

Gesamtenergetische Nachhaltigkeitsbewertung von POROTON-Mehrfamilienhäusern im Niedrigstenergiegebäudestandard

FIW München:

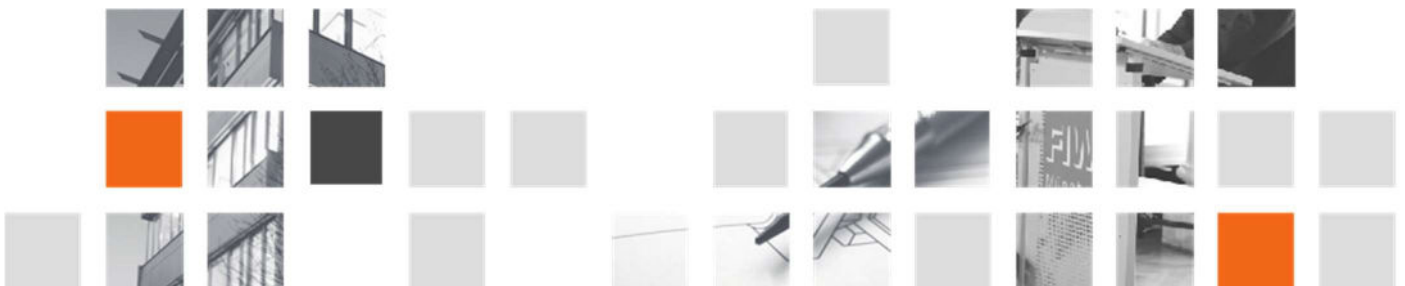
Andreas Holm
Christoph Sprengard
Wolfgang Schmidt
Christine Maderspacher

ITG Dresden:

Bert Oschatz
Jens Rosenkranz

Im Auftrag von:

Deutsche Poroton GmbH
Kochstraße 6-7
10969 Berlin



FIW München

Forschungsbericht FO-2020/04

FO-2020/04

Gesamtenergetische Nachhaltigkeitsbewertung von POROTON-Mehrfamilienhäusern im Niedrigstenergiegebäudestandard

Im Auftrag von:

Deutsche Poroton GmbH
Kochstraße 6-7
10969 Berlin

Der Bericht umfasst:

66 Seiten
0 Anlagen

Die Verantwortung für die Inhalte dieses Berichts liegt bei den Autoren.

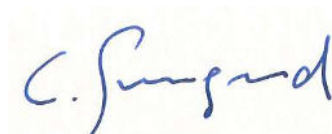
Gräfelfing, den 29. April 2021

Institutsleiter



Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm

Abteilungsleiter



Christoph Sprengard

Bearbeiter



Christine Maderspacher

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung und Handlungsempfehlungen	5
1.1	Varianten	5
1.2	Ökobilanzierung	6
1.3	Ergebnisse	7
1.4	Ausgewählte Ergebnisse mit Bewertung und Handlungsempfehlungen	10
1.4.1	Bewertung „Graue Energie“	10
1.4.2	Bauteile	10
1.4.3	Gebäudetechnik	11
2	Hintergrund und Motivation	12
3	Fragestellung und Herangehensweise	15
4	Grundlagen der Berechnungen	17
4.1	Typengebäude Mehrfamilienhaus (MFH)	17
4.2	Energetische Berechnungen	18
4.3	Exkurs: Gutschrift selbst erzeugten PV-Stroms	20
4.4	Lebenszyklusanalyse	21
4.4.1	Grundlagen der Ökobilanzierung	21
4.4.2	Definition Ziel und Untersuchungsrahmen	22
4.4.3	Sachbilanz	23
4.4.4	Wirkungsabschätzung	23
4.4.5	EPD Perlitgefüllte POROTON-Ziegel	24
4.4.6	Ansatz für Ökobilanzierung der Gebäudetechnik	24
4.4.7	Nutzungsdauern und Erneuerungszyklen	29
4.4.8	Auswertung	30
5	Varianten und Voruntersuchungen	31
5.1	Energetisches Niveau	31
5.1.1	Gebäude nach GEG	31
5.1.2	Effizienzhaus 55	32
5.1.3	Effizienzhaus 40	33
5.2	Gebäudetechnikvarianten	34
5.3	Berechnung Energiekennwerte	36
5.3.1	Transmissionswärmeverluste	36
5.3.2	Primärenergiebedarf	38
6	Ergebnisse der Ökobilanzierung	40
6.1	Herstellungsphase A1-A3	40
6.1.1	Auswertung nach Bauteilen	40
6.1.2	Auswertung nach Material	41
6.2	Ersatz B4 und Rückbau C3-C4 der Konstruktionen	42
6.3	Ökobilanzierung der Gebäudetechnik	44

6.4	Herstellung des gesamten Gebäudes	45
6.5	Betrieb B6	47
6.6	Auswertung der Ergebnisse über den gesamten Lebenszyklus	48
6.7	Einfluss der angesetzten Lebensdauer des Gebäudes	50
6.8	Zukunftsszenario – Einfluss Primärenergiefaktoren	53
7	Fazit und Handlungsempfehlungen	57
8	Abkürzungsverzeichnis / Glossar	59
9	Tabellenverzeichnis	60
10	Abbildungsverzeichnis	61
11	Literatur	63

1 Kurzfassung und Handlungsempfehlungen

Im Rahmen dieser Studie werden die Graue Energie sowie die Treibhausgasemissionen von Mehrfamilienhäusern (MFH) in monolithischer Ziegelbauweise in Abhängigkeit des energetischen Niveaus und der gebäudetechnischen Ausrüstung untersucht. Hierfür werden die Berechnungen anhand eines konkreten Gebäudes durchgeführt, welches repräsentativ für einen heutigen Neubau ist. Dieses Gebäude dient als Grundlage für die Ökobilanzierung und die energetische Berechnung des Heizwärmebedarfs. Als Beispielgebäude wurde das Typen-MFH der ARGE Kiel (Walberg et al. 2014) verwendet. In diesem Gebäude verteilen sich 12 Wohneinheiten auf 5 Geschosse und 1.064 m² Nutzfläche. Das Gebäude wird in massiver Bauweise ausgeführt. Die Außenwände bestehen aus einer monolithischen Konstruktion perlitgefüllter Ziegel. Zusätzliche Dämmschichten sind nicht erforderlich.

1.1 Varianten

Für eine Aussage zum Einfluss des energetischen Niveaus und der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) eines Gebäudes auf die Nachhaltigkeitsbewertung über den Lebenszyklus werden drei verschiedenen energetische Niveaus (GEG, EH 55 und EH 40), sowie 6 unterschiedliche Technikvarianten untersucht. Daraus ergeben sich insgesamt 18 Kombinationen. Die Varianten sind in den nachfolgenden Tabellen kurz zusammengefasst. Die Dimensionierung der Gebäudehülle erfolgte unter der Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen an den spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlust H_T' .

Tabelle 1: Anforderungen und Dimensionierung der Gebäudehülle

Effizienzhausstandard		GEG	EH 55	EH 40
Anforderungen	% von H_T' des Referenzgeb.	100	70	55
	% von Q_P' des Referenzgeb.	75	55	40
Dimensionierung Bauteile	Außenwand	S9-365, 36,5 cm 2 cm Kalk-Zement-Faserleichtputz $U=0,23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	S8-365, 36,5 cm 2,5 cm Kalk-Zem.-Faserleichtputz $U=0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	S8-425, 42,5 cm 2 cm Kalk-Zement-Faserleichtputz $U=0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	Flachdach	14 cm MiWo $U=0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	24 cm MiWo $U=0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	30 cm MiWo $U=0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	Fenster	$U_w=1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$U_w=0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$U_w=0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	Bodenplatte	8 cm XPS 4 cm EPS $U=0,27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	8 cm XPS 8 cm EPS $U=0,21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	10 cm XPS 8 cm EPS $U=0,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	Kellerdecke	8 cm MiWo 4 cm EPS $U=0,26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	8 cm MiWo 8 cm EPS $U=0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	10 cm MiWo 8 cm EPS $U=0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Tabelle 2: Zusammenfassung der untersuchten Gebäudetechnikvarianten

Var.	Wärmeerzeugung	Zusatz	Lüftung
V.1	Gasbrennwertkessel	Solarthermie	Abluftanlage
V.2	Gasbrennwertkessel	Solarthermie	Zu- und Abluftanlage mit WRG
V.3	Fernwärme	-	Abluftanlage
V.4	Fernwärme	-	Zu- und Abluftanlage mit WRG
V.5	Luft-Wasser WP	-	Abluftanlage
V.6	Luft-Wasser WP	PV Anlage	Abluftanlage

1.2 Ökobilanzierung

Mit einer Ökobilanzierung werden verschiedene Umweltauswirkungen für das Beispielgebäude über den gesamten Lebenszyklus berechnet – angefangen bei der Herstellung über die Instandhaltung und den Betrieb bis zum Rückbau und der Entsorgung. Als Grundlage dient dazu eine detaillierte Massenberechnung auf Basis der Gebäudepläne sowie die Umwelt-Produkt-Deklaration für die verwendeten Materialien und Komponenten.

Als typische Ergebnisgrößen wird dabei die „**Graue Energie**“ verwendet (s.a. Abschnitt 4.4.4). Sie wird auch als kumulierter, nicht-erneuerbarer Energieaufwand bezeichnet (kurz PENRT).

Als zweite elementare Kenngröße dient das **Global Warming Potential** (Globales Erderwärmungspotential, kurz **GWP**). Sie ist eine Maßzahl für den relativen Beitrag zum Treibhauseffekt und gibt an, wie viel einer bestimmten Masse eines Treibhausgases im Vergleich zur gleichen Masse CO₂ zur globalen Erwärmung beiträgt. Die Kenngröße GWP wird in kg CO₂-Äq. angegeben.

Für eine vollständige Nachhaltigkeitsbetrachtung nach verschiedenen Bewertungssystemen für das Nachhaltige Bauen wären eine Vielzahl weiterer Kriterien (u.a. auch zum Standort eines konkreten Gebäudes) zu berücksichtigen und zu bewerten. Auch zur Sicherstellung der Funktionstauglichkeit müssen Anforderungen aus Bauphysik, Brandschutz und Schallschutz unbedingt eingehalten werden. Diese Auswertung beschränkt sich jedoch auf GWP und Graue Energie, sowie die energetische Betrachtung nach GEG.

1.3 Ergebnisse

Bei der Erstellung der Ökobilanz wurden die Phasen Herstellung A1–A3, Ersatz B4, Betrieb B6, sowie der Rückbau C3 & C4 nach (DIN EN 15804:2020-03)(DIN EN 15804:2020-03) berücksichtigt. Nachfolgend werden exemplarisch ausgewählte Ergebnisse für die Graue Energie (Primärenergie nicht erneuerbar für die Herstellung A1-A3) vorgestellt. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse für die Erstellung des Gebäudes links nach Bauteilen, rechts nach Materialien gegliedert. Der größte Anteil entfällt dabei auf die Innenbauteile, also Zwischendecken und Innenwände. Die Werte sind über die drei untersuchten Varianten gleich. Der Anteil für die POROTON-Ziegel für die Außenwandkonstruktion liegt in allen drei Varianten bei etwa 20 %.

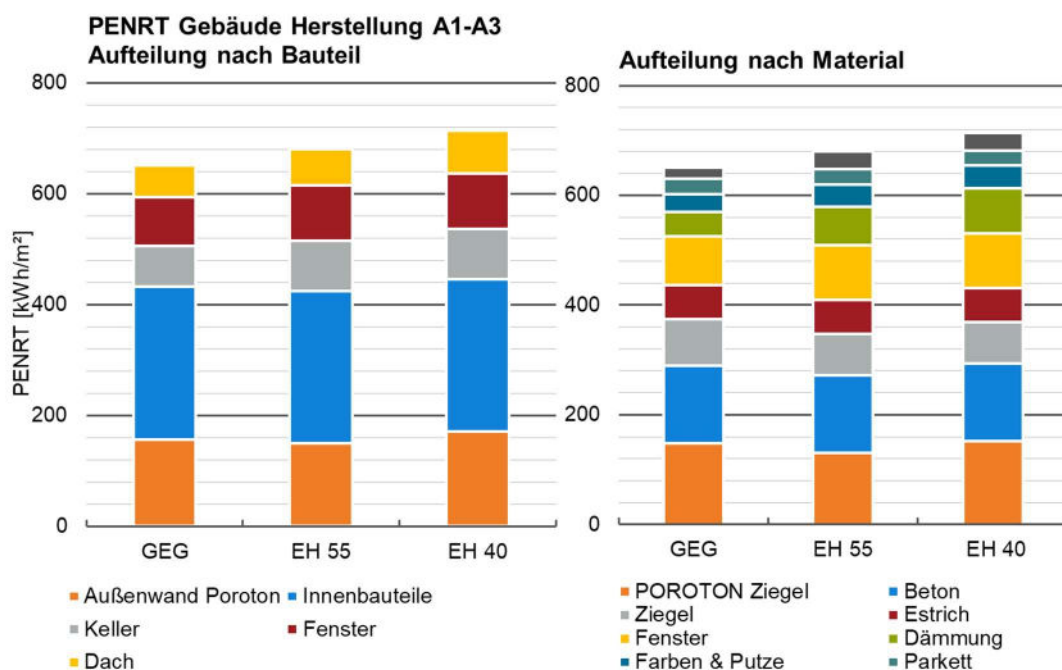


Abbildung 1: Vergleich der Grauen Energie nach Bauteilen und Material

Für eine Bewertung des gesamten Lebenszyklus müssen neben der Herstellung des Gebäudes auch die Gebäudetechnik, die notwendigen Erneuerungen sowie der Betrieb berücksichtigt werden. In Abbildung 2 sind diese Werte pro m² Nutzfläche und Jahr für eine Lebensdauer von 50 Jahren und in Abbildung 3 für 80 Jahre für alle Varianten dargestellt. Bei dieser Auswertung kann man erkennen, dass mit Ausnahme der V.6, die Gebäudetechnik eine eher untergeordnete Rolle bei der Grauen Energie besitzt. Die erhöhten Werte in V.6 sind auf die PV-Anlage zurückzuführen. Durch diese können jedoch jährliche Gutschriften erzielt werden, welche die „Aufwendungen“ für die Anlage deutlich übersteigen.

Die Auswertung zeigt außerdem, dass der Betrieb in allen Varianten für den größten Anteil der jährlichen Primärenergie verantwortlich ist. Dieser liegt zwischen 75 % beim GEG-Gebäude mit Gasbrennwertkessel und Abluftanlage (V.1) und 56 % für ein EH

40 mit Fernwärmeversorgung und Lüftungsanlage mit WRG (V.4). Die positiven Auswirkungen einer gut gedämmten Gebäudehülle zeigen sich beim Vergleich der Ergebnisse innerhalb derselben Technikvariante. So sinken beispielsweise die absoluten Werte für den Betrieb in der Variante 1 von 63,0 für das GEG über 51,1 beim EH-55 auf 44,0 kWh/(m²·a) beim EH-40-Gebäude (Abbildung 2).

Im Gegenzug steigen die „Aufwendungen“ des Gebäudes für die Erstellung und den Ersatz von 18,2, über 19,3 auf 20,3 kWh/(m²·a) vom GEG- über den EH-55- zum EH-40- Standard. Das bedeutet, dass durch die zusätzliche Graue Energie zur Erreichung des höchsten hier betrachteten Dämmstandards von total 2,1 kWh/(m²·a) Einsparungen im Betrieb von 19,0 kWh/(m²·a) erzielt werden können.

Beim direkten Vergleich der beiden Abbildungen kann man den positiven Effekt der längeren Nutzungsdauer von 80 Jahren gut erkennen. Der Anteil des Gebäudes und der Technik an der jährlichen Primärenergie sinkt. Der Betrieb bleibt bei der Erhöhung der Nutzungsdauer jedoch unverändert. Durch die Erhöhung der Nutzungsdauer sind jährliche Einsparungen der Primärenergie nicht erneuerbar zwischen 6-14 % möglich. Die Auswertungen des GWP stellt sich ähnlich dar (s. Kapitel 6.6).

