-Ä./(m²_{Wfl}·a) s. Abbildung 24. Eine weitere Absenkung auf 95 % bezogen auf das Jahr 1990 führt jedoch zu einer fast klimaneutralen Anforderung für das Gebäude von 3 kgCO₂-Ä./(m²_{Wfl}·a).

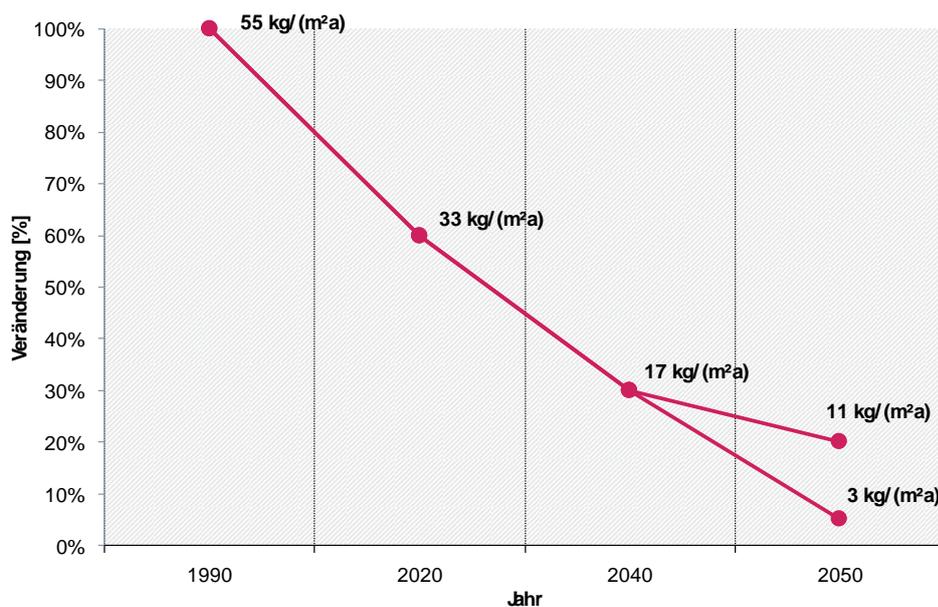


Abbildung 24 Beispielhafte Entwicklung CO₂-Emissionen für MFH nach Energiekonzept der Bundesregierung

Über einen ersten Benchmark-Prozess auf Basis der Variantenuntersuchungen aus dem Projekt „FKZ 3715411110“ im Auftrag des Umweltbundesamtes lassen sich die Möglichkeiten der Umsetzung unter heutigen Randbedingungen erörtern. In Abbildung 19 im Kap. 1.2.4 sind die Variantenkombinationen für das Typgebäude Neubau Mehrfamilienhaus in Massivbauweise abgebildet. Die Zielwerte 12 – 17 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) sind im Massivbau durch eine regenerative Wärmeversorgung und Photovoltaik auf dem Gebäudedach erreichbar. Um eine Technologieoffenheit bei der Wärmeversorgung zu wahren, ist allerdings eine Veränderung der Bauweise notwendig. Am Beispiel Holzbauweise unter heutigen Randbedingungen verschiebt sich die Anforderung für Wärmedämmung, Gebäudetechnik und Energieträger um 6 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) auf 23 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) nach oben. Somit können auch Wärmeversorgungsvarianten über BHKW und Wärmepumpen und einer Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 die Zielwerte erreichen.

Auch in der Bestandssanierung, beispielhaft am Typgebäude MFH E in Abbildung 25 dargestellt, ist der Zielwertkorridor von 12 – 17 kgCO₂-Ä./(m²_{WFl}·a) auf Basis der heute verfügbaren Techniken erreichbar. Allerdings sind die zulässigen Variantenkombinationen stark abhängig vom Energiemix. Eine Sanierung auf Passivhausniveau und eine Wärmeversorgung mit Wärmepumpen hält mit dem derzeitigen Strommix (605 gCO₂-Ä./kWh) den Zielwertkorridor nicht ein. Mit einem hohen Anteil an regenerativer Wärmeversorgung sind die Zielwerte teilweise bereits durch eine Dämmung auf EnEV-2016 Neubauniveau erreichbar. Mit einer verbesserten Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 ist eine Wärmeversorgung über KWK möglich.

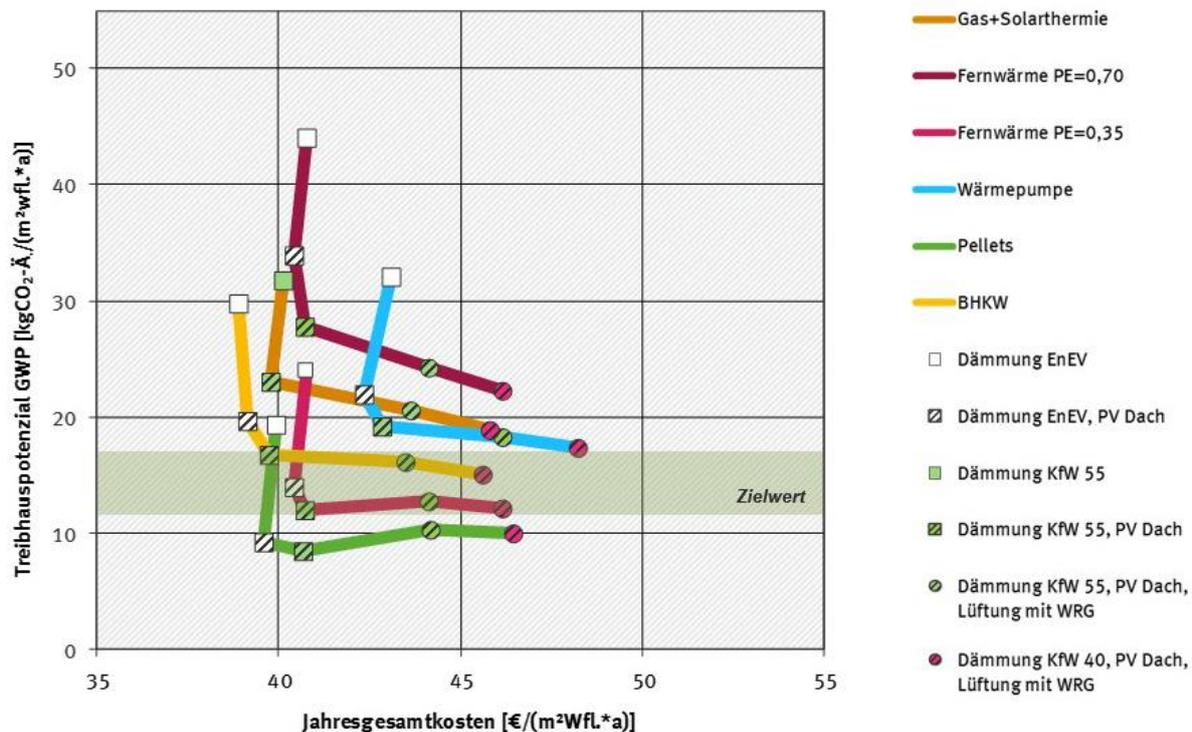


Abbildung 25 GWP und Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Sanierung MFH E

2.1.5 Einfluss einer dynamischen Entwicklung

Einfluss zukünftiger Entwicklungen im Bereich der Energiebereitstellung auf die Nutzung

Der Einfluss eines veränderten Energiemix auf die Nutzungsphase wird am vorigen Beispiel einer Bestandssanierung des Typgebäude MFH E untersucht. Für den Strommix 2050 wird das Zielszenario von 123 g/kWh nach IER (vgl. IER 2015) zugrunde gelegt. Dieses Szenario setzt eine Nutzung der solaren Energie durch Photovoltaik am Gebäude voraus. Für den Gasmix 2050 wurde ein Szenario mit 45 % regenerativem Anteil und einer Verbesserung von derzeit 247 auf 148 g/kWh hinterlegt. Wie aus dem Vergleich in Abbildung 26 hervorgeht, sinken die Treibhausgasemissionen durch den Energiemix 2050 für fast alle Variantenkombinationen. Besonders auffällig ist die Verbesserung der Wärmepumpenvariante, welche sich nun weit unterhalb der Zielwerte befindet und die beste Versorgungsvariante darstellt. Aufgrund der sinkenden Stromgutschriften verschlechtern sich die KWK-Varianten im Szenario 2050 gegenüber 2015 leicht. Die Zusammensetzung des zukünftigen Energiemix hat demnach großen Einfluss auf die Auswahl der Wärmeerzeugung. Eine Verbesserung der Dämmung über EnEV-2016 Neubauniveau hinaus oder die Frage der Lüftungsart mit oder ohne Wärmerückgewinnung spielen für die Erreichung der Zielwerte eine untergeordnete Rolle.

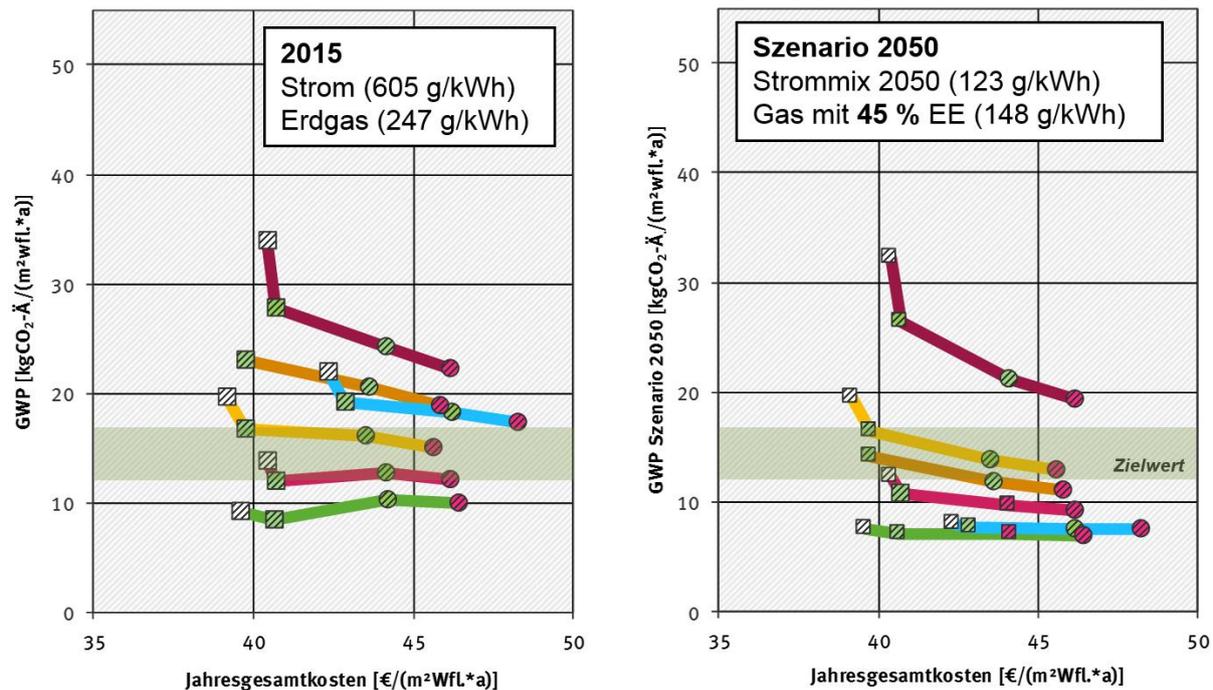


Abbildung 26 Einfluss zukünftige Energiebereitstellung am Beispiel Sanierung MFH E (2015/ 2050)

Einfluss zukünftiger Entwicklungen im Bereich der Energiebereitstellung auf Bauprodukte