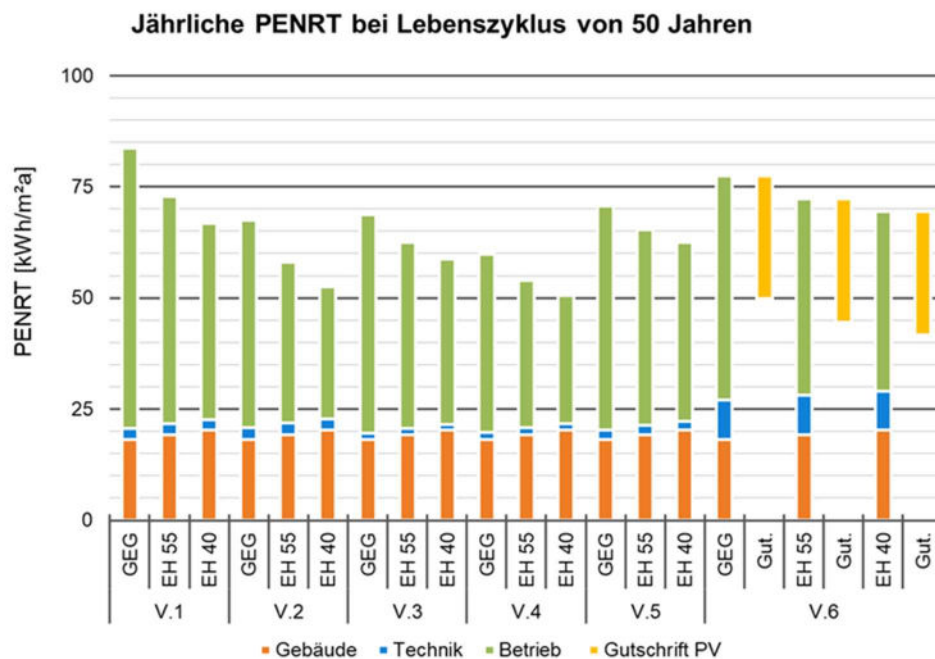


Abbildung 2: PENRT über den gesamten Lebenszyklus pro m² Nutzfläche für 50 Jahre Nutzungsdauer

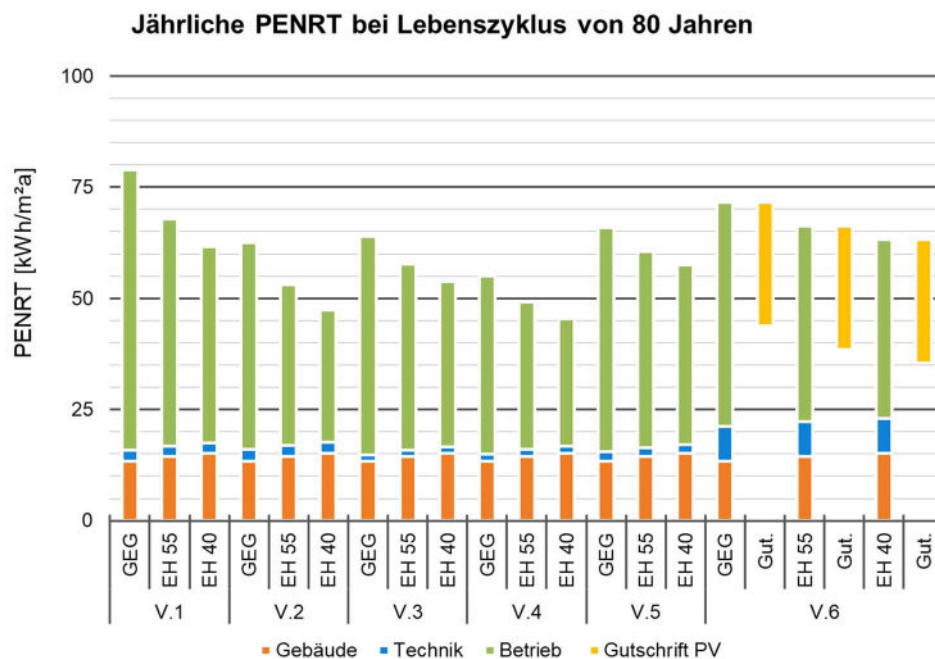


Abbildung 3: PENRT über den gesamten Lebenszyklus pro m² Nutzfläche für 80 Jahre Nutzungsdauer

1.4 Ausgewählte Ergebnisse mit Bewertung und Handlungsempfehlungen

Guter Wärmeschutz und effiziente Anlagentechnik sind nachhaltig und ökologisch sinnvoll. Die im Betrieb realisierte Energieeinsparung durch die heutigen zur Ausführung kommenden POROTON Außenwandziegel in Verbindung mit effizienter Anlagentechnik, zahlt sich über den Lebenszyklus, deutlich gegenüber den zusätzlichen Aufwendungen von Grauer Energie aus.

1.4.1 Bewertung „Graue Energie“

Graue Energie versus Wärmeschutz

Die Berücksichtigung der Grauen Energie bei der Planung von Gebäuden ist sinnvoll und aus Sicht der Nachhaltigkeit geboten. Dabei sollte die Graue Energie jedoch nicht gegen einen guten Wärmeschutz ausgespielt werden.

Graue Energie, Bewertung Planungsaufwand

Eine zu detaillierte Berücksichtigung der Grauen Energie beim Nachweis nach GEG würde den Planungsaufwand deutlich erhöhen und sollte daher vermieden werden. Aus Sicht der Bearbeitenden ist eine einfache pauschale Berücksichtigung über die Bauweise, die eingesetzte Anlagentechnik und das Wärmeschutzniveau ausreichend.

Graue Energie, sinnvolle Bewertungsansätze

Eine Berücksichtigung der Grauen Energie in den Förderrichtlinien (z.B. bei der KfW) setzt Anreize für die Reduzierung der Umweltwirkungen. Dabei sollte das gesamte Gebäude betrachtet werden und nicht nur die Außenbauteile.

1.4.2 Bauteile

Innenbauteile

Innenbauteile, wie z. B. die Betondecken, haben zusammen mit dem Keller, etwa einen doppelt so großen Anteil an der gesamten Grauen Energie, wie die Außenwände aus POROTON Ziegeln. Hier liegt auch der größten Hebel für die Reduzierung der Grauen Energie und des GWP in Gebäuden.

Fenster

Fenster haben im Vergleich zu ihrer Fläche den höchsten Anteil an Grauer Energie unter den Bauteilen.

Wärmebrücken

Der Mehraufwand für die Planung und Optimierung der Bauteilanschlüsse hinsichtlich ihrer Wärmebrückenwirkung lohnt sich. Die mit dem detaillierten Nachweis möglichen Wärmebrückenzuschläge liegen u.U. deutlich unter den möglichen Pauschalwerten für die Berücksichtigung nach GEG und KfW Informationsblatt.

1.4.3 Gebäudetechnik

Gebäudetechnik/Anlagen allgemein (mit Ausnahme der PV Anlage)

Der Anteil der Gebäudetechnik an der Grauen Energie ist im Kontext des gesamten Gebäudes gering. Mehraufwendungen zur Effizienzsteigerung und Einsparungen, z.B. Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG gegenüber einer Abluftanlage, zahlen sich durch die damit erzielten Einsparungen im Betrieb, aus energetischer Sicht, sehr schnell aus.

PV Anlage

Der erhöhte Aufwand an Grauer Energie für die Herstellung von PV- Anlagen wird durch die erzielten Gutschriften schnell kompensiert. Der Einsatz von PV in sehr energieeffizienten Gebäuden ist sinnvoll und nachhaltig.

2 Hintergrund und Motivation

Effizienzsteigerungen, Energieeinsparungen und die Nutzung regenerativer Energien sind die wesentlichen Bausteine der nationalen und internationalen Klimaschutzpolitik zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Gebäudesektor. Entsprechend stiegen die gesetzlichen Anforderungen an den energetischen Standard von neu zu errichtenden Gebäuden in der Vergangenheit kontinuierlich an, etwa durch die Verschärfung der Energieeinsparverordnungen (EnEV) bzw. das Gebäudeenergiegesetz (GEG) und die sich daraus ableitenden Förderbedingungen. Wesentliche Zielsetzung ist dabei die Reduktion des nicht erneuerbare Primärenergiebedarfs von Gebäuden während ihrer Nutzungsphase.

Dabei sind vor allem die Transmissionswärmeverluste durch die Außenbauteile und die Lüftungswärmeverluste wesentlich zurückgegangen (s.a. Abbildung 4). Der mittlere Endenergiebedarf von Wohngebäuden lag vor der ersten Wärmeschutzverordnung noch bei weit über 200 kWh/(m²·a) und liegt für energieeffiziente Neubauten heutzutage bei weniger als 40 kWh/(m²·a). Das resultiert aus deutlich energieeffizienteren Materialien für die Gebäudehülle, beispielsweise hochwärmedämmenden Ziegeln, sowie aus einer verbesserten Dämmung der Dächer und Kellerdecken, sowie deutlich effizienteren Fenstern und einer verbesserten Luftdichtheit.

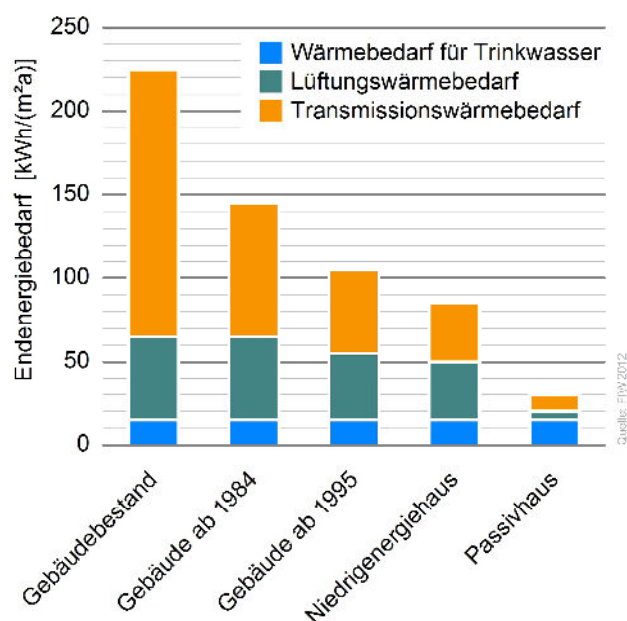


Abbildung 4: Entwicklung des Energiesparenden Bauens in Deutschland und Anteile an den Wärmeverlusten – mittlerer Endenergiebedarf typischer EFH-Wohngebäude

Für Deutschland sieht das Energiekonzept der Bundesregierung (BMWi 2010) einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis zum Jahre 2050 vor. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, soll der Wärmebedarf von Gebäuden bis 2020 um 20 % und der Primärenergiebedarf bis 2050 um 80 % gegenüber 2008 gesenkt werden. Dazu soll die Sanierungsrate von jährlich 1 % auf 2 % erhöht werden. Die klimapolitischen Zielsetzungen für künftige Neubauten erfordern einen energetischen Standard, der

den Anforderungen an ein Niedrigstenergie-Gebäude gemäß EU-Richtlinien entsprechen muss.

Daneben haben Gebäude und Anlagen natürlich auch weitere große Umweltwirkungen für ihre Errichtung, Wartung und Entsorgung, sowie einen starken Einfluss auf viele Sektoren der Wirtschaft, auf Arbeitsplätze und die Lebensqualität der Bewohner. Dabei beanspruchen sie große Mengen an Ressourcen und Energie, beispielsweise sind sie verantwortlich für weltweit etwa 50 % des aus der Umwelt entnommenen Materials und der Bausektor allein verantwortet 35 % des in der EU erzeugten Abfalls (Eurostat 2016). Auch wenn die mineralischen Wertstoffe im Baubereich bereits zum überwiegenden Anteil (bis zu 90 %) recycelt werden, sind die Treibhausgasemissionen, die mit der Entnahme des Materials, der Herstellung von Baustoffen und Bauelementen, der Errichtung von Gebäuden und deren Renovierung zusammenhängen für schätzungsweise 5 – 12 % der jährlichen THG-Emissionen verantwortlich (Hertwich et al. 2020).

Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Gesellschaft und einem klimaneutralen Gebäudebestand gilt es daher einerseits die Umweltwirkungen, die mit der Errichtung von Gebäuden verbunden sind, und die Emissionen aus dem Betrieb andererseits zu minimieren. Dabei haben sich durch die Verbesserung beim Primärenergiebedarf für Beheizung und Warmwasserversorgung im Gebäudebereich die Anteile von Herstellung und Nutzung verschoben. Der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung, Errichtung und Entsorgung der Bauteile und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen (GWP) haben gegenüber der Nutzungsphase an Bedeutung gewonnen. Dadurch, dass der Primärenergiebedarf für den Betrieb immer geringer geworden ist, steigt der Anteil der Grauen Energie im Verhältnis zu den Primärenergiebedarfen für Nutzerstrom und Betrieb stetig an. Abbildung 5 zeigt qualitativ diese Entwicklung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes im Laufe der Zeit.

Dabei wird deutlich, dass der Primärenergiebedarf insgesamt sehr deutlich abgenommen hat, die absoluten Anteile für Nutzerstrom und Errichtung sich wenig verändert haben und der Anteil des Betriebs überproportional zurückgegangen ist. Diese qualitativen Feststellungen wurden für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ermittelt, sie stellen sich für eine längere Nutzungsdauer von beispielsweise 80 oder 100 Jahren, wie sie für massive Gebäude nicht unüblich ist, sogar noch günstiger dar. In diesem Fall steigt die Bedeutung des Betriebs während der Anteil der Errichtung weiter zurückgeht, da die Erstellung und Erneuerungen über einen größeren Zeitraum verteilt werden.

Primärenergiebedarf für Gebäude erbaut um ...

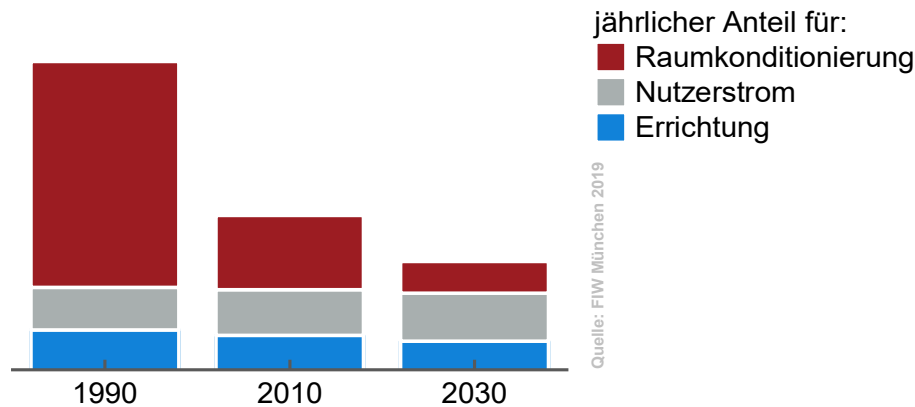


Abbildung 5: Qualitative Darstellung der Entwicklung des Primärenergiebedarfs eines typischen Gebäudes im Laufe der Zeit. Dargestellt sind die absoluten Anteile für Nutzerstrom, Raumwärme inklusive Warmwassererzeugung, sowie der Primärenergieeinsatz des Gebäudes für die Herstellungsphase der verwendeten Bauprodukte.

Diesem Aspekt trägt der Klimaschutzplan der Bundesregierung Rechnung (BMU 2017). Darin wird der Einsatz nachhaltiger Bau- und Dämmstoffe gestärkt. Dabei sollen auch vor- und nachgelagerte Klimaschutzaspekte – also Emissionen, die bei der Herstellung, der Verarbeitung, der Entsorgung oder der Wiederverwertung von Baustoffen entstehen – auf Basis frei verfügbarer Ökobilanzdaten berücksichtigt werden. Außerdem sollen Instrumente zur stärkeren Einbeziehung des gesamten Lebenszyklus („Cradle to Grave“ oder „Cradle to Cradle“) von Baumaterialien überprüft und stärker in die Praxis der Bauplanung mit einbezogen werden. Dazu soll das Gebäudeenergiegesetz (GEG) überarbeitet werden und zukünftig den gesetzlichen Rahmen definieren. Dabei betont der Gesetzgeber schon jetzt die Wichtigkeit einer möglichst langen Nutzungszeit von Gebäuden.