Zukünftige Entwicklungen der Energiebereitstellung können einen großen Einfluss auf die Umweltwirkungen von Bauprodukten aufweisen. Dies liegt vor allem am Einfluss der Energieverbräuche bei der Herstellung. Mit der Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien in der Energiebereitstellung sinkt gleichzeitig die Umweltwirkung energieintensiver Produkte. Bei Bauprodukten auf Basis nachwachsender Rohstoffe mit weniger energieintensiven Verarbeitungsschritten bleiben die Umweltwirkungen der Herstellung annähernd konstant. Je nach Bauprodukt kann die Energiebereitstellung auch die Umweltwirkungen am Lebensende beeinflussen. Für Holzprodukte beispielweise gilt der Prozess der Verbrennung in einem Heizkraftwerk am Lebensende mit Erzeugung von Strom und Wärme. Durch das Modul D werden in der Ökobilanz Gutschriften für die Produktion von Strom und Wärme in Höhe der vermiedenen Umweltwirkungen von Strommix Deutschland und thermische Energie aus Erdgas auf dem jeweiligen Basisjahr gewährt. Durch eine Veränderung der Energiebereitstellung ist eine starke Verringerung dieser Gutschriften erkennbar. Je nach Bauprodukt wirken sich die zukünftigen Veränderungen der Energiebereitstellung unterschiedlich stark aus. Nachfolgend werden einige wichtige Baustoffe näher untersucht.

Stahlbeton: Mit 80 % der CO₂-Emissionen ist ein Großteil der Umweltwirkungen von Beton auf die Herstellung von Zement zurückzuführen. Hier ist hauptsächlich der Brennvorgang des Zementklinkers und bei der Betrachtung der Treibhausgasemissionen die Freisetzung des stofflich gebundenen CO₂ entscheidend. Es kommen große Mengen Sekundärbrennstoffe (Abfall) und verschiedene fossile Brennstoffe wie Steinkohle, Braunkohle und Heizöl zum Einsatz. Auf Basis des heutigen Prozesses der Zementherstellung werden sich durch zukünftige Veränderungen der Energiebereitstellung beim Beton nur geringe Einsparungen hinsichtlich der Umweltwirkungen ergeben. Für den Bewehrungsstahl für Gebäudekonstruktionen wird Recyclingstahl verwendet. Beim Schmelzvorgang über Lichtbogenverfahren ist der hohe Stromaufwand entscheidend und der Einsatz regenerativ erzeugten Stroms auf die Umweltwirkung groß.

Ziegelmassivbauweise (Kalksandstein / Hochlochziegel): Bei der Herstellung von Kalksandstein spielt die Kalkherstellung eine große Rolle. Beim Brennvorgang und der Dampfhärtung werden große Mengen fossil bereitgestellte thermischer Energie eingesetzt und im Prozess gebundenes CO₂ frei. Auch die Hochlochziegelproduktion wird durch den Brennvorgang der Ziegel bei 950 bis 1050°C dominiert. In diesem Prozess kommt vor allem Erdgas und teilweise Erdöl als Brennstoffe zum Einsatz. Zukünftige Änderungen bei der Energiebereitstellung wirken sich ohne einen Wechsel der Energieträger begrenzt auf die Umweltwirkungen der Produktion von Kalksandstein oder Hochlochziegeln aus. Können allerdings größere Mengen bisher thermischer Energie durch erneuerbare Energieträger ersetzt werden, wären Einsparungen möglich.

Holzkonstruktionen und Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe: Auf Grund der meist geringen Aufwände bei der Herstellung von Konstruktionen und Dämmstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe ist das Potenzial der zukünftigen Veränderungen der Energiebereitstellung gering.

Fossile Dämmstoffe: Die Umweltwirkungen von fossilen Dämmstoffen (z.B. EPS, PUR) werden von der Rohstoffbereitstellung (Granulat) und dem Schäumvorgang dominiert. Beide Prozessketten sind energieintensiv und Veränderungen in der zukünftigen Energiebereitstellung bieten ein Einsparpotenzial. Allerdings können die Aufwände der Rohstoffbereitstellung aus den Routen Erdöl, Erdgas bzw. Steinkohle nicht erschlossen werden, wenn diese nicht in Deutschland stattfinden.

Glas-/ Steinwolle: Je nach Verfahren und Herstellung der Schmelze z.B. mit elektrisch betriebener Schmelzöfen, kann die zukünftige Veränderung der Energiebereitstellung in der Produktion von Glas- und Steinwolle zu großen Einsparungen der Umweltwirkungen führen. Weitere Reduktionen sind bei Prozessschritten, die teilweise Erdgas benötigen wie z.B. Spinnen, nur unter Annahme eines Anstiegs von Biomethan im Erdgasnetz gegeben.

Fenster: Die Herstellung der benötigten Rohstoffe für die Isolierglasherstellung und beispielsweise die PVC Bereitstellung für Kunststofffenster sind besonders energieintensiv. Zukünftige Einsparungen in der Herstellung sind lediglich als Folge einer Verbesserung der benötigten Rohstoffe hinsichtlich Holzkomponenten und Recyclinganteile für Metall- und Kunststofffenster.

Photovoltaik: Die Umweltwirkungen sind je nach Verfahren und Technologie stark vom Strombedarf der Produktionsprozesse dominiert. Durch die hohen Anforderungen im Produktionsprozess in Reinräumen und die Verlagerung der Produktion in den asiatischen Raum sind durch die klimatischen Bedingungen am Fertigungsstandort und der Transport weitere Einflussfaktoren dazugekommen. Das Potenzial einer veränderten Energiebereitstellung in Deutschland ist dadurch stark eingeschränkt.

Insgesamt lässt sich auf Grund der Veränderungen der Energiebereitstellung Auswirkungen auf die Umweltwirkungen von Bauprodukten erkennen. Dominieren strombasierte Prozesse die Umweltwirkungen von Bauprodukten, ist der Einfluss zukünftiger Energiebereitstellung besonders groß. Ist allerdings der thermische Energiebedarf der größte Treiber bei den Umweltwirkungen, ist es fraglich, ob und in welcher Höhe sich die Umweltwirkungen bei Veränderungen der zukünftigen Energiebereitstellung erschließen lassen. Lediglich erdgasbasierte Prozesse weisen hier möglicherweise auf Grund der Nutzung von Biomethan weitere Potenziale auf. Dies unterliegt aber vielen Randbedingungen wie Wirtschaftlichkeit, Sicherstellung der Produktqualität und weiteren technischen Randbedingungen, was eine Verwirklichung möglicher, zukünftiger Einsparungen stark beschränken kann.

Ableitung erster Szenarien zur Identifizierung von Potenzialen

Die größten Potenziale zur Reduzierung der Umweltwirkungen hinsichtlich CO₂-Emissionen und KEAne liegen in der Nutzungsphase. Neben der Nutzung der solaren Energie durch die Installation von Photovoltaik auf den

Gebäudedächern ist die Auswahl der Wärmeerzeugung abhängig vom hinterlegten Energiemix entscheidend. Der durch KWK und Photovoltaik dezentral erzeugte Strom wird teilweise direkt zur Eigenstromdeckung verwendet. Die angerechnete Eigenstromnutzung wird vom Strombedarf des Gebäudes abgezogen. Eine Änderung des Strommixes im Betrachtungszeitraum hat hier keinen Einfluss. Der überschüssig erzeugte Strom wird ins Netz eingespeist und durch die Betrachtung inklusive Modul D mit dem aktuellen Strommix gutgeschrieben. Der Aufwand für den Reststrombedarf der Gebäude oder den Gasbedarf wird ebenso statisch für den gesamten Betrachtungszeitraum von 50 Jahren mit dem aktuellen Strom- bzw. Gasmix berechnet. Dies hat maßgeblichen Einfluss auf die Bilanz und führt je nach Verhältnis Strombedarf zu Stromerzeugung bzw. Gasbedarf zu unterschiedlichen Aussagen des gleichen Gebäudes. Im Hinblick auf eine sich verändernde Energiebereitstellung müssen der Energiebedarf und Gutschriften für Strom und Wärme dynamisch bewertet werden. Dies könnte durch einen mittleren Ansatz für den Umwelteinfluss von Strom im Betrachtungszeitraum 2020 – 2050 erfolgen.

Der Hauptaufwand bei Bauprodukten fällt in der Herstellungsphase und damit zu Beginn des Betrachtungszeitraums an. Die Potenziale zur Reduzierung der Umweltwirkungen liegen hier hauptsächlich in alternativen Bauweisen wie Betonleichtbau oder Holzkonstruktionen und in der Anwendung alternative Materialien wie Geopolymere statt Zement, Glasfaser- statt Stahlbewehrung, nachhaltiger Dämmstoffe und Holz- und Recyclingkomponenten. Speziell im Bereich Photovoltaik spielt die Optimierung von Fertigungsweisen und effizientere Module eine große Rolle. Auch im Baubereich kann eine Kaskadennutzung von Baumaterialien z.B. aus Holzwerkstoffen (vgl. Fehrenbach 2017) sinnvoll sein. Der Einfluss einer veränderten Energiebereitstellung auf die Bauprodukte in der Instandsetzung und am Lebensende ist im Verhältnis zur Herstellung weitaus geringer. Die Phase Instandhaltung nimmt beim Beispiel Neubau Mehrfamilienhaus im Plusenergie-Standard 30 % der verbleibenden CO₂-Emissionen ein. Die KG 300 spielt bedingt durch die hohe Lebensdauer eine untergeordnete Rolle. Für die Anlagentechnik der KG 400 werden Ersatzkomponenten im Betrachtungszeitraum fällig. Die Bewertung der Umweltwirkung von Austauschzyklen sollte ebenfalls dynamisch auf Basis der derzeitigen Herstellungsprozesse erfolgen. Dies kann bereits in der Datenbasis der jeweiligen Produkte festgeschrieben werden. Die Betrachtung des Lebensendes ist vor allem für nachwachsende Bauprodukte wie z.B. Holzkonstruktionen aber auch für Beton bei entsprechender Verwertung entscheidend. Die EoL-Gutschriften im Modul D für Strom und Wärme muss den künftigen Energiemix berücksichtigen. Hier können statische Strom- und Wärmegutschriften auf Basis eines Zielszenarios für 2050 erfolgen.

2.2 Möglichkeiten einer ordnungsrechtlichen Verankerung

2.2.1 Auswirkungen auf bestehende Planungsprozesse und Nachweispflichten

Bislang findet eine Ökobilanz meist als reines Nachweiswerkzeug am Ende der Bauphase Anwendung. Ziel ist der Einsatz als projektbegleitendes Optimierungswerkzeug mit den gemäß Abbildung 27 dargestellten Vorteilen in den einzelnen Planungsphasen.

Phase	Vorgehensweise und Vorteile LCA
Genehmigungsplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Datengrundlage EnEV Berechnung, vereinfachte Ansätze für Bauteile, ggf. Sicherheitszuschlag • Entscheidung zu Bauweise und Anlagentechnik • Richtungssicherheit hinsichtlich des LCA Ergebnis
Vorbereitung zur Vergabe und Vergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Green Procurement: ökobilanzielle Anforderungen in Leistungsparameter • Präzisierung Umweltwirkung durch Festlegung der Bauprodukte
Fertigstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Fortschreibung der Eingabe als Nachweis
Nutzungsphase (Ausblick)	<ul style="list-style-type: none"> • Fortschreibung als Verbrauchsnachweis im Zuge einer möglichen CO₂-Besteuerung

Abbildung 27 Potenziale LCA in Leistungsphasen

Kenntnisse in der Lebenszyklusbetrachtung (LCA) von Gebäuden sind durch die bestehenden Zertifizierungssysteme vorhanden. Eine Befragung der Softwareanbieter führt zu einer Abschätzung von derzeit ca. 3.500 Anwendern in Deutschland. Allerdings ist eine LCA bislang kein fester Bestandteil der Lehre an Hochschulen. Etwa ein bis zwei Tage Fortbildung in Form einer Grundeinführung in die LCA Thematik und das entsprechende Ökobilanzierungstool sind notwendig. Fortbildungsangebote sind über die DGNB, Architektenkammern und Anbieter von Ökobilanzierungstools in Form von Produktschulungen, Webinaren und Vorlesungen vorhanden. Das größte Hindernis für eine breite Anwendung ist eine fehlende gesetzliche Forderung oder Förderung entsprechender Maßnahmen.