Das bedeutet aber in der praktischen Konsequenz, dass die von vielen heute schon häufig beklagte, hohe Komplexität bei der energetischen Bewertung von Gebäuden um weitere relevante Phasen im Lebenszyklus von Gebäuden erweitert werden muss. Erst eine Ausweitung der Bilanzgrenzen erlaubt mit jeder Stufe eine vollständigere Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäudekonzepten. Verbesserungen, die zur Einsparung von Energie führen sollen, sind meist mit einem höheren Materialeinsatz und damit auch einem höheren Input an Grauer Energie und einem erhöhten GWP verbunden. Das bedeutet, dass beispielsweise neben dem Vergleich der Kennwerte für verschiedene Außenwandkonstruktionen auch der primärenergetische Mehraufwand und die Treibhausgasemissionen zu bewerten sind, die durch höhere Anforderungen an die Energieeffizienz der Gebäudehülle entstehen und damit auch ob sich der Aufwand dafür in der Langzeitbetrachtung lohnt.

3 Fragestellung und Herangehensweise

Die für die Herstellung der Baumaterialien und die Errichtung eines Gebäudes notwendige Energie (Graue Energie) und die während dieser Prozesse freiwerdenden Treibhausgasemissionen werden aktuell in den Verordnungen noch nicht berücksichtigt. Für eine ganzheitliche Bewertung der Nachhaltigkeit eines Gebäudes ist jedoch die Bewertung der Betriebsphase, wie es aktuell der Fall ist, nicht ausreichend. Hinzu kommt, dass mit immer effizienterer Gebäudetechnik und wachsendem Anteil erneuerbarer Energien die Bedeutung der Grauen Energie für die Erstellung des Gebäudes immer weiter zunimmt. In diesem Zusammenhang stellen sich folgende Fragen:

- Inwieweit beeinflusst das energetische Niveau die Graue Energie eines Gebäudes?
- Welche Komponenten tragen maßgeblich zu einer hohen Grauen Energie bei? Welche Optimierungspotentiale ergeben sich daraus?
- Zahlen sich Mehraufwendungen in die energetische Qualität der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik zur Reduzierung des Betriebs hinsichtlich einer energetischen Bilanzierung über die Lebensdauer eines Gebäudes aus?
- Welche Folgerungen hinsichtlich künftiger energetischer Standards, Anforderungen und Bewertungsmethoden lassen sich daraus ableiten?

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Studie eine umfassende Variantenstudie mit detaillierter Ökobilanzierung anhand eines beispielhaften Mehrfamilienhauses durchgeführt werden. Das Vorgehen im Rahmen der Studie ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

Alle Berechnungen werden anhand eines Typengebäudes, welches eine für Deutschland typische Größe und Kubatur aufweist, durchgeführt. Die Geometrie dieses Gebäudes dient sowohl als Grundlage für die energetischen Berechnungen als auch für die Massenermittlung der Ökobilanz. Zunächst werden die energetischen Berechnungen durchgeführt. Es werden insgesamt drei verschiedene energetische Niveaus betrachtet. Daher werden die U-Werte der Bauteile derart variiert, dass die Gebäudehülle den Anforderungen nach GEG, EH 55 und EH 40 entspricht. Die Dimensionierung der Bauteile dient wiederum als Grundlage für die Ökobilanzierung.

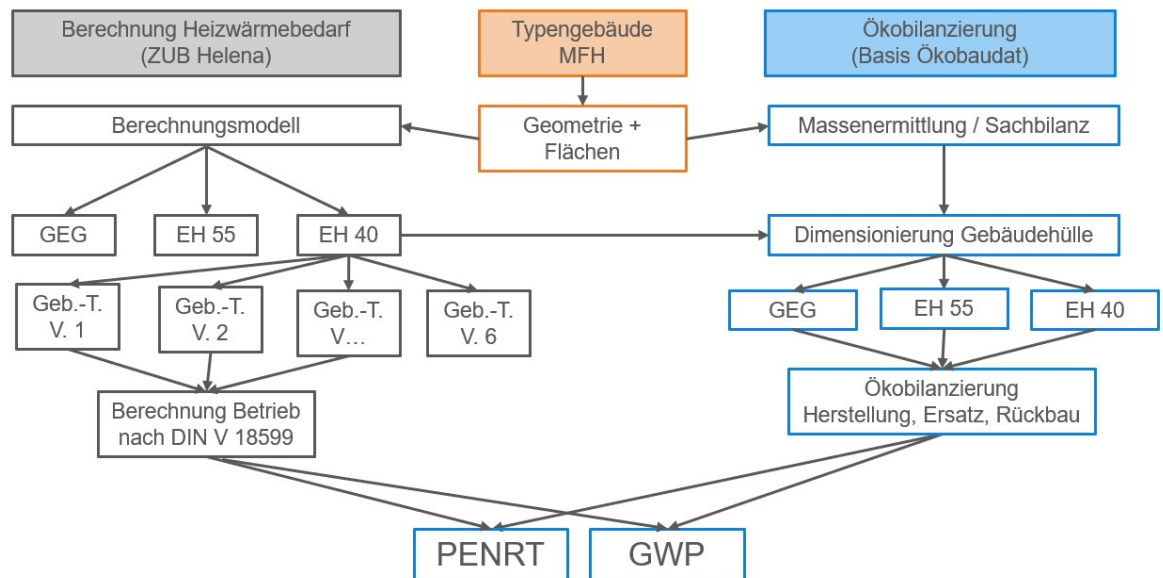


Abbildung 6: Schematisches Vorgehen im Rahmen der Studie

Neben der Variation des energetischen Standards, sollen jeweils noch sechs verschiedene Technikkonzepte betrachtet werden. Daraus ergeben sich insgesamt 18 Kombinationen aus Gebäudehülle und Gebäudetechnik, für die anhand einer energetischen Bilanzierung nach (DIN V 18599:2018-09) der Wärme- und Endenergiebedarf errechnet wird. Letzterer wird mit entsprechenden Faktoren auf die jährliche Primärenergie (nicht erneuerbarer Anteil, PENRT) und Treibhausgasemissionen (GWP) umgerechnet und bildet die Betriebsphase des Gebäudes ab.

Die Ökobilanzierung erfolgt parallel anhand der zuvor definierten Gebäudehülle und anlagentechnischen Ausstattung. Die Umweltauswirkungen der Bauteile mit ihren einzelnen Schichten werden mit Hilfe von Umweltproduktdeklarationen der jeweiligen Materialien berechnet. Neben den Kennwerten für die erstmalige Erstellung, werden die Lebensdauern und die daraus resultierenden Erneuerungszyklen für alle anlagentechnischen Komponenten und Bauteilschichten berücksichtigt. Hierbei werden 50 und 80 Jahre als Grenzen für die Lebenszyklusbetrachtung berücksichtigt.

So lassen sich für alle genannten Varianten der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus bestimmen. Mit diesen Ergebnissen lassen sich die zu Beginn gestellten Fragen beantworten und konkrete Handlungsempfehlungen ableiten.

4 Grundlagen der Berechnungen

4.1 Typengebäude Mehrfamilienhaus (MFH)

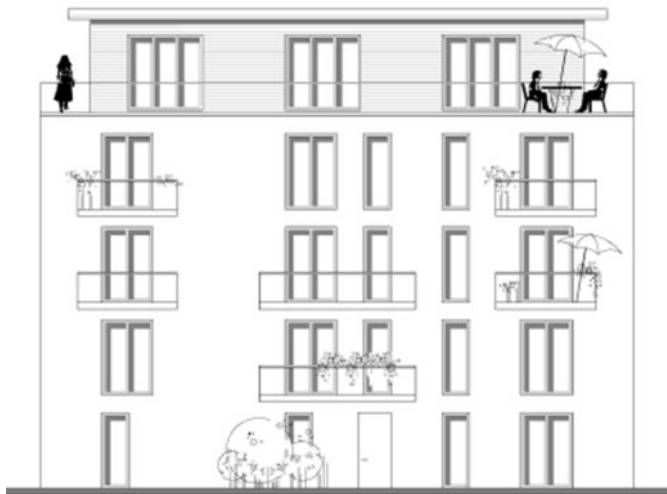
Die Berechnungen finden an einem Gebäudemodell statt, das sich am Typenhaus einer Studie der ARGE Kiel orientiert (Walberg et al. 2017). Das Typenhaus wurde auf der Grundlage von Statistiken und Marktbeobachtungen für einen optimierten Wohnungsbau in der derzeitigen Wohnpraxis entworfen. Das hier untersuchte Gebäudemodell stellt ein neugebautes, freistehendes kleines bis mittleres Mehrfamilienhaus dar, das eine Nutzfläche von 1.064 m^2 , verteilt auf 5 Wohngeschosse besitzt. Das beheizte Volumen liegt bei 3.325 m^3 und die thermisch relevante Gebäudehülle weist eine Fläche von 1.335 m^2 auf. Somit ergibt sich ein Flächen-zu-Volumen-Verhältnis von 0,40 (s.a. Abbildung 7).

Zur Optimierung der Wohnungsflächengröße ist das Mehrfamilienhaus als Punkthaus ausgeführt, in dem die Wohneinheiten über ein zentrales Treppenhaus erschlossen werden. Das Treppenhaus liegt innerhalb der thermischen Hülle und ist vollflächig mit einer Glasfassade versehen. Die Außenwände des 5. OG sind im Vergleich zu den Geschossen darunter nach innen versetzt. Dadurch entsteht durch das Flachdach auf dem 4. OG eine Terrasse, die das 5. OG umschließt. Die Bodenplatte im EG ist zu 60 % unterkellert und zu 40 % gegen Erdreich ausgeführt. Der unbeheizte Keller und die Geschossdecken sind in Stahlbeton-Bauweise ausgeführt und bleiben für alle Varianten gleich. Tragende Innenwände bestehen aus Ziegelmauerwerk mit einer für Innenwände typischen Dicke. Die Ausführung des Flachdaches, der monolithischen Außenwände, der Fenster und der Bodenplatten zum Erdreich und zum unbeheizten Keller wird je nach Effizienzhausstandard variiert.

Neben der Variation der Gebäudehülle wird die Anlagentechnik zwischen einem Gas-Brennwert Kessel, einem Fernwärmeanschluss und einer Luft-Wasser-Wärmepumpe variiert und die Zusammenwirkung untersucht. Die Wohnräume des Gebäudes werden nach dem aktuellen Stand der Technik über eine Fußbodenheizung beheizt. Bei den hier beispielhaft untersuchten anlagentechnischen Varianten wird zwischen zwei Ausführungen der Lüftung unterschieden – je nach Variante wird entweder von wohnungsweisen Zu- und Abluftanlagen (Wohnungslüftungsgeräte) mit Wärmerückgewinnung oder von gebäudezentralen Abluftanlagen ausgegangen.

Tabelle 3: Daten des Gebäudemodells in Anlehnung an das Typengebäude

Stand des Gebäudes	Neubau
Gebäudeart	Freistehendes Mehrfamilienhaus
Vollgeschosse	5
Wohneinheiten	12
Keller	Teilweise unterkellert, Keller unbeheizt
Nutzfläche	1064 m ²
Beheiztes Volumen	3325 m ³
Wärmeübertragende Hüllfläche	1335 m ²

**Abbildung 7: Ansicht des Typengebäudes**

4.2 Energetische Berechnungen

Die energetische Bewertung des betrachteten Gebäudes wird anhand von End- und Primärenergie durchgeführt. Zur Berechnung der Energiebedarfe und der sich daraus ableitenden weiteren Betrachtungsgrößen wird das Berechnungsverfahren entsprechend der DIN V 18599 verwendet, was im verwendeten Berechnungsprogramm auf der Normversion der DIN V 18599 aus dem Jahr 2011 beruht (DIN V 18599:2011)¹.

¹ Zu Berechnungsbeginn dieser Studie hatte die Software noch den Stand EnEV / DIN V 18599:2011-12. Die Umstellung der Energieberatungsprogramme auf GEG und neue DIN V 18599 ist zwar seit Ende 2020 im Gange, aber auch jetzt noch nicht gänzlich für alle größeren Programme abgeschlossen. Nach GEG / DIN V 18599:2018-09 sind keine grundlegend anderen Ergebnisse zu erwarten. Die hier gezeigten Tendenzen bleiben dieselben.

Die Berechnungen erfolgen mit der Software „ZUB-Helena“ (letzte verwendete Version 7.83). Die Eingaben beruhen auf der gegebenen Gebäudegeometrie des Typenhauses, den aus dem GEG abgeleiteten bauphysikalischen Eigenschaften, den angesetzten Anlagenvarianten und den klimatischen und nutzungsspezifischen Rahmenbedingungen entsprechend den Vorgaben der DIN V 18599:2011. Demnach erfolgt je nach Ausführung der thermischen Gebäudehülle und anlagentechnischer Ausstattung die Bilanzierung von Heizung, Lüftung und Trinkwarmwasser.

Im Detail wird bei der energetischen Berechnung zunächst die Geometrie des Typengebäudes eingegeben und ein Referenzgebäude auf Basis des GEG 2020 mit den entsprechenden Kennwerten zum Transmissionswärmeverlust und dem Primärenergiebedarf erzeugt. Anhand dieser Referenzwerte und der Grenzwerte der Standards ergeben sich die Zielwerte, die als Grundlage bei der Dimensionierung der Gebäudehülle und der Anlagentechnik verwendet werden.

Entsprechend des Untersuchungsschwerpunktes werden als vorgegebene Konstante bei der Auslegung der Konstruktionen und Materialien der Gebäudehülle die Außenwände in monolithischer Bauweise festgelegt. Hierbei wird als Material ein mit Dämmstoff gefüllter Hochlochziegel verwendet. Die Auswahl und wärmetechnische Dimensionierung der gefüllten Ziegel erfolgten in Absprache mit dem Auftraggeber. Zur Vereinfachung des Rechenmodells werden die Aufbauten der Bauteile auf die thermisch relevanten Schichten der Konstruktionen reduziert. So wird zum Beispiel bei einer Bodenplatte auf den Bodenbelag oder bei einer Wand auf die Farbe verzichtet. Zusätzlich ist zu Vereinfachung festgelegt, dass bei einer notwendigen Dämmschicht grundsätzlich nur Material mit einer WLГ von 035 verwendet wird. Die Vereinfachungen betreffen nur die energetischen Berechnungen – für die Zusammenstellungen zur Grauen Energie und GWP werden alle Bauteilschichten und Materialien berücksichtigt.

Für alle Varianten gleich ist der Aufbau der Kellerbodenplatte zum Erdreich, der Kellerwände zum Erdreich und der Geschossdecken aus Stahlbeton. Der Stahlbetonkern besitzt eine Stärke von 250 mm bei den erdberührenden Bodenplatten und 200 mm bei den Kellerwänden, Geschossdecken und dem Flachdach. Der unbeheizte Keller ist mit einer Perimeterdämmung versehen und über das beheizte Treppenhaus zugänglich. Der Keller befindet sich nicht in der thermischen Gebäudehülle und auch die tragenden monolithischen Innenwände und Stahlbetongeschossdecken haben keine Auswirkung auf die thermische Bilanz des Modellgebäudes. Bei dem Gebäudemodell wird nur eine Bilanzierungszone, mit einer täglichen Nutzungsdauer von 24 h und, sofern erforderlich, einem Heizungsbetrieb zwischen 6 und 23 Uhr betrachtet. Die Gebäudehülle wird als dicht angesehen und ein Luftdichtheitstest vorausgesetzt (Kategorie I: $n_{50} = 2 \text{ h}^{-1}$ ohne raumluftechnische Anlage bzw. $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ mit raumluftechnischer Anlage).

Davon ausgehend werden die verbleibenden Bauteile der Gebäudehülle iterativ konstruiert und berechnet, bis die Vorgaben des jeweils angestrebten energetischen Standards eingehalten werden. Als Anhaltspunkte bei der iterativen Auslegung der

Konstruktionen dienen Erfahrungswerte über die im Baubereich üblicherweise verwendeten Materialien und Materialstärken. Der Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion wird iterativ mit der Fläche der Gebäudehülle, in der die Konstruktion verwendet wird, und dem Temperaturkorrekturfaktoren zur Ermittlung des Transmissionswärmeverlustes verrechnet. Die Auslegung der Bauteilflächen und der Temperaturfaktoren erfolgt nach DIN V 18599.

Entspricht nach Festlegung der U-Werte für die Bauteile der spezifische Transmissionswärmeverlustkoeffizient den Anforderungen des Standards, so wird anschließend die Anlagentechnik eingegeben. Hierbei werden als Wärmeerzeuger Erdgas, Fernwärme erzeugt aus überwiegend fossilen Brennstoffen oder eine Luft-Wasser-Wärmepumpe als Varianten jeweils nur mit einer Abluftanlage und mit einer Zu- und Abluftanlage mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von 80 % untersucht. Bei den Varianten mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe wird auf den Vergleich der unterschiedlich ausgeführten Lüftungsanlagen verzichtet und stattdessen der Einsatz einer zusätzlichen PV-Anlage untersucht. Zusammen mit der Anlagentechnik ergibt sich für das Modellgebäude ein Endenergiebedarf, der mit den festgelegten Primärenergiefaktoren je Energieträger zum Primärenergiebedarf verrechnet wird.

Für Versorgungsszenarios mit PV-Anlage wird abweichend das aktuellere Berechnungsverfahren nach DIN V 18599:2018-09 angewendet – dieses erlaubt eine realistischere und detailliertere Bewertung hinsichtlich der Eigennutzung (für Anlagentechnik und zur Deckung des Haushaltsstrombedarfs) und ggf. Einspeisung von PV-Strom (DIN V 18599:2018-09). Informativ wird ebenfalls die hiervon abweichende PV-Bewertung nach Gebäudeenergiegesetz (GEG:2020-08-08) vorgenommen (siehe nachfolgendes Kapitel 4.3).

4.3 Exkurs: Gutschrift selbst erzeugten PV-Stroms

Im Rahmen der energetischen Bilanzierung von Wohngebäuden und ihrer Nutzung kann ggf. gebäudenah erzeugter und selbst genutzter Strom eine wesentliche Rolle spielen. Die vorliegende Studie geht für die hier betrachtete Versorgungsvariante mit PV-Anlage auf die folgenden zwei Arten der Bilanzierung zur Ermittlung von Primärenergie- und Treibhausgasgutschriften ein:

- Ansatz nach § 23 Absatz 2 und Anlage 9 Nummer 1 Buchstabe g GEG (GEG:2020-08-08)
- Ermittlung einer Primärenergie- und Treibhausgasgutschrift vordergründig auf Basis der Anlagennennleistung
- Keine explizite Ermittlung der zu erwartenden Stromproduktion
- Keine Differenzierung hinsichtlich bzw. Berücksichtigung von
- Eigennutzung für Haushaltsstrom (Nutzungsanwendungen)
- Überschuss/Einspeisung

- Berechnungsverfahren für PV-Anlagen in Wohngebäuden nach DIN V 18599:2018-09
- Ermittlung der Nettostromproduktion in Abhängigkeit von Wetterdaten, Modultyp und -fläche, Ausrichtung, Neigung usw.
- PV-Gebäude-Bilanz unter vereinfachter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeiten zwischen PV-Angebot und -Nutzung in Anlehnung an Lichtmeß (Lichtmeß 2016)
- Ergebnisse:
 - Nettostromproduktion
 - Eigennutzung
 - TGA
 - Haushalt (Nutzungsanwendungen)
 - Überschuss/Einspeisung

Der Ansatz des GEG ist in seinem Geltungsbereich (z. B. Energieausweiserstellung) zwingend anzuwenden, berücksichtigt jedoch viele Einflussgrößen nicht und kann zu unrealistischen Ergebnissen führen. Aus Sicht der Autoren stellt das Verfahren zur PV-Bilanzierung für Wohngebäude nach DIN V 18599:2018-09 den physikalisch realistischeren und universelleren Ansatz dar.

Vorgreifend kann gesagt werden, dass beide Ansätze in den vorliegenden Berechnungsbeispielen ähnliche Ergebnisse liefern, sofern sich auf den zur Gebäudekonditionierung i. S. d. GEG eigengenutzten Strom beschränkt wird. Das Verfahren nach DIN V 18599 lässt zusätzlich Aussagen zum substituierten Strombezug für den Betrieb von Haushaltsgeräten sowie zum darüber hinaus in das öffentliche Netz eingespeisten PV-Strom zu.

4.4 Lebenszyklusanalyse

4.4.1 Grundlagen der Ökobilanzierung

Mit Hilfe von Ökobilanzierungen können die Umweltauswirkungen von Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen quantifiziert werden. Die Vorgehensweise ist in den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 geregelt (DIN EN ISO 14040:2009-11; DIN EN ISO 14044:2006-10). Speziell für die Ökobilanzierung von Gebäuden ist das Vorgehen in der DIN EN 15978 definiert (DIN EN 15978). Mit Hilfe dieser Leitlinien können die über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes entstehenden Umweltwirkungen berücksichtigt werden, beginnend bei der Rohstoffbereitstellung, über die Herstellung, Nutzung bis zu Verwertung am Lebensende.

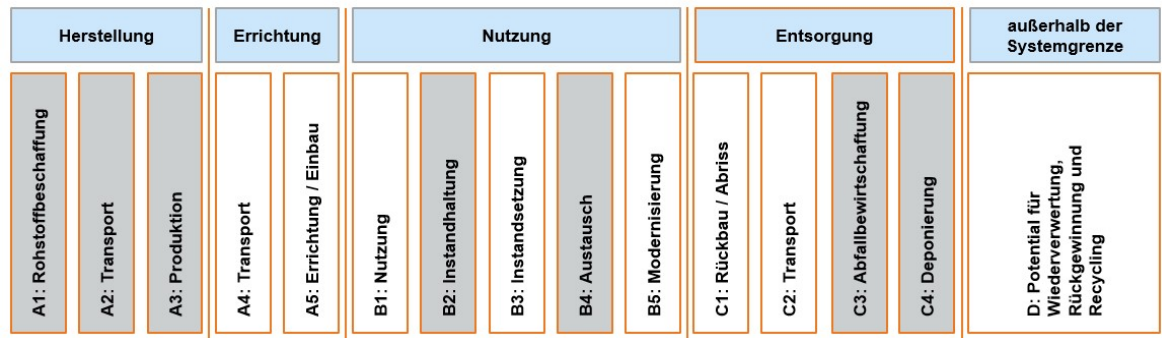


Abbildung 8: Phasen des Lebenszyklus, Eigene Darstellung nach DIN EN 15804 (DIN EN 15804:2014-07)

Die Erstellung einer Ökobilanz erfolgt gemäß DIN EN ISO 14040 in vier Schritten:

1. Definition Ziel und Untersuchungsrahmen

Grundsätzliche Festlegung der Randbedingungen, wie die Systemgrenze, die zu betrachtenden Lebenszyklusphasen, die Nutzungsdauern sowie die funktionelle Einheit, auf welcher die Ergebnisse normiert werden sollen.

2. Sachbilanz

Erhebung aller In- und Outputflüsse welche innerhalb der Systemgrenze über die gewählten Lebenszyklusphasen hinweg anfallen.

3. Wirkungsabschätzung

Basierend auf der Sachbilanz werden potenzielle Umweltauswirkungen mit Hilfe von Charakterisierungsmodellen oder EPD (Environmental Product Declaration) berechnet. Eine EPD beinhaltet als wesentliches Element Ökobilanzdaten. Dies umfasst Parameter zu Ressourcenbedarf, Abfällen und Umweltwirkungskategorien.

4. Auswertung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung werden in Bezug auf die in Schritt 1 definierten Zielsetzungen auf verschiedene Weise ausgewertet und interpretiert.

Anhand dieser vier Schritte werden im Folgenden die zu Grunde liegenden Annahmen und Randbedingungen für die durchgeführte Ökobilanz zusammengefasst.

4.4.2 Definition Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel dieser Studie ist die Bewertung eines beispielhaften MFH. Als Bilanzgrenze wird dabei die äußere Gebäudehülle inkl. Keller angenommen. Außenanlagen werden von der Betrachtung ausgeschlossen. Es soll dabei der gesamte Lebenszyklus von der Herstellung (A1-A3), über die Nutzung und Betrieb (B4 und B6), sowie die Lebensendphase (C3 und C4) berücksichtigt werden. In der Regel werden für Gebäude bei der Betrachtung der Umweltwirkungen nur eine Nutzungsdauer von 50 Jahren

angesetzt. Aufgrund der hohen Langlebigkeit der hier betrachteten massiven Bauweise wird zusätzlich noch eine Betrachtung über 80 Jahre vorgenommen. Als einheitliche Bezugsgröße werden die Ergebnisse dieser Studie auf 1 m² Gebäudenutzfläche umgerechnet. Mit den Ergebnissen dieser Studie soll eine Aussage zum Einfluss verschiedener Dämmniveaus und anlagentechnischen Varianten hinsichtlich Grauer Energie und Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus getroffen werden.

4.4.3 Sachbilanz

Hierbei wird eine umfangreiche Massenermittlung aller Komponenten und Bauteile des Gebäudes vorgenommen. Für alle Bauteilschichten werden die Materialien definiert. Die Mengenermittlung erfolgt mit dem Bezug auf die Außenmaße des Gebäudes. Als Grundlage dienen die Grundrisse, Ansichten und Schnitte des Typengebäudes gemäß (Walberg et al. 2014). Außerdem werden die Materialien, Konstruktionen und Komponenten für alle Bauteile und Gebäudetechnikkomponenten definiert. Diese sind detailliert in Kapitel 5 zusammengefasst.

4.4.4 Wirkungsabschätzung

Hierfür wird als Datengrundlage die Ökobaudat verwendet (BMI 2021). Die Ökobaudat ist eine Plattform und Datenbank des BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) für Ökobilanzdaten von Bauprodukten, aber auch Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen. Diese sind frei verfügbar und konform mit den Erfordernissen der DIN EN 15804. Im Rahmen dieser Studie wird zur Bewertung der Nachhaltigkeit zum einen die Kenngrößen Global Warming Potential (Globales Erderwärmungspotential, kurz GWP) verwendet. Sie ist eine Maßzahl für den relativen Beitrag zum Treibhauseffekt und gibt an, wie viel einer bestimmten Masse eines Treibhausgases im Vergleich zur gleichen Masse CO₂ zur globalen Erwärmung beiträgt. Die Kenngröße GWP wird in Kilogramm CO₂-Äquivalente (kg CO₂-Äq.) angegeben.

Zum anderen soll die „Graue Energie“ bewertet werden. Dieser Begriff stammt ursprünglich aus der Schweiz. Hierzulande ist er allerdings nicht eindeutig definiert und wird deshalb auch unterschiedlich verwendet bzw. interpretiert. Die Schweizer Definition laut SIA 2032 (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein) bezeichnet als Graue Energie „die gesamte Menge nicht-erneuerbarer Primärenergie, die für alle vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und für die Entsorgung, inkl. der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel, erforderlich ist.“ Sie wird auch als kumulierter, nicht-erneuerbarer Energieaufwand bezeichnet (kurz KEA). Im Rahmen dieser Auswertungen wird der Bilanzrahmen des gesamten nicht erneuerbaren Primärenergieaufwands (PENRT) nach Ökobaudat zugrunde gelegt. Im Rahmen dieser Studie wird die Kenngröße zur besseren Vergleichbarkeit mit den Verbrauchskennwerten in kWh angegeben, die reguläre Einheit ist MJ (SIA 2032).

4.4.5 EPD Perlitgefüllte POROTON-Ziegel

Bei den im Rahmen dieser Studie untersuchten POROTON-Ziegeln handelt es sich um mit geblähten Perliten gefüllte Ziegel unterschiedlicher Formate und Größen zur Anwendung als hochwärmedämmendes Mauerwerk für tragende und nichttragende Außenwände. Der Perlitanteil liegt je nach Typ zwischen 44 und 64 Volumen-%. Die Ziegel bestehen aus den Grundstoffen Ton/Lehm und Wasser. Der Tonabbau erfolgt im heimischen Tagebau, ortsnahe beim jeweiligen Ziegelwerk und erfordert damit keine Transporte für den Rohstoff.

Für die Ökobilanzierung des hier betrachteten MFH wird die EPD der perlitgefüllten POROTON-Ziegel mit Ausstellungsdatum von 07.03.2019 (Deklarationsnummer: EPD-POT_20180161-IBC1-DE) verwendet (IBU 2019). Die Umweltauswirkungen werden darin pro Volumen (deklarierte Einheit = 1 m³) mit einer Dichte von 575 kg/m³ angegeben. Im Rahmen dieser Studie werden unterschiedliche POROTON-Ziegeltypen betrachtet (siehe Kapitel 5), welche in der Dichte von dem in der EPD angegebenen Wert abweichen. Um diesen Umstand in der Ökobilanzierung zu berücksichtigen wurden die Kennwerte für GWP und PENRT mit einem Faktor multipliziert, um den Einfluss der unterschiedlichen Dichten abzubilden. In Tabelle 4 sind die Werte aus der EPD, sowie die angesetzten Umrechnungsfaktoren der beiden Ziegel S8 und S9 exemplarisch für die Lebenszyklusphase der Herstellung (A1-A3) dargestellt.

Tabelle 4: Kennwerte GWP und PENRT aus EPD und Umrechnungsfaktoren

Produkt	Rohdichte [kg/m ³]	Faktor	GWP [kgCO ₂ -Äq./m ³]	PENRT [MJ/m ³]
Mittelwert EPD	575	-	1,57E+2	1,69E+3
POROTON S8	730	1,27	1,99E+2	2,14E+3
POROTON S9	830	1,44	2,23E+2	2,43E+3

4.4.6 Ansatz für Ökobilanzierung der Gebäudetechnik

4.4.6.1 Massenermittlung

Die Mengen der für eine Ökobilanz wesentlichen anlagentechnischen Komponenten werden überschlägig anhand der maßgeblichen Kennwerte des Gebäudes (Geometrie/Größe, Wohnungsanzahl usw.) und seiner anlagentechnischen Konditionierung ermittelt. So weit wie möglich, wird hierbei auf normative Ansätze zurückgegriffen (insbesondere Berechnungsnormen zur Energiebedarfsberechnung). Kategorisierung und Detailgrad der Massenermittlung orientieren sich an der ÖKOBAUDAT. Nötigenfalls wird auf Basis der ÖKOBAUDAT-Datensätze inter-/extrapoliert.

Die Betrachtung bezieht sich auf die Komponenten der

- Heizungsanlage,
- Trinkwassererwärmung und -verteilung,
- Lüftungsanlage sowie
- ggf. der PV-Anlage.

Hierbei werden die wesentlichen anlagentechnischen Bestandteile einbezogen. Komponenten, zu welchen keine Ökobilanzdaten vorliegen, werden je nach Datenlage

- durch materiell und konstruktiv ähnliche Ersatzkomponenten abgebildet (z. B. Abbildung von PEX-Heizungsrohren als PEX-Trinkwasserrohre, von Ausdehnungsgefäßen als kleine Pufferspeicher usw.),
- anderen Komponenten/Baugruppen zugeschlagen (z. B. Zuschlag auf rechnerische Leitungslängen zur Erfassung von Anschlussteilen, Bögen usw.),
- verallgemeinert/pauschalisiert erfasst (z. B. Zusammenfassung von Ventilen/Armaturen usw. als Messing-/Rotgussbauteile) oder
- vernachlässigt, sofern sie für die Ökobilanz größenordnungsmäßig unbedeutend sind.