Der größte Planungsaufwand für die Erstellung einer Ökobilanz liegt in der Datenaufnahme des Gebäudes und der Erstellung eines detaillierten Bauteilkatalogs. Es werden bereits verschiedene Ansätze verfolgt, den Prozess zu vereinfachen um den damit verbundenen Kostenaufwand zu reduzieren. Diese liegen beispielsweise in der automatisierten Übernahme von EnEV-Daten und vereinfachten Ansätzen für die Erfassung von Bauteilen und Bewertung von Bauteilkonstruktionen z.B. über Benchmarks s. hierzu Kap. 2.2.2. Ziel ist es eine Ökobilanz für Wohngebäude mit einem Aufwand von einem halben bis einem Tag durchzuführen.

Eine Aufwand/ Nutzen Abschätzung unter Berücksichtigung von Mehrkosten in Planung und Hochbau gemäß Tabelle 7 für typische Neubauten im Ein- und Mehrfamilienhausbereich ergibt potenzielle CO₂-Vermeidungskosten von etwa 180 €/tCO₂-Ä.

Tabelle 7: Aufwand/ Nutzen Betrachtung LCA am Beispiel EFH und MFH

Aufwand/ Nutzen Betrachtung	Typ EFH	Typ MFH
Aufwand Ökobilanz	500 €	1.000 €
Investitions-Mehrkosten KG 300 (+3 %)	7.500 €	95.000 €
Summe Mehraufwand	8.000 €	96.000 €
Einsparung Konstruktion (max.)	43 t CO ₂ -Ä.	539 t CO ₂ -Ä.
CO ₂ -Vermeidungskosten	185 €/ t CO ₂ -Ä.	178 €/ t CO ₂ -Ä.

Die Geltungsdauer einer Ökobilanz kann auf 10 Jahre entsprechend einem Nachweis für den Energieausweis angesetzt werden. Bei größeren Umbaumaßnahmen muss eine neue Bilanzierung erfolgen. Eine Bestandsbewertung von sanierten Gebäuden ist auch heute schon möglich. Vergleiche können durch Variantenbildung unter Anwendung eines Bedarfs-/Verbrauchs-Abgleich durchgeführt werden. Im Bestand müssen jedoch die Systemgrenzen für eine LCA Betrachtung noch eindeutig definiert werden (s. hierzu Kap. 2.2.2).

2.2.2 Erfordernisse für eine Nachweismethode und bausoftwaretechnische Lösung

Voraussetzungen für eine Nachweismethode ist die Bereitstellung von Produktinformationen in Form der ÖKOBAUDAT oder herstellerspezifischen EPDs. Zudem ist eine Standardisierung des Prozesses hinsichtlich Bilanzgrenzen, Datenaufnahme und zulässigen vereinfachte Verfahren nötig (s. Tabelle 8).

Tabelle 8: Prozess Ökobilanz und Forschungsbedarf

	Aktueller Stand	Handlungs-/Forschungsbedarf
Datenbasis	a) generische Daten (ÖKOBAUDAT) <ul style="list-style-type: none"> basieren auf Literaturdaten, daher teilweise ungenügende Qualität 10 – 30 % Sicherheitsaufschlag d.h. bis zu 30 % Fehlerabweichung hinsichtlich Konstruktion möglich Datensätze für Anlagentechnik begrenzt jährliches Update der Datensätze b) EPDs der Hersteller <ul style="list-style-type: none"> Kein Sicherheitsaufschlag 5 Jahre Gültigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Ausbau der Datenbasis Verbesserung der Datenqualität Standardisierung der Datensätze bzgl. Sicherheitsaufschläge und Gültigkeit
Bilanzgrenzen und Lebenszyklusphasen	<ul style="list-style-type: none"> vereinfachte Verfahren (vollständige Eingabe KG 300, nur Erzeugung KG 420 - 440) vs. detaillierte Eingabe Energiebedarf und Erzeugung: Angabe Energiebedarf Wohngebäude nach EnEV ohne Nutzerstrom (Modul B), Gutschrift für 	Definition der Bilanzgrenzen: <ul style="list-style-type: none"> anzurechnende Komponenten der KG 300 und KG 400 Erweiterung Energiebedarf und Erzeugung (Modul B+D): Einbezug des Nutzerstrombedarfs und damit

	Aktueller Stand	Handlungs-/Forschungsbedarf
	<p>Einspeisung wird teilweise nicht angerechnet (Modul D). -> keine konsistente Bilanz bei Gebäuden mit Photovoltaik auch hinsichtlich LCC</p> <ul style="list-style-type: none"> Bestandsbewertung möglich, aber Systemgrenzen nicht eindeutig definiert. 	<p>Berücksichtigung der realen Eigenbedarfsdeckung und Gutschrift von dezentral erzeugtem erneuerbaren Strom auf Basis einer Monats- oder Stundenbilanz</p> <ul style="list-style-type: none"> Definition der Systemgrenzen für Bestandsbewertung z.B. Aufwand für Rückbau Altkonstruktion
Daten-aufnahme/ Vereinfachte Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> Massenermittlung ist aufwändig: Doppelte Erfassung und Eingabe der EnEV-Daten, Innenbauteile müssen zusätzlich erfasst werden, vereinfachte Aufnahme Anlagentechnik möglich 10 % Sicherheitsaufschlag für Verwendung EPDs, 20% Sicherheitsaufschlag für vereinfachtes Verfahren (DGNB) Es existiert keine einheitliche Flächendefinition 	<ul style="list-style-type: none"> Kopplung mit EnEV-Berechnung Entwicklung vereinfachter Verfahren: vereinfachte Flächenermittlung (z.B. Innenbauteile über BKI), Verwendung von Benchmarks in Entwurfsphase (s. SIA 2032, Anhang D), Bilanzgrenzen definieren Höhe der Sicherheitsaufschläge prüfen Standardisierung der Flächenaufnahme (s. SIA 2032)
Qualitäts-sicherung	<ul style="list-style-type: none"> Die Ergebnisse sind schwer nachprüfbar, da keine breite Datenbasis und Erfahrungswerte vorhanden (Modellierungsfehler, Flächeneingabe) 	<ul style="list-style-type: none"> Benchmarking Prozess für Nutzungstypen, Kostengruppen und Bauteile Interne Plausibilitätsprüfung in Software integrieren