Die darüberhinausgehende technische Ausstattung wird nicht berücksichtigt (z. B. Elektroinstallation, ggf. eingebaute Beleuchtung, Sanitärausstattung). Der damit verbundene Aufwand an Grauer Energie (sowohl primärenergetisch als auch emissionsbezogen) ist zwar nicht unerheblich, hat jedoch – anders die Aufwendungen für Gebäudeerrichtung sowie Heizung/Trinkwasseranlage/PV – praktisch keinen Bezug zur Energieeffizienz des Gebäudes. Stattdessen korreliert der Aufwand für diese zusätzliche technische Ausstattung vordergründig mit dem Ausstattungsniveau (Komfortanspruch) sowie teilweise mit der Gebäudegröße und kann hierbei über einen extrem weiten Bereich schwanken.²

Tabelle 5: Komponenten Wärmeerzeugung in Abhängigkeit von der Versorgungsvariante

Variante		Position	
Brennwertkessel, Solarthermie (TWE)	Heizkessel	Gas-Brennwertkessel ^a	1 Stk
		Schornstein	18 m
	Solaranlage	Flachkollektor	25 m ²
		Ausdehnungsgefäß Solekreis 80 l	1 Stk
		Solargruppe (Pumpe, Armaturen)	1 Stk
		Soleleitung Kupfer DN25	40 m
		Leitungsämmung EPDM	40 m
	Speicher usw.	Bivalenter Kombispeicher gedämmt 1.500...2.000 l	1 Stk
		Ausdehnungsgefäß Heizung ca. 140 l	1 Stk
Fernwärme	Wärmeübergabestation ^a		1 Stk
	Speicher usw.	Indirekt beheizter Trinkwasserspeicher gedämmt ca. 600 l	1 Stk
		Ausdehnungsgefäß Heizung ca. 90 l	1 Stk
Wärmepumpe	Luft-Wasser-Wärmepumpe ^a		1 Stk
	Speicher usw.	Pufferspeicher WP gedämmt 600...700 l	1 Stk
		Indirekt beheizter Trinkwasserspeicher gedämmt ca. 750 l	1 Stk
		Ausdehnungsgefäß Heizung 140 l	1 Stk

^a Leistung abhängig von Wärmeschutzniveau (GEG, EH-55, EH-40), siehe 0

² Als grobe Näherung kann folgendes angenommen werden: Für eine Ausstattung im tendenziell gehobenen Komfortniveau würde sich der Aufwand an Grauer Energie der Anlagentechnik bei den hier betrachteten Varianten ohne PV – je nach Variante – um größenordnungsmäßig 50 bis 100 % erhöhen, wenn neben Heizungs- und Trinkwasseranlage auch die darüber hinausgehende Elektro- und Sanitärausstattung berücksichtigt würde. Bei einem moderateren Ausstattungsniveau kann der zusätzliche Aufwand jedoch auch deutlich kleiner ausfallen. Vorgreifend kann gesagt werden, dass auch bei Berücksichtigung des Zusatzaufwandes für ein tendenziell gehobenes Komfortniveau der Aufwand an Grauer Energie für die Anlagentechnik um ein Mehrfaches von dem Aufwand der Gebäudeerrichtung übertroffen wird.

Tabelle 6: Komponenten Wärmeverteilung/ übergabe und Wasserverteilung, einheitlich für alle Versorgungsvarianten

Position		
Wärmeverteilung und -übergabe ^a	Armaturen ^b	10 kg
	Verteilleitung PEX, im Mittel ca. DN25	141 m
	Leitungsdämmung	141 m
	Zentrale Heizungspumpe	1 Stk
	Fußbodenheizkreisverteiler für 6 Kreise	12 Stk
	Heizleitung ^c PEX mit Dämmung und Montagesystem	840 m ²
Trinkwasserverteilung	Armaturen ^b	10 kg
	Wasserleitung warm PEX, im Mittel ca. DN25	189 m
	Leitungsdämmung warm	133 m
	Wasserleitung kalt PEX, im Mittel ca. DN25	173 m
	Leitungsdämmung kalt	92 m
	Zirkulationspumpe	1 Stk

^a Skalierung nach Wärmeschutzniveau (GEG, EH-55, EH-40), siehe 0

^b Abbildung anhand ÖKOBAUDAT pauschal als Messing-/Rotgussbauteile mit Bezug auf Gewicht

^c Bezugsgröße ist die Verlegefläche

Tabelle 7: Komponenten Lüftung in Abhängigkeit von der Versorgungsvariante

Ausführung Lüftung	Position	
Variante(n) mit zentraler Abluftanlage	Dachventilator	2 Stk
	Abluftkanal	28 m
Variante(n) mit Wohnungslüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung	Wohnungslüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung	12 Stk
	Außen- und Fortluftleitung PE-HD	72 m
	Zu- und Abluftleitung einschließlich Verteiler PE-HD	123 m

Tabelle 8: Komponenten Photovoltaik in Abhängigkeit von der Versorgungsvariante

Variante	Position	
Variante(n) mit PV	PV-Module (ca. 15 kWp) einschließlich Montagematerial, Wechselrichter usw.	110 m ²

4.4.6.2 Einfluss des Leistungsbedarfs und der Anlagendimensionierung

In Abhängigkeit vom baulichen Wärmeschutz sowie weiteren Einflussgrößen (z. B. Lüftung mit/ohne Wärmerückgewinnung) können sich unterschiedliche Anforderungen an die Anlagendimensionierung ergeben, u. a. bezüglich

- Leistung der Wärmeerzeugung,
- Wärmeübergabe (z. B. Verlegeabstand, Anzahl Heizkreise) und
- Wärmeverteilungen (Rohrdurchmesser).

Für die vorliegende Betrachtung wird die Leistung der Wärmeerzeugung nach überschlägigen Verfahren ermittelt und nach dem baulichen Wärmeschutzniveau unterschieden. Mit der Verringerung des Leistungsbedarfs u. U. einhergehende Auswirkungen auf die Komponenten der Wärmeverteilung und -übergabe werden vereinfacht durch eine prozentuale Verringerung erfasst.

Tabelle 9: Erzeugerleistung Modellgebäude, gerundet

Baulicher Wärmeschutz	Überschlägige Erzeugerleistung ^a [kW]	Skalierung Wärmeverteilung/-übergabe ^b
GEG	50	100 %
EH55	45	97,5 %
EH40	40	95 %

^a Die Werte wurden überschlagen auf Basis der Heizleistung am Auslegungstag nach DIN V 18599 sowie üblicher Zuschläge zur Trinkwassererwärmung nach Herstellerangaben und sind auf 5 kW gerundet.

Fernwärmeübergabestationen werden in der ÖKOBAUDAT anhand ihres Gewichts abgebildet. Für das Wärmeschutzniveau „GEG“ wird ein Gewicht von 50 kg unterstellt (z. B. bodenstehende Kompaktstation einschließlich Rahmen/Gestell); für die besseren Wärmeschutzniveaus wird das Gewicht analog der Wärmeverteilung/-übergabe skaliert.

^b Für das Wärmeschutzniveau „GEG“ (100 %) werden vereinfachend folgende Annahmen getroffen:

- Rohrleitungslängen in Anlehnung an DIN V 4701-10
- Mittlere Rohrdimension DN25
- Verlegeabstand der Fußbodenheizleitungen 20 cm

Es wird von einem über die gesamten Bereiche der Wärmeverteilung und -übergabe verteilten Einsparpotenzial von ca. 5 % zwischen dem moderatesten und dem besten Wärmeschutzniveau ausgegangen.

Die hier vorgenommene Unterteilung bildet wesentliche Einflüsse in einem qualitativ und quantitativ realistischen Rahmen ab, stellt jedoch keine detaillierte Anlagenplanung dar. Demgegenüber würde eine detaillierte Anlagenplanung (u. a. detaillierte Heizlastberechnung, zusätzliche Unterscheidung hinsichtlich Ausführung der Lüftung usw.) zwar i. d. R. zu einem höheren Detailgrad führen; gleichzeitig würden aber die gegebenen praktischen Restriktionen – besonders die begrenzte Auswahl an Leistungsabstufungen, Rohr-/Armaturendimensionen, Verlegeabstände bei Fußbodenheizungen (i. d. R. festes Raster je nach Hersteller/System) usw. – wiederum einer Vergrößerung der Betrachtung verursachen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Betrachtung von weiteren Merkmalen der anlagentechnischen Komponenten bzw. der Planung/Ausführung, welche hier nicht ohne weiteres erfasst werden können, überlagert werden. So kann sich beispielsweise die Ausführung eines Heiz-

kessels als wandhängendes oder bodenstehendes Gerät deutlich stärker auf den Material- und Energieeinsatz auswirken als ein Unterschied der Nennleistung um wenige Kilowatt.

4.4.7 Nutzungsdauern und Erneuerungszyklen

Für die angesetzten Nutzungsdauern der einzelnen bauseitigen Komponenten und Bauteilschichten wurden auf die offiziellen Angaben des BBSR (BBR 2011) zurückgegriffen, welche auch Grundlage für die Zertifizierung nach BNB sind. Für anlagentechnische Bauteile werden – konform mit den BNB-Vorgaben – durchschnittliche Komponentennutzungsdauern nach VDI 2067 Blatt 1 herangezogen (VDI 2067 Blatt 1). Anhand dieser Lebensdauern lassen sich die Erneuerungszyklen für die beiden betrachteten Lebensdauern des gesamten Gebäudes von 50 und 80 Jahren berechnen. Nachfolgend werden die wichtigsten Annahmen kurz zusammengefasst.

Tabelle 10: Auswahl Lebensdauern und Erneuerungszyklen einzelner Bauteilschichten

Bauteil	Schicht	Lebensdauer	Erneuerungszyklen	
			50 Jahre	80 Jahre
Außenwand	Fassadenfarbe	15	3	5
	Außenputz	45	1	1
	POROTON-Ziegel	>50	0	0
	Innenputz	>50	0	0
	Innenfarbe	15	4	7
Flachdach	Abdichtung	30	1	2
	Mineralwolle	>50	1	2
	Stahlbeton	>50	0	0
	Innenputz	>50	0	0
	Innenfarbe	10	4	7
Fenster	PVC Rahmen	40	1	2
	Verglasung	30	1	2

Tabelle 11: Auswahl Lebensdauern und Erneuerungszyklen wesentlicher anlagentechnischer Komponenten

Komponente	Lebensdauer	Erneuerungszyklen	
		50 Jahre	80 Jahre
Gas-Brennwertkessel	18	2	4
Wärmeübergabestation	20	2	3
Luft-Wasser-Wärmepumpe	18	2	4
Flachkollektor	20	2	3
Trinkwasserspeicher	20	2	3
Ausdehnungsgefäß	15	3	5
Umwälzpumpe	10	4	7
Armaturen	20	2	3
Verteilleitung Heizung PEX	30	1	2
Warmwasserleitung PEX	30	1	2
Kaltwasserleitung PEX	40	1	1
Leitungsämmung Heizung	25	1	3
Leitungsämmung Trinkwasser warm	20	2	3
Leitungsämmung Trinkwasser kalt	20	2	3
Fußbodenheizung	50	0	1
Dachventilator, Lüftungsgeräte	12	4	6
Lüftungsleitungen	30	1	2
PV-Anlage	20	2	3

4.4.8 Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt größtenteils graphisch mit Hilfe von Balkendiagrammen. Dabei soll der Fokus auf die Unterschiede der untersuchten Varianten der energetischen Niveaus, Gebäudetechnikkonzepte und Lebensdauern liegen.

5 Varianten und Voruntersuchungen

5.1 Energetisches Niveau

Um die Auswirkungen der verbauten Materialien der Gebäudehülle auf die Graue Energie herauszuarbeiten, wird das Gebäudemodell in drei verschiedenen Wärmeschutzniveaus untersucht. Als Basisniveau wird der Standard nach dem GEG 2020 festgelegt. Ergänzend dazu wird das Gebäude auch nach den Vorgaben des Effizienzhausstandards 55 und 40 untersucht. Das Material der Bauteile und die Dimensionierung der notwendigen Dämmschichten sind entsprechend der Vorgaben des Standards bezüglich des U-Wertes und des gesamten Transmissionswärmeverlustes ausgewählt. Zur Erlangung des jeweiligen Standards muss das Gebäude den Wert des Transmissionswärmeverlustes eines Referenzgebäudes mit der gleichen Geometrie, Ausrichtung, Nutzung und identischen Konditionierungsanforderungen um einen geforderten Prozentsatz unterschreiten. Zusammen mit der betriebenen Anlagentechnik, ergibt sich ein Primärenergiebedarf für das Gebäude, welcher ebenfalls um einen vom Standard vorgegebenen Wert im Vergleich zum Referenzgebäude niedriger sein muss. Die geforderten Grenzwerte der Standards sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Anforderungen der Standards an den Transmissionswärmeverlust und den Primärenergiebedarf

Effizienzhausstandard		GEG	EH 55	EH 40
Anforderungen	% von HT [*] des Referenzgebäudes	100	70	55
	% von QP [*] des Referenzgebäudes	75	55	40

Die folgenden Unterkapitel zeigen, mit welchen Aufbauten die U-Werte der jeweiligen Bauteile erzielt wurden. Ebenso wird die Berechnung des Wärmebrückenzuschlags erläutert.

5.1.1 Gebäude nach GEG

Die monolithischen Außenwände des Gebäudemodells nach GEG-Standard bestehen im Kern aus perlitgefüllten Dämmziegeln mit einer Dicke von 365 mm, einer deklarierten Wärmeleitfähigkeit von 0,09 W/(m·K) und einer Rohdichteklasse von 0,85 kg/dm³. Innenseitig sind die Wände mit einem Gipsputz und außenseitig mit einem dünn-schichtigen Außenputzsystem versehen. Das Flachdach aus Stahlbeton ist mit einer Dämmschicht aus Mineralwolle mit einer Dicke von 140 mm ausgestattet. Der teilweise unterkellerte Bereich der Erdgeschossbodenplatte ist mit einer 80 mm dicken Mineralwollschicht gedämmt, wohingegen der erdberührte Teil mit einer 80 mm dicken Perimeterdämmung verkleidet ist. Raumseitig besitzt die Erdgeschossbodenplatte eine 40 mm dicke Trittschalldämmung. Die Fenster sind mit einer Zweischeiben

Isolierverglasung und einem PVC-Rahmen ausgeführt. Für den Wärmebrückenzuschlag wurde der vom GEG angegebene Pauschalwert von $0,050 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gewählt, der bei Konformität der Ausführungen der Wärmebrücken mit denen des Beiblattes 2 der DIN 4108 angewendet werden darf.

Tabelle 13: Dimensionierung der Gebäudehülle für die Variante nach GEG 2020 Standard

Bauteil	Aufbau	Dicke mm	U-Wert $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Flachdach	Innenputz	20	0,24
	Armierter Stahlbeton	200	
	Mineralwollplatten WLK 035	140	
	Bitumenbahn	10	
Außenwand	Innenputz	10	0,23
	Perlitgefüllter Hochlochziegel 36,5er S9, Rohdichte 0,85	365	
	Außenputz – Kalk-Zement Faserleichtputz	20	
Erdberührte Bodenplatte EG	Zement-Estrich	50	0,27
	Trittschalldämmung EPS WLK 035	40	
	Armierter Stahlbeton	250	
	Perimeterdämmung XPS WLK 035	80	
Bodenplatte EG zu unbeheiztem Keller	Zement-Estrich	50	0,26
	Trittschalldämmung EPS WLK 035	40	
	Armierter Stahlbeton	200	
	Verkleidete Mineralwollplatten WLK 035	80	
Fenster	PVC-Rahmen Zweischeiben-Isolierverglasung		1,3
Eingangstür			1,8
Wärmebrücken	Pauschalwert nach GEG 2020 bei Konformität mit Beiblatt 2 der DIN 4108		0,050

5.1.2 Effizienzhaus 55

Zur Erreichung des Effizienzhausstandards 55 werden die Außenwände mit einem Ziegel mit niedrigerer Rohdichte ersetzt. Der Ziegel hat bei gleichbleibender Dicke die Rohdichteklasse 0,75 und besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von $0,08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Zusätzlich werden die Außenwände auf der Außenseite mit einem dünnen wärmedämmenden Putzsystem versehen (20 bzw. 25 mm Kalk-Zement Faserleichtputz). Die Dämmschicht des Flachdaches erhöht sich auf eine Dicke von 240 mm und auch bei den Bodenplatten der thermischen Gebäudehülle wird die Trittschalldämmung auf eine Dicke von 80 mm aufgedoppelt. Die Fenster haben in diesem Fall eine Dreischeibenverglasung und einen für Passivhäuser geeigneten Rahmen. Für den Wärmebrückenzuschlag wird in Anlehnung an den vereinfachten Effizienzhausnachweis auf Basis

von Referenzwerten der verbesserte Pauschalwert von $0,035 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ angenommen, welcher beispielsweise durch das sogenannte KfW-Wärmebrückenkurzverfahren nachgewiesen werden kann (KfW 2015).

Tabelle 14: Dimensionierung der Gebäudehülle für die Variante nach EH 55 Standard (fettgedruckt sind die gegenüber der vorhergehenden Tabelle geänderten Bauteile zum Erreichen des EH 55 Standards)

Bauteil	Aufbau	Dicke mm	U-Wert $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
Flachdach	Innenputz	20	0,14
	Armierter Stahlbeton	200	
	Mineralwollplatten WLG 035	240	
	Bitumenbahn	10	
Außenwand	Innenputz	10	0,20
	Perlitgefüllter Hochlochziegel 36,5er S8, Rohdichte 0,75	365	
	Außenputz – Kalk-Zem. Faserleichtputz	25	
Erdberührte Bodenplatte EG	Zement-Estrich	50	0,21
	Trittschalldämmung EPS WLG 035	80	
	Armierter Stahlbeton	250	
	Perimeterdämmung XPS WLG 035	80	
Bodenplatte EG zu unbeheiztem Keller	Zement-Estrich	50	0,20
	Trittschalldämmung EPS WLG 035	80	
	Armierter Stahlbeton	200	
	Verkleidete Mineralwollplatten WLG 035	80	
Fenster	Passivhausrahmen Dreischeibenverglasung		0,9
Eingangstür			1,2
Wärmebrücken	Pauschalwert EH 55 in Anlehnung an KfW-Wärmebrückenkurzverfahren		0,035

5.1.3 Effizienzhaus 40

Um den Anforderungen des Effizienzhausstandards 40 zu genügen, werden die Außenwände mit einem 425 mm dicken Ziegel ausgeführt, welcher die Rohdichteklasse 0,75 hat und einen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ aufweist. Außenseitig wird der Außenwandaufbau ebenfalls wieder mit einem dünnen wärmedämmenden Außenputzsystem ergänzt. Ebenfalls ist eine Erhöhung der Dämmschicht auf dem Dach auf eine Dicke von 300 mm notwendig. Zur 80 mm dicken Trittschalldämmung der Bodenplatten der Gebäudehülle kommt nun auch eine auf 100 mm erweiterte Perimeterdämmung zum Erdboden zum Einsatz. Die Fenster haben nun auch einen deutlich verbesserten Wärmeschutzstandard mit einer Dreischeiben-Isolierverglasung und Passivhausrahmen. Für den Wärmebrückenzuschlag

wird nun eine detaillierte Berechnung auf Grundlage der Wärmebrückenausführungen des Kataloges des Ziegelverbandes durchgeführt, welche einen Wert von $0,015 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ergibt (ArGe MZ 2020).

Tabelle 15: Dimensionierung der Gebäudehülle für die Variante nach EH 40 Standard (fettgedruckt sind die gegenüber der vorhergehenden Tabelle geänderten Bauteile zum Erreichen des EH 40 Standards)

Bauteil	Aufbau	Dicke	U-Wert
Flachdach	Innenputz	20	0,12
	Armierter Stahlbeton	200	
	Mineralwollplatten WLK 035	300	
	Bitumenbahn	10	
Außenwand	Innenputz	10	0,18
	Perlitgefüllter Hochlochziegel 42,5er S08, Rohdichte 0,75	425	
	Außendämmputzsystem	20	
Erdberührte Bodenplatte EG	Zement-Estrich	50	0,19
	Trittschalldämmung EPS WLK 035	80	
	Armierter Stahlbeton	250	
	Perimeterdämmung XPS WLK 035	100	
Bodenplatte EG zu unbeheiztem Keller	Zement-Estrich	50	0,18
	Trittschalldämmung EPS WLK 035	80	
	Armierter Stahlbeton	200	
	Verkleidete Mineralwollplatten WLK 035	100	
Fenster	Passivhausrahmen Dreischeiben Isolierverglasung		0,7
Eingangstür			1,0
Wärmebrücken	Detaillierte Wärmebrückenberechnung		0,015

5.2 Gebäudetechnikvarianten

Folgende Versorgungsvarianten des Modellgebäudes werden betrachtet:

Tabelle 16: Versorgungsvarianten Modellgebäude

Variante		Heizung				Trinkwassererwärmung			Sonstiges	
		Wärmeerzeugung	Speicherung	Verteilung	Übergabe	Wärmeerzeugung	Speicherung	Verteilung		
V.1 BW+ST	Brennwertkessel, Solarthermie (TWE), Abluft zentral	Brennwertkessel Erdgas	Bivalenter Kombi-speicher	Gebäude-zentral, Lei-tungslängen nach DIN V 4701-10	Fußbo-denhei-zung	Solarthermie + Wärmeerzeu-ger Heizung	→ Heizung	Gebäudezent-ral, Leitungslän-gen nach DIN V 4701-10	Gebäudezentrale Abluftanlage Bad/Küche, Nachströmung über Außenluftdurchlässe	
V.2 BW+ST WRG	Brennwertkessel, Solarthermie (TWE), Wohnungslüftung WRG					Wohnungsweise Zu-Abluftanlagen mit Wärme-rückgewinnung				
V.3 FW	Fernwärme, Abluft zentral	Wärmeübergabestation	—			Wärmeerzeu-ger Heizung	Indirekt be-heizter Trinkwas-serspeicher		Gebäudezent-ral, Leitungslän-gen nach DIN V 4701-10	Gebäudezentrale Abluftanlage Bad/Küche, Nachströmung über Außenluftdurchlässe
V.4 FW WRG	Fernwärme, Wohnungslüftung WRG									Wohnungsweise Zu-Abluftanlagen mit Wärme-rückgewinnung
V.5 EWP	Wärmepumpe, Abluft zentral	Elektromotorische Wär-mepumpe (Luft-Wasser)	Pufferspei-cher							Gebäudezentrale Abluftanlage Bad/Küche, Nachströmung über Außenluftdurchlässe
V.6 EWP PV	Wärmepumpe, Abluft zentral, PV									Gebäudezentrale Abluftanlage Bad/Küche, Nachströmung über Außenluftdurchlässe; PV-Anlage

5.3 Berechnung Energiekennwerte

Mithilfe des Berechnungsprogramms wird auf Grundlage der eingegebenen Geometrie des Typengebäudes ein Referenzgebäude nach den Vorgaben des GEG 2020 erzeugt, welches dieselbe Größe/Geometrie sowie einen nach GEG festgelegten baulichen Wärmeschutz (Bauteil-U-Werte und Wärmebrückenzuschlag) besitzt. Daraus ergibt sich ein spezifischer Transmissionswärmeverlust für das Referenzgebäude $H_{T,Ref}$, der als Grundlage zur Berechnung der einzuhaltenden Zielwerte $H_{T,Soll}$ für die Gebäudehülle je nach Standard verwendet wird. Nach GEG 2020 besitzt das Referenzgebäude eine Anlagentechnik, welche primär über Erdgas als Energieträger das Gebäude versorgt.

Aus der Bilanzierung der Transmissionswärmeverluste, der Verluste über die Lüftung und Anlagentechnik, der internen und der solaren Gewinne und der Warmwasserbereitung ergibt sich der Endenergiebedarf des Gebäudemodells, der durch Multiplikation mit den Standard-Primärenergiefaktoren je nach Energieträger den Primärenergiebedarf ergibt. Bei der Berechnung des Bedarfs des Referenzgebäudes entsteht ein Referenzwert für die Primärenergie $Q_{P,Ref}$, aus dem sich mit den Anforderungen der Standards ein Zielwert $Q_{P,Soll}$ für das Gebäudemodell berechnen lässt. Die Anforderungen an den spezifischen Transmissionswärmeverlustkoeffizienten und an den Primärenergiebedarf ebenso wie die Zielwerte sind in Tabelle 17 angegeben.

Tabelle 17: Zielwerte zur Auslegung der Gebäudehülle und Anlagentechnik

Effizienhausstandard	GEG	EH 55	EH 40
$H_{T,Ref}$ in $W/m^2 \cdot K$		0,470	
Anforderungen in % von $H_{T,Ref}$	100	70	55
$H_{T,Soll}$ in $W/m^2 \cdot K$	0,470	0,329	0,259
$Q_{P,Ref}$ in $kWh/m^2 a$		90,3	
Anforderungen in % von $Q_{P,Ref}$	75	55	40
$Q_{P,Soll}$ in $kWh/m^2 a$	67,7	49,7	36,1

5.3.1 Transmissionswärmeverluste

Anhand der Zielwerte zur Auslegung der Gebäudehülle werden die U-Werte der Bauteile für jede Variante des Gebäudestandards festgelegt. Daraus ergeben sich nach Verrechnung mit den Bauteilflächen und den Temperaturkorrekturfaktoren die in der Tabelle 18 angegeben spezifischen Transmissionswärmeverluste je nach Standard.

Tabelle 18: Berechnung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes je nach Standard

Bauteil	Bezugs- fläche A m ²	F _x -	GEG		EH 55		EH 40	
			U W/m ² ·K	H _T W/K	U W/m ² ·K	H _T W/K	U W/m ² ·K	H _T W/K
Bodenplatte zu Erdreich	92	0,65	0,27	16,11	0,21	12,53	0,19	11,34
Flachdach	242	1,00	0,24	58,10	0,14	33,89	0,12	29,05
Bodenplatte zu Keller unbeheizt	150	0,50	0,26	19,54	0,20	15,03	0,18	13,53
Außenwände	627	1,00	0,23	144,17	0,20	125,37	0,18	112,83
Fenster	222	1,00	1,30	289,08	0,90	200,13	0,70	155,66
Eingangstür	2	1,00	1,80	3,65	0,12	0,24	0,10	0,20
Wärmebrücken	1335	1,00	0,050	66,77	0,035	46,74	0,015	20,03
Summe	1335		—	597,42	—	433,93	—	342,63
H_T in W/m²·K				0,447		0,325		0,257

Im Vergleich von Tabelle 17 und Tabelle 18 unterschreiten mit den festgelegten U-Werten die spezifischen Transmissionswärmeverluste H_T der Gebäudevarianten die Zielwerte $H_{T\text{ Soll}}$ der Standards.

Die Ausführung der Gebäudehülle eines Mehrfamilienhauses ist mit einer monolithischen Außenwand auch bis hin zu einem Effizienzhaus-40-Standard möglich. Aufgrund des größten Anteils der thermischen Gebäudehüllfläche haben diese auch einen hohen Anteil an den Transmissionswärmeverlusten. Den größten Anteil der Transmissionswärmeverlusten ist auf die Fenster zurückzuführen, obwohl sie nur eine vergleichsweise kleine Fläche aufweisen.

Die Außenwandflächen und die Fenster weisen bei allen Gebäudestandards die höchsten Transmissionswärmeverluste auf. Eine Verbesserung des Standards vom GEG-2020-Niveau auf das EH-40-Niveau führt bei den Außenwänden zu einer Reduzierung der Verluste um 22 %. Dabei geht die Verbesserung jedoch aufgrund der höheren Dicke der Ziegel mit einem Verlust von Nutzfläche einher. Bei den Fenstern kann die höchste absolute Verlustreduktion und eine relative Reduktion durch eine Dämmstandardverbesserung um 46 % erzielt werden. Dabei sind die Fenster jedoch mit einem Gesamt U-Wert von 0,7 mit einem sehr hohen Dämmstandard und damit hohen Kosten verbunden.

Die explizite Optimierung und Berücksichtigung der Wärmebrücken in einem detaillierten Nachweis geht mit einer deutlichen Verminderung der Wärmeverluste gegenüber dem Pauschalfall einher und sollte für hochwärmedämmende Gebäude der Regelfall werden. Hier kann mit geringem Aufwand eine vergleichsweise hohe Reduzierung der Transmissionswärmeverluste erreicht werden.

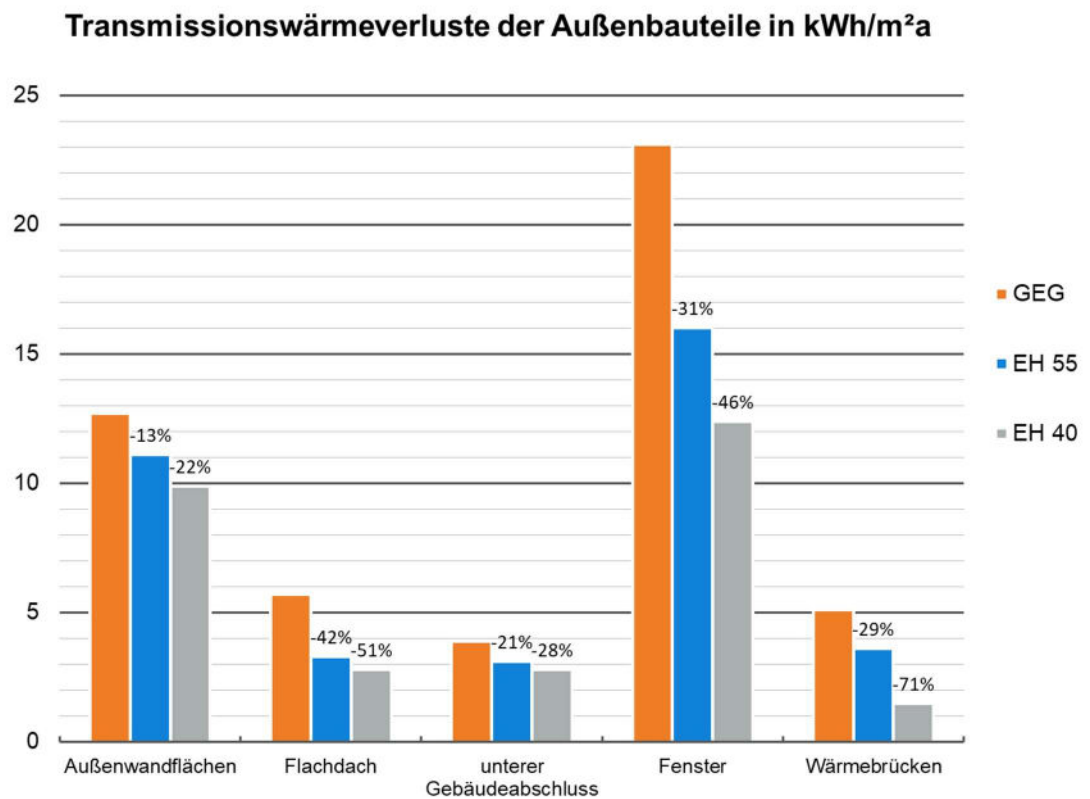


Abbildung 9: Transmissionswärmeverluste der Außenbauteile je Standard

5.3.2 Primärenergiebedarf

Vergleicht man nun den spezifischen Primärenergiebedarf je Variante mit den Zielwerten aus Tabelle 12, so zeigt sich, dass alle Varianten die Anforderungen nach GEG 2020 erfüllen. Bei den Varianten mit einer Gebäudehülle nach EH-55-Standard verfehlt nur die Variante mit einer Gas-Brennwert-Anlage in Kombination mit einer Abluftanlage die Anforderungen an den Primärenergiebedarf knapp. Beim EH-40-Standard ist der Primärenergiebedarf bei drei Varianten höher als der Zielwert des Standards. Darunter fallen die Varianten mit einer Gas-Brennwert-Anlage mit Abluftanlage, mit einem Fernwärmeanschluss und Abluftanlage und mit Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne PV-Anlage (siehe Abbildung 10)

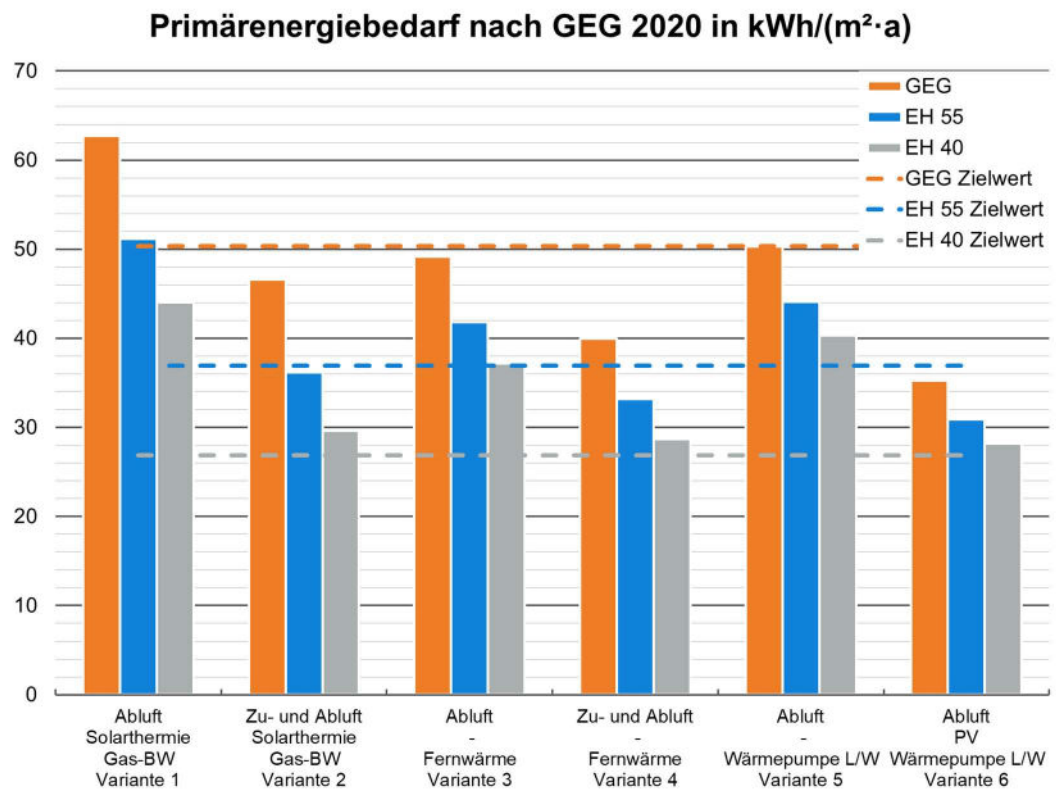


Abbildung 10: Primärenergiebedarf der Varianten im Vergleich zu den Zielwerten der Standards

6 Ergebnisse der Ökobilanzierung

Die Ergebnisse der Ökobilanzstudie werden hier für die unterschiedlichen Lebenszyklusphasen ausgewertet. Die Ergebnisse des GWP und der PENRT werden jeweils pro m² Gebäudenutzfläche angegeben.