Bereitstellung von integrierten Softwarelösungen

Die Recherche zu Produktleistungen hinsichtlich integrierten Softwarelösungen wurde anhand von Telefoninterviews mit fünf deutschen Softwareanbieter¹² durchgeführt. Kriterium für deren Auswahl war die Nutzung der ÖKOBAUDAT als Datengrundlage für die Ökobilanzen. Hauptanwendung aller ausgewählten Softwares sind Ökobilanzierungen für Wohngebäude und Nichtwohngebäude. Es handelt sich um Bewertungstools für eine Zertifizierung nach BNB und DGNB sowie einem Planungs- und Optimierungstool für Architekten. Die Programme sind teilweise frei oder kostenpflichtig. Momentan werden verschiedene Ansätze verfolgt um Schnittstellenlösungen zu EnEV Software zu generieren (s. Tabelle 9).

¹² Softwareanbieter eLCA, LEGEP Software, SBS Building Sustainability, Ökobilanz-Bau, CAALA

Tabelle 9: bausoftwaretechnische Lösung – aktuelle Ansätze

Schnittstellenlösung zur EnEV Software	Stelle/ Programm	Marktverfügbarkeitsprognose
a) Integrales Tool: <ul style="list-style-type: none"> • LCA, EnEV und LCC in einem Tool integriert Herausforderung: Hoher Aufwand beim Softwareanbieter	LEGEPE Software	verfügbar
b) Schnittstellenlösung zur EnEV Software <ul style="list-style-type: none"> • Import EnEV-Daten nach eLCA über .xml Schnittstelle • Individuelle Entwicklung der EnEV-Softwareanbieter Herausforderung: Softwares liefern unterschiedliche Datenqualität hinsichtlich Bauteilaufbauten, Aktualität EnEV Daten	eLCA	2 Programme verfügbar, weitere 5 geplant bzw. in Arbeit

Darüber hinaus gibt es weitere Möglichkeiten eine Ökobilanz im Planungsprozess zu integrieren. In diversen Simulationsprogrammen¹³ sind eigene Ökobilanzdaten für Komponenten hinterlegbar und damit Aussagen zu CO₂-Emissionen und KEA möglich. Da die verwendeten Datensätze frei einzugeben sind, ist eine Qualitätssicherung nicht immer gewährleistet. Ein weiterer Ansatz für einen integralen Planungsprozess mit Hilfe von BIM wird im laufenden Forschungsvorhaben „BIM2LCA4IP“ (vergl. BIM2LCA4IP 2019) des Fraunhofer IBP verfolgt. Eine Open-BIM-Schnittstelle im ifc 4 Format (ifc.xml) wird entwickelt um Bauteil- und Komponenten-Daten vom BIM-Modell in ein LCA Tool zu exportieren. Nach der erfolgten LCA-Berechnung können die Daten wieder in das BIM-Modell importiert werden. Die Herausforderung liegt hierbei in der Materialklassifikation von BIM-Gebäudedaten und dem ÖKOBAUDAT-Datensatz. Die Schnittstelle soll Mitte 2019 verfügbar sein.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass entsprechende Softwarelösungen zur Berechnung der „grauen Energie“ von Gebäude vorhanden sind und sich weitere in Entwicklung befinden und bereits ab nächsten Jahr verfügbar sein können.

2.3 Empfehlungen für eine weitere Vorgehensweise

Die Entfaltung einer Lenkungswirkung durch die beschriebene neue Bewertungssystematik ist durch kurzfristige Maßnahmen wie das Aufsetzen neuer Förderprogramme und mittelfristig durch die Verankerung im Ordnungsrecht möglich.

Die technische Umsetzung mit Bilanzierung der „grauen Energie“ durch entsprechende Softwareprogramme ist heute bereits möglich. Für eine wirtschaftliche Umsetzung mit angemessenem Kosten-/Nutzenverhältnis einer LCA-Betrachtung ist die Festlegung von standardisierten vereinfachten Verfahren notwendig. Grundlage hierfür sind detaillierte Extrembetrachtungen von Gebäudemodellen mit hohem und niedrigem TGA-Anteil, um die Auswirkungen von Vereinfachungen hinsichtlich der Anlagentechnik in den Phasen Herstellung, Instandhaltung und EoL zu untersuchen. Ein Benchmarkprozess für Kostengruppen und Bauteile liefert die Grundlage für eine schnelle Eingabe von Bauteilen in der Entwurfsphase oder bei vereinfachten Verfahren. Eine weitere Komponente

¹³ z.B. DesignBuilder

ist die Festlegung von Methoden zur vereinfachten Flächenaufnahme. Die Unschärfen und Fehlerbetrachtungen der unterschiedlichen Vereinfachungen müssen analysiert und zu einem standardisierten vereinfachten Verfahren zusammengeführt werden. Dies kann als zulässiges Ersatzverfahren zusätzlich zu einer detaillierten Gebäudeeingabe gelten. Für die Qualitätssicherung einer LCA-Betrachtung muss gemäß Kap. 2.2.2 eine Standardisierung (Normung) erfolgen und feste Rahmenbedingungen definiert werden. Die Erarbeitung eines vereinfachten Verfahrens kann im ersten Schritt durch das Bearbeitungsteam STZ EGS und Fraunhofer IBP erfolgen.