6.1 Herstellungsphase A1-A3

6.1.1 Auswertung nach Bauteilen

In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die Ergebnisse der Herstellungsphase für alle konstruktiven Teile des Gebäudes, ohne anlagentechnische Ausrüstung, für die drei untersuchten energetischen Niveaus dargestellt. Dabei werden die einzelnen Ergebnisse der Bauteile Dach, Fenster, Keller, Innenbauteile und POROTON-Außenwand inkl. Putz und Anstrich separat ausgewiesen. Man kann bei der Gesamtsumme einen leichten Anstieg der Ergebnisse von GEG-Standard, über EH 55, auf EH 40 erkennen. Der größte Anteil der Innenbauteile bleibt über die drei Varianten jedoch gleich. Insgesamt ist beim GWP ein Anstieg von 8 %, beim PENRT von 9 % vom GEG-Standard zum EH 40-Standard zu verzeichnen. Dieser Zuwachs ist auf die erhöhten Dämmstärken, die Dreifachverglasung, sowie die größere Wandstärke der POROTON-Außenwand zurückzuführen.

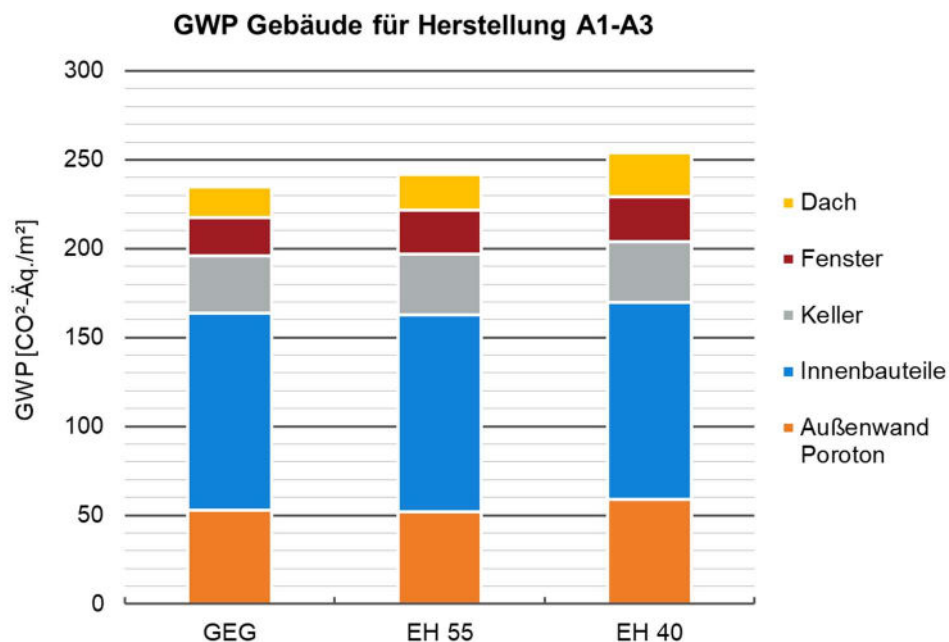


Abbildung 11: GWP Herstellungsphase A1-A3 für das Gebäude nach Bauteilen

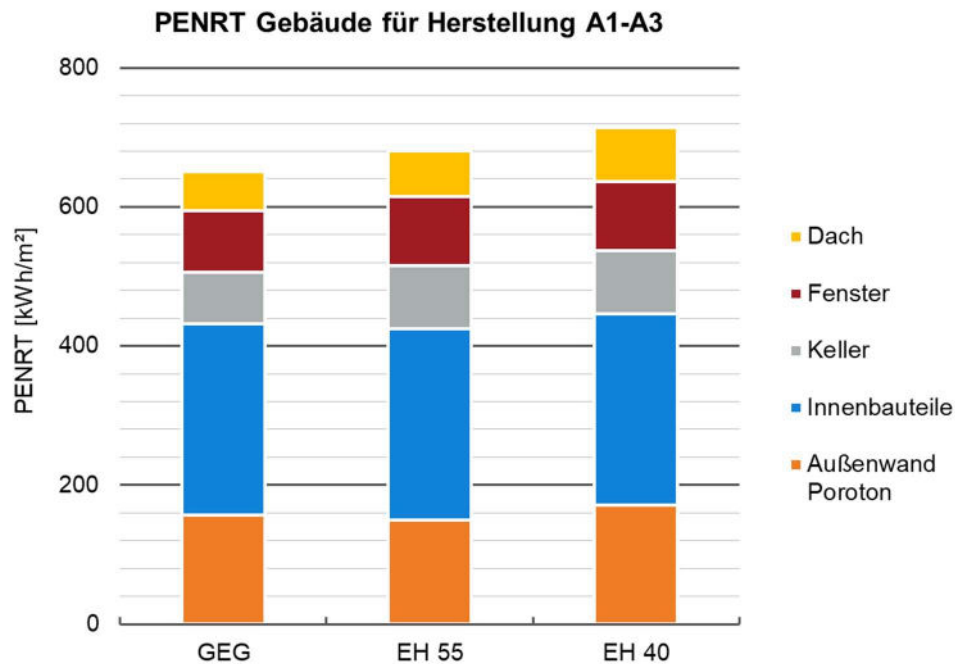


Abbildung 12: PENRT Herstellungsphase A1-A3 für das Gebäude nach Bauteilen

6.1.2 Auswertung nach Material

Wertet man nun dieselben Ergebnisse aus vorangegangenen Kapitel 6.1.1 nach den verbauten Materialien aus, ergeben sich die Anteile wie in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt. Die POROTON-Ziegel haben beim GWP einen Anteil am gesamten Gebäude von 21,0 % nach dem GEG, 18,3 % beim EH 55 und 20,3 % beim EH 40. Der leichte Abfall von GEG nach EH 55, trotz gleicher Wandstärke, ist auf den im GEG angesetzten etwas schwereren S9 Ziegel mit einer Rohdichteklasse von 0,85, im Vergleich zum S8 im EH 55 mit einer Rohdichteklasse $\leq 0,75$ zurückzuführen. Ein ähnliches Verhältnis zeigt sich bei der Auswertung der PENRT. Hier beträgt Anteil der POROTON-Ziegel 22,1 %, 19,0 % und 21,1 % für die Gebäude nach GEG, EH 55 und EH 40.

Der größte Anteil bei dieser Auswertung entfällt bei beiden Kenngrößen auf den Stahlbeton. Dieser liegt beim GWP zwischen 36 und 38 %; beim PENRT sind es zwischen 19,5 und 21 % und damit in der gleichen Größenordnung wie der POROTON-Ziegel. Hierbei ist zu beachten, dass im Vergleich zu den vorangegangenen Auswertungen in Abbildung 11 und Abbildung 12 nur das Material POROTON-Ziegel ohne Putze und Anstriche abgebildet wird. Der Anteil „Innenwand Ziegel“ entfällt hier auf die gemauerten Innenwände, diese sind nicht perlitgefüllt und werden daher separat ausgewiesen. Aufgrund der Fähigkeit CO_2 während der Wachstumsphase zu speichern hat Holz ein negative CO_2 Bilanz. Daher werden für Parkett in Abbildung 13 negative Ergebnisse erzielt.

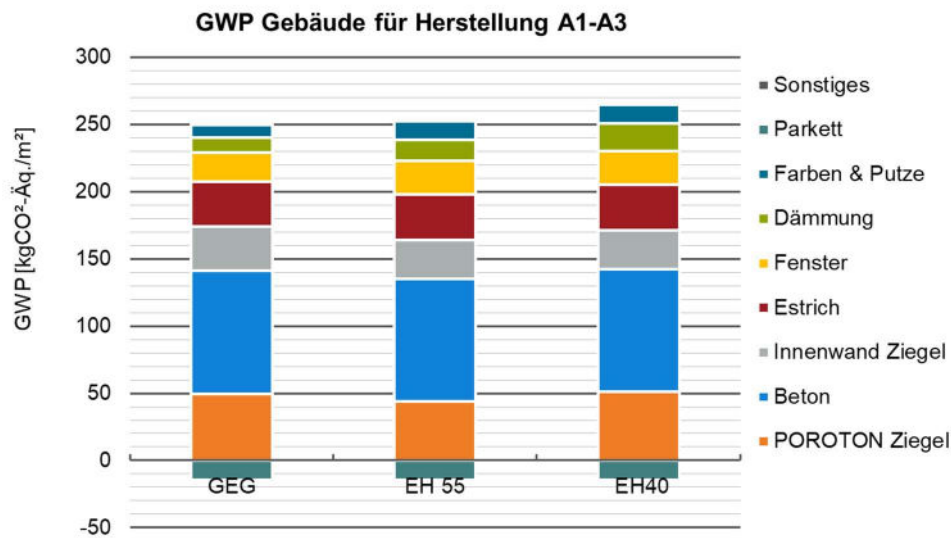


Abbildung 13: GWP Herstellungsphase A1-A3 für das Gebäude nach Material

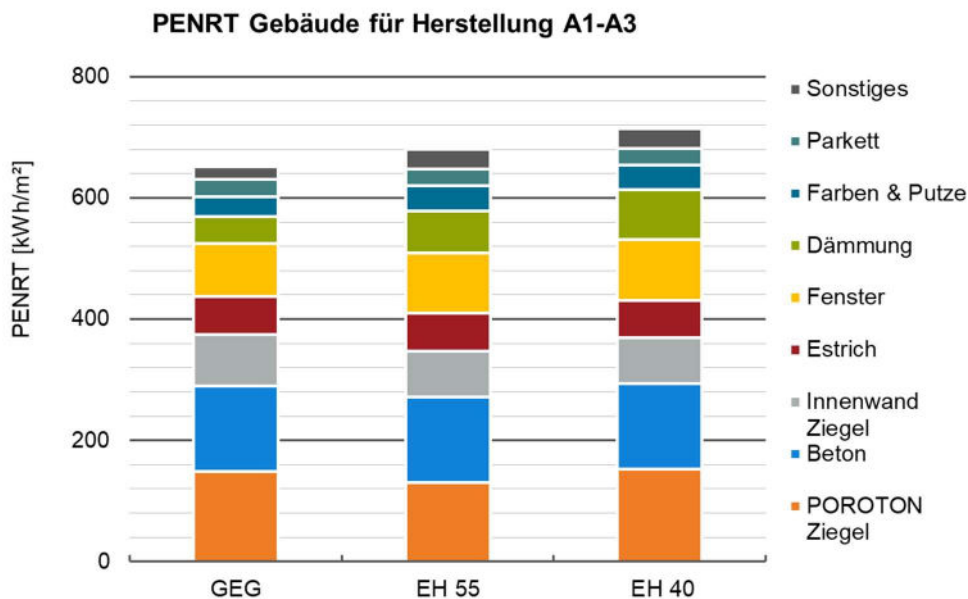


Abbildung 14: PENRT Herstellungsphase A1-A3 für das Gebäude nach Material

6.2 Ersatz B4 und Rückbau C3-C4 der Konstruktionen

Im Laufe der Zeit müssen verschiedenen Komponenten eines Gebäudes ersetzt oder erneuert werden. Diese zusätzlichen materiellen und energetischen Aufwendungen müssen bei der Ökobilanzierung für die Bewertung des gesamten Lebenszyklus mit berücksichtigt werden. Dafür werden die Lebensdauern aller Komponenten und Bauteilschichten berücksichtigt und ihre Erneuerungszyklen berechnet. Das genaue Vorgehen dazu ist in Kapitel 4.4.1 beschrieben. Nicht nur für die Herstellung und den Erhalt von Gebäuden sind Aufwendungen notwendig, sondern auch am Lebensende

beim Rückbau und der Entsorgung. Standardmäßig wird für solche Betrachtungen über den gesamten Lebenszyklus ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren angesetzt. Da das Beispielgebäude in einer massiven Bauweise und sehr langlebiger Tragkonstruktion ausgeführt ist, wird hier noch eine weitere Betrachtung mit dem Zeitraum 80 Jahre durchgeführt. In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind die Ergebnisse für GWP und PENRT jeweils pro m² Gebäudenutzfläche und Jahr dargestellt.

In beiden Auswertungen kann man erkennen, dass die Herstellungsphase mit Abstand für den größten Anteil sowohl beim GWP, als auch bei der PENRT am gesamten Lebenszyklus verantwortlich ist. Die Rückbauphase hat beim GWP einen deutlich größeren Anteil als bei PENRT. Dies liegt an der zum Teil thermischen Verwertung mancher Komponenten, bei der Treibhausgasemissionen freigesetzt werden.

Da die Ergebnisse pro Jahr angegeben sind, kann man den Einfluss einer längeren Nutzungsdauer von 50 auf 80 Jahren sehr deutlich erkennen. Der größte Anteil bei der Herstellung entfällt auf die massiven und tragenden Komponenten aus Beton und Ziegel wie Keller, Zwischendecken, Dach und Außenwand, welche jedoch eine Lebensdauer von 80 Jahren ohne Erneuerung gut überstehen. „Verteilt“ man diese auf eine größere Lebensdauer, wird der jährliche Einfluss immer kleiner, auch wenn während einer längeren Nutzungsdauer die Erneuerungszyklen einiger Komponenten (siehe „Ersatz B4“) ansteigen.