Eine kurzfristige Möglichkeit zur Berücksichtigung der „grauen Energie“ ist die Auflage eines neuen Förderprogrammes zusätzlich zu den bereits bestehenden KfW - Effizienzhäusern. In der Schweiz wird die „graue Energie“ durch die zusätzlichen Kriterien im Standard Minergie Eco (MINERGIE 2018) bereits berücksichtigt. Förderungen können entsprechend den erreichten CO₂-Einsparungen in der Konstruktion im Vergleich zu einer konventionellen Bauweise erfolgen. Eine angemessene Höhe ist im Abgleich mit CO₂-Vermeidungskosten in €/tCO₂ und den Kosten für den Mehraufwand für die Lebenszyklus-Planung, die Ausschreibung und den Nachweis und Mehrinvestitionskosten für "bessere" Produkte zu bestimmen. Für die zügige Einführung einer LCA-Betrachtung spricht auch die Angabe einer Richtungssicherheit für die Industrie zur Bereitstellung entsprechender Bauprodukte.

Auch wenn für Gebäude im Nullenergie- und Plusenergie-Standard der Anteil „graue Energie“ überwiegt, darf die Gesamtbilanz der Gebäude nicht vernachlässigt werden. Die Nutzungsphase hat bei der Mehrheit der Gebäude immer noch den größten Anteil am Energiebedarf und kann mit dem besten Kosten-/ Nutzenverhältnis reduziert werden. Eine Förderung mit Lenkungswirkung für die Nutzungsphase und damit die Gesamtgebäudebilanz ist ebenfalls notwendig. Ein verpflichtender Nachweis der CO₂-Emissionen im gesetzlichen Nachweis ist die Grundlage für eine Förderung für erreichte CO₂-Einsparungen in der Planung und kann eine entsprechende Lenkungswirkung hinsichtlich Reduzierung der Treibhausgasemissionen entfalten. Wird die Entwicklung der künftigen Energiebereitstellung außer Acht gelassen, führt eine Umstellung der Bewertungsgröße von Primärenergie auf CO₂-Emissionen zu einer Veränderung der Gebäudebewertung, da Fernwärme- und Wärmepumpensysteme momentan noch höhere CO₂-Emissionen verursachen (s. Kap. 1.1.4). Im Nachweis kann die Bewertung für Strom durch einen mittleren Faktor für Strom im Betrachtungszeitraum 2020 – 2050 erfolgen und die Entwicklung der Energieträger im Fernwärmesektor durch einen Faktor berücksichtigt werden. Dadurch würde die gewünschte Verbreitung von Wärmepumpen und Fernwärmesystemen mit einer schrittweisen Erhöhung des regenerativen Anteils nicht eingeschränkt. Zudem ist der Ausweis von CO₂-Emissionen ein wichtiger Aspekt für die Berichterstattung und Monitoring der Fortschritte hinsichtlich erreichter Klimaschutzziele im Gebäudebereich (vgl. EPBD Update 2018). Die vorgeschlagene Berücksichtigung der Eigenstromnutzung durch Photovoltaik durch einen primärenergetischen Bonus für eine Photovoltaikanlage geht in die richtige Richtung.

Mittelfristig wird die Umstellung auf CO₂ als Bewertungsgröße und die Erweiterung der Bilanzgrenzen durch die Berücksichtigung von Nutzerstrom und Elektromobilität (vgl. EPBD Update 2018) sowie der „grauen Energie“ im Nachweis gefordert. Die Rahmenbedingungen für eine ordnungsrechtliche Verankerung müssen geprüft werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typgebäude Neubau MFH und EFH, Entwurf nach Eble Messerschmidt Partner 2016	5
Abbildung 2: Typgebäude Sanierung, Quelle: IWU 2015	5
Abbildung 3: Anteil Gebäude (links) und Wohnfläche (rechts), Quelle: IWU 2015,* statistisches Bundesamt 2017 6	6
Abbildung 4: Anteil Heizenergieverbrauch, Quelle: IWU 2015	6
Abbildung 5: Übersicht Variantenmatrix Neubau (*MFH - Varianten mit PV auf Dach und Fassade)	7
Abbildung 6: Übersicht Variantenmatrix Sanierung.....	7
Abbildung 7: Lebenszyklusanalyse in der Ökobilanz, Quelle: Fraunhofer IBP in Anlehnung nach ISO14040.....	11
Abbildung 8: Betrachtete Komponenten in Modellbetrachtung vs. Realabbildung.....	14
Abbildung 9: rel. Faktoren der Wirkungsindikatoren KEAne, GWP und Primärenergie nach EnEV	15
Abbildung 10: Neubau und Sanierung Mehrfamiliengebäude, GWP (links) & KEAne (rechts)	16
Abbildung 11: Neubau und Sanierung Einfamilienhaus, GWP (links) & KEAne (rechts).....	17
Abbildung 12: CO ₂ -Bilanz der Energiekonzepte übliche Bauweise Neubau Mehrfamilienhaus.....	18
Abbildung 13: CO ₂ -Bilanz im Detail der Energiekonzepte übliche Bauweise Neubau Mehrfamilienhaus	19
Abbildung 14: CO ₂ -Bilanz der Energiekonzepte übliche Bauweise Sanierung Mehrfamilienhaus MFH E	20
Abbildung 15: Anteile GWP an Herstellung (A1-A3) am Beispiel Neubau MFH im Plusenergie-Standard	21
Abbildung 16: GWP von Außenwandkonstruktionen (*nur EnEV 2016).....	21
Abbildung 17: Ökobilanz Ranking Wärmedämmmaterialien links, Perimeter-Dämmmaterialien rechts.....	22
Abbildung 18: Neubau MFH Plusenergie: Massivbauweise vs. Holzbauweise mit EoL-Szenarien.....	23
Abbildung 19: GWP und Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau MFH (Massivbauweise).....	24
Abbildung 20: Ziel- und Grenzwerte existierender Benchmarks mit Bezug Wohnfläche	28
Abbildung 21 Einfluss Flächeninanspruchnahme pro Person anhand Belegungsszenario Einfamilienhaus	30
Abbildung 22 Einfluss Nutzerverhalten durch Stromverbrauch am Beispiel Mehrfamilienhaus	31
Abbildung 23 Ableitung flächenspezifischer Grenzwerte	32
Abbildung 24 Beispielhafte Entwicklung CO ₂ -Emissionen für MFH nach Energiekonzept der Bundesregierung..	33
Abbildung 25 GWP und Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Sanierung MFH E	34
Abbildung 26 Einfluss zukünftige Energiebereitstellung am Beispiel Sanierung MFH E (2015/ 2050).....	35
Abbildung 27 Potenziale LCA in Leistungsphasen.....	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Typgebäude, Quelle: IWU 2015, Eble Messerschmidt Partner 2016	6
Tabelle 2: Betrachtete Systemgrenzen Neubau und Sanierung hinsichtlich Jahresgesamtkosten und Ökobilanz ..	9
Tabelle 3: Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens	11
Tabelle 4: Faktoren der Wirkungsindikatoren KEAne und GWP im Vergleich zu Primärenergie nach EnEV	15
Tabelle 5: Tabellarische Gegenüberstellung der Bewertungssysteme	27
Tabelle 6: Wohnfläche /Person der untersuchten Typgebäude	30
Tabelle 7: Aufwand/ Nutzen Betrachtung LCA am Beispiel EFH und MFH.....	39
Tabelle 8: Prozess Ökobilanz und Forschungsbedarf.....	39
Tabelle 9: bausoftwaretechnische Lösung – aktuelle Ansätze	41

Literaturverzeichnis

- BIM2LCA4IP (2019): BIM-basierte integrale Planung - Teilvorhaben: Integration von Ökobilanzierungswerkzeugen. Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart. Förderkennzeichen 03ET1466C. Verbundvorhaben 01175535/1–EnOB: BIM2LCA4IP. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Laufzeit 2017-2019
- BMI (2018): <http://www.nachhaltigesbauen.de/nachhaltige-wohngedaeude.html>, aufgerufen am 25.01.2018
- BMUB (2016): Stromspiegel für Deutschland 2016. April 2016
- BNB (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen, 24.02.2017
- DGNB (2010): MBV10-01 – Modernisierung Büro- und Verwaltungsgebäude. Version 2010
- DGNB Marktversion (2018): DGNB System: Kriterienkatalog Gebäude Neubau. Version 2018
- Diefenbach, N. et al. (2016): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2015, KfW Bankengruppe, IWU, Fraunhofer IFAM
- Eble Messerschmidt Partner, EGS-plan GmbH, IER Universität Stuttgart (2016): Energiekonzept & Empfehlungen zum städtebaulichen Wettbewerb Freiburg Dietenbach, Ökonomische Analyse und Bewertung baulich-energetischer Standards. April 2016
- EEG (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien, Stand 17.07.2017
- EPBD Update (2018): Energy Performance of Buildings Directive Update: Entwurf. Stand 25.01.2018
- EPD Beton (2013): Umwelt-Produktdeklaration Beton der Druckfestigkeitsklasse C 20/25. https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Wissen/Nachhaltigkeit/EPD_IZB_2013411_C20_25_D.pdf. abgerufen am 18.05.2018
- Fehrenbach, H. et al. (2017): Biomassekaskaden, Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. BMUB. Februar 2017
- Hinz, Eberhard (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Institut Wohnen und Umwelt. BMUB. August 2015
- Holzbau Deutschland (2017): Lagebericht. http://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Lagebericht_2017.pdf, abgerufen am 18.12.2017
- IER (2015) auf Basis der Studie Prognos, EWI, GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Basel – Köln – Osnabrück. Juni 2014
- IWU (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. 2. Auflage. Darmstadt
- Jahresmarktwert Solar (2015). <https://www.netztransparenz.de/EEG/Marktpraemie/Marktwerte>, aufgerufen am 18.08.2015
- KWKG Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (2012): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung
- MINERGIE (2018): Baustandard MINERGIE-ECO. <https://www.minergie.ch/de/zertifizieren/eco/>. aufgerufen am 20.03.2018
- Passivhaus Datenbank (2017): Passivhausprojekte. <http://www.passivhausprojekte.de/index.php>. aufgerufen am 21.11.2017
- Rogelj, J. et al. (2011): Emission pathways consistent with a 2 C global temperature limit. Nature Climate Change 1. 413-418

SIA (2011): SIA-Effizienzpfad Energie, SIA Merkblatt 2040

sirAdos-Baukostenberater (2015). Version 1.2.631. Stand 01.05.2015

Statista (2018a): Klimaziel in weiter Ferne: Treibhausgas-Emissionen in Deutschland (in Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente). <https://de.statista.com/infografik/2111/ausstoss-in-deutschland-in-millionen-tonnen-co2-aequivalente/>. aufgerufen am 15.05.2018

Statista (2018b): Einwohnerzahl - Anzahl der Einwohner von Deutschland von 1990 bis 2016 (in Millionen). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2861/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-deutschlands/>. aufgerufen am 15.05.2018

Statistisches Bundesamt (2015): Baugenehmigungen neuer Gebäude: Deutschland, Jahre, Gebäudeart, Energieverwendung, Energieart. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=CCA3A595480EC6ECCB95B9296FE9D67F.tomcat_GO_1_3?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1511344469205&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=31111-0008&auswahltext=%23Z-01.01.2016%2C01.01.2015&werteabruf=Werteabruf. aufgerufen am 21.11.2017

Statistisches Bundesamt (2017): Wohngebäude, Wohnungen, Wohnfläche: Deutschland, Stichtag, Anzahl der Wohnungen. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=92C123835267C56201DE1A3605D7E364.tomcat_GO_1_3?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1511968914606&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=31231-0001&auswahltext=%23Z-31.12.2016%2C31.12.2015%2C31.12.2014%2C31.12.2013%2C31.12.2012%2C31.12.2011%2C31.12.2010%2C31.12.2009&werteabruf=Werteabruf. aufgerufen am 29.11.2017

Solar Computer, Modul B55 Energieeffizienz EnEV 2014

TU Darmstadt (2009): Wohnwert Barometer: Bewertungssystem für Nachhaltige Wohnqualität. Darmstadt. Juni 2009

UBA (2017): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2016

UBA (2018): Wohnfläche pro Einwohner nahm zu. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#textpart-1>. aufgerufen am 09.04.2018

UBA (noch nicht veröffentlicht): Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus, FKZ 3715 41 111 0, Stand Februar 2019

VDI 2067 (2012): Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung. Blatt 1. September 2012