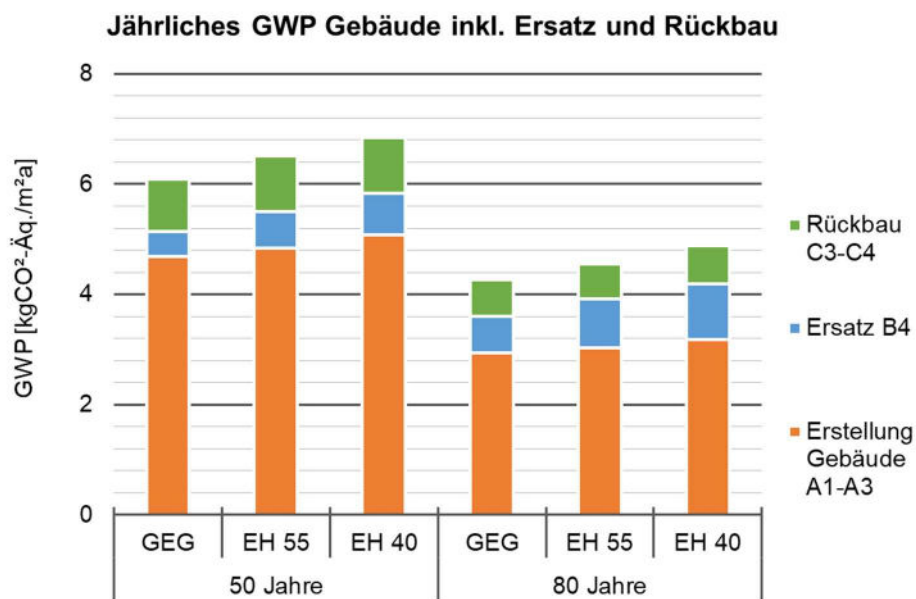


Abbildung 15: Jährliches GWP inkl. Ersatz und Rückbau für das Gebäude

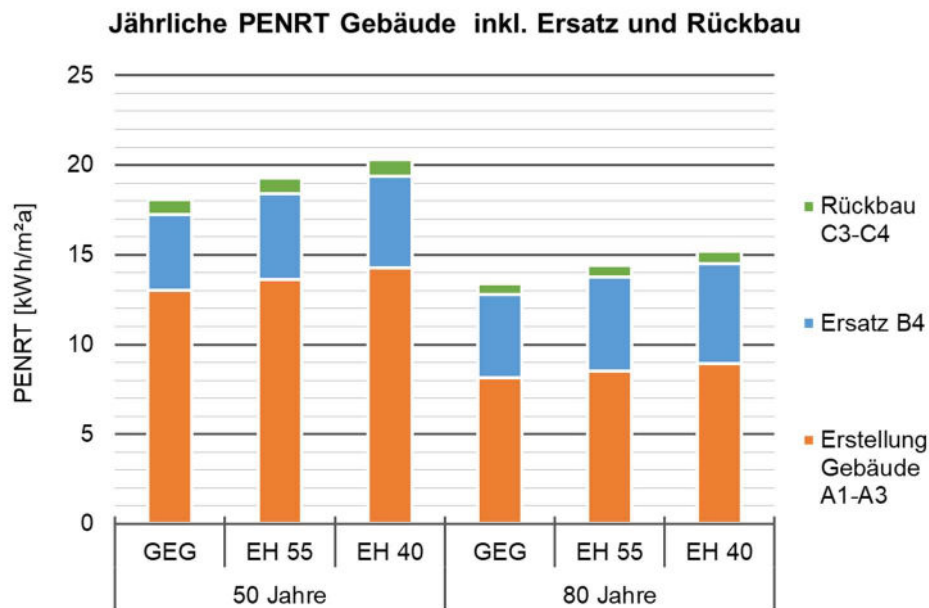


Abbildung 16: Jährliche PENRT inkl. Ersatz und Rückbau für das Gebäude

6.3 Ökobilanzierung der Gebäudetechnik

Das jährliche GWP und die jährliche nicht erneuerbare Primärenergie für die Anlagentechnik werden in den Abbildung 17 und Abbildung 18 für den Betrachtungszeitraum 50 Jahre dargestellt. Sowohl GWP als auch PENRT sind bei der Anlagentechnik deutlich niedriger als bei den Bauteilen. Aufgrund der kürzeren Erneuerungszyklen ist jedoch die Verteilung zwischen Herstellung und Ersatz deutlich stärker zum Ersatz hin verschoben im Vergleich zu den Bauteilen.

Die Photovoltaik-Anlage hat mit Abstand die größten Umweltwirkungen aller betrachteten Anlagenkomponenten. Schon ihre Herstellung alleine übersteigt die gesamten Umweltwirkungen aller anderen Anlagenvarianten. Die geringsten Werte zeigt die Fernwärme, bedingt durch eine kompakte Übergabestation und wenig Materialeinsatz.

Auf eine separate Auswertung der Ergebnisse für eine Betrachtung über 80 Jahre wird hier verzichtet. Aufgrund der geringeren Nutzungsdauern der technischen Komponenten, im Vergleich zu den langlebigen massiven Bauteilen, führt dies zu deutlich häufigeren Erneuerungszyklen. Da alle Komponenten im Laufe der Nutzungsdauer ausgetauscht werden müssen, kann hier kein Vorteil durch eine längere Lebensdauer erzielt werden.

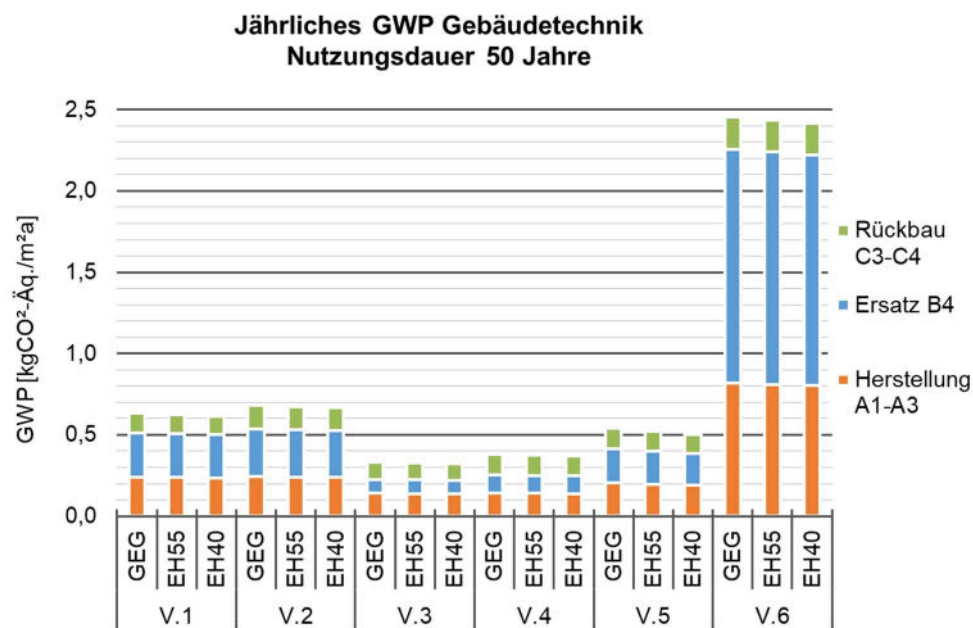


Abbildung 17: Jährliches GWP Gebäudetechnik für Nutzungsdauer 50 Jahre

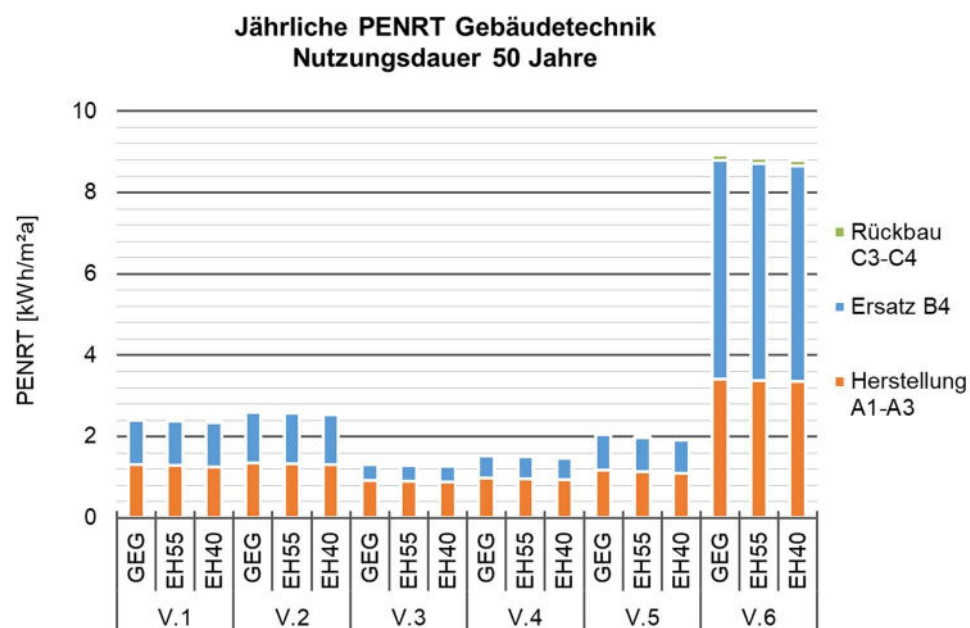


Abbildung 18: Jährliche PENRT Gebäudetechnik für Nutzungsdauer 50 Jahre

6.4 Herstellung des gesamten Gebäudes

Fügt man die Ergebnisse für die Herstellungsphase des Gebäudes aus Kapitel 6.1 und der Gebäudetechnik aus Kapitel 6.3 zusammen, kommt man zu den Auswertungen in Abbildung 19 und Abbildung 20. Darin ist das GWP und die PENRT für die konstruktiven Teile des Gebäudes in orange und die technische Ausrüstung in blau dargestellt. Es werden alle sechs betrachteten Technikkonzepte mit jeweils den drei energetischen Niveaus aufgezeigt. Auf den ersten Blick lässt sich erkennen, dass der

Anteil der Gebäudetechnik mit etwa 3 – 5 % beim GWP und 6 – 9 % bei der PENRT relativ gering ist. Ausnahme hierbei ist V.6 mit einem Anteil von ca. 14 % beim GWP und 19 % bei der PENRT. Der Grund hierfür liegt in der PV Anlage, welche ausschließlich in der V.6 zum Einsatz kommt.

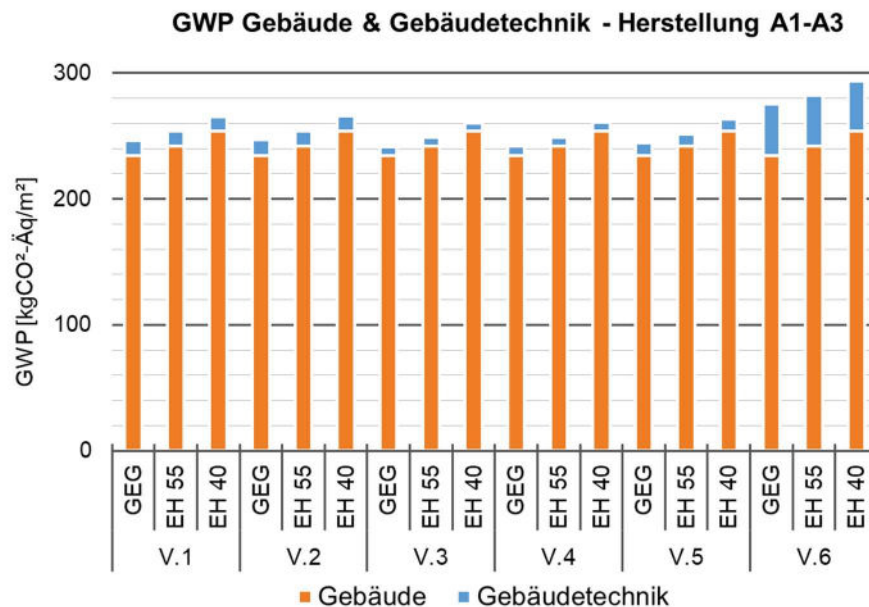


Abbildung 19: GWP Herstellungsphase A1-A3 für Gebäude und Gebäudetechnik

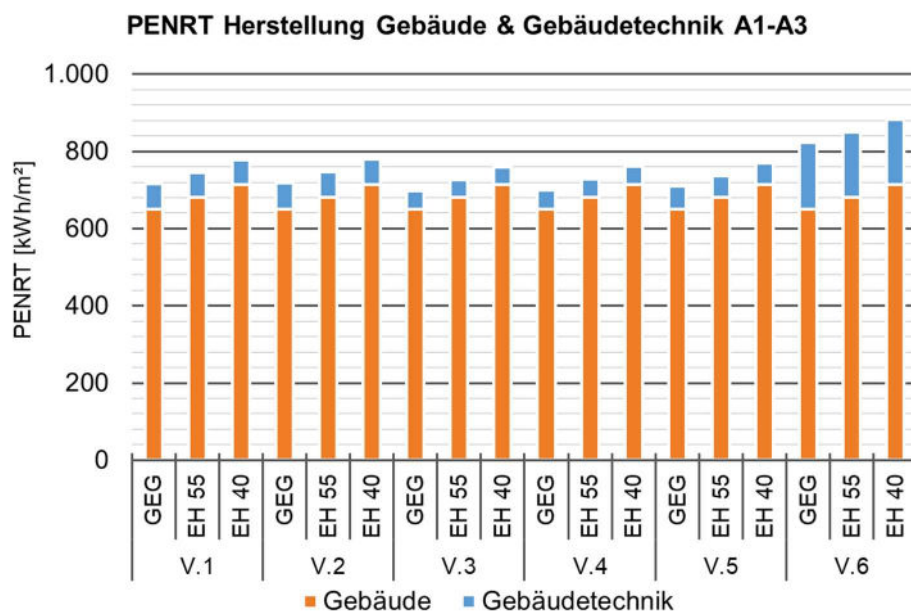


Abbildung 20: PENRT Herstellungsphase A1-A3 für Gebäude & Gebäudetechnik

6.5 Betrieb B6

Basierend auf den energetischen Berechnungen kann der Energiebedarf für den Betrieb des Gebäudes berechnet werden. Diese werden mithilfe der Primärenergiefaktoren und der Treibhausgasemissionen (THG) für die verschiedenen Energieträger berechnet. Die aktuellen Kennwerte sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Primärenergiefaktoren und GWP Kennwerte für 2021

Energieträger	Kennwerte 2021 (GEG) ^a	
	fP	THG [g/kWh]
Erdgas	1,1	240
Strom	1,8	560
Fernwärme	0,7	180

^a Die hier angegebenen spezifischen Kennwerte beziehen sich auf die **heizwert**bezogene Endenergie.
EnEV/GEG verwenden teils unterschiedliche energetische Bezüge (Heizwert ↔ Brennwert) in Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsverfahren und den Bilanzgrenzen (Endenergie ↔ Primärenergie).

- Energiebedarfsberechnungen nach dem EnEV-/GEG-referenzierten Berechnungsverfahren DIN V 18599 liefern **brennwert**bezogene Endenergiebeträge.
- Der Primärenergiebedarf nach EnEV/GEG ist abweichend dazu **heizwert**bezogen anzugeben.

Für die Technikvariante V.6 ist eine PV-Anlage vorgesehen. Die damit gewonnenen Erträge werden separat berechnet und ausgewiesen (vgl. Kapitel 4.3). In Abbildung 21 ist das jährliche GWP für den Betrieb der drei energetischen Niveaus und der sechs Technikvarianten dargestellt. Für die Technikvarianten mit dem Gasbrennwerttechnik (V.1 und V.2) ergeben sich im Vergleich die geringsten Treibhausgasemissionen.

Der Ertrag der PV-Anlage wird als Gutschrift neben den Bedarfswerten dargestellt. Diese Gutschrift ist unterteilt in die Eigennutzung des erzeugten Stroms für die technische Gebäudeausrüstung (TGA) und für den Haushalt. Je nach energetischem Niveau des Gebäudes, können durch die PV-Anlage 53 – 68 % der Treibhausgasemissionen wieder kompensiert werden. Es wird auch ein geringfügiger Überschuss erzielt. Dieser ist jedoch so gering, dass er graphisch nicht darstellbar ist.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse auf dieselbe Weise für die PENRT dargestellt. Hier schneiden die Varianten V.1 und V.2 mit der fossilen Wärmeerzeugung am schlechtesten ab. Auch hier wurden die Gutschriften durch die PV-Anlage separat ausgewiesen. Die „Einsparungen“ liegen hier in einem ähnlichen Bereich wie beim GWP.

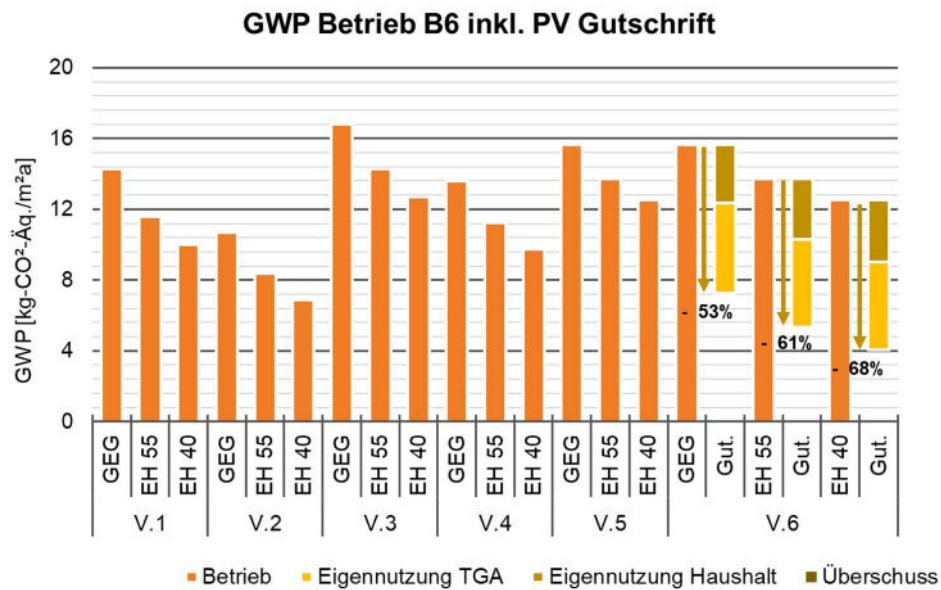


Abbildung 21: Jährliches GWP Betrieb B6 inkl. PV Gutschrift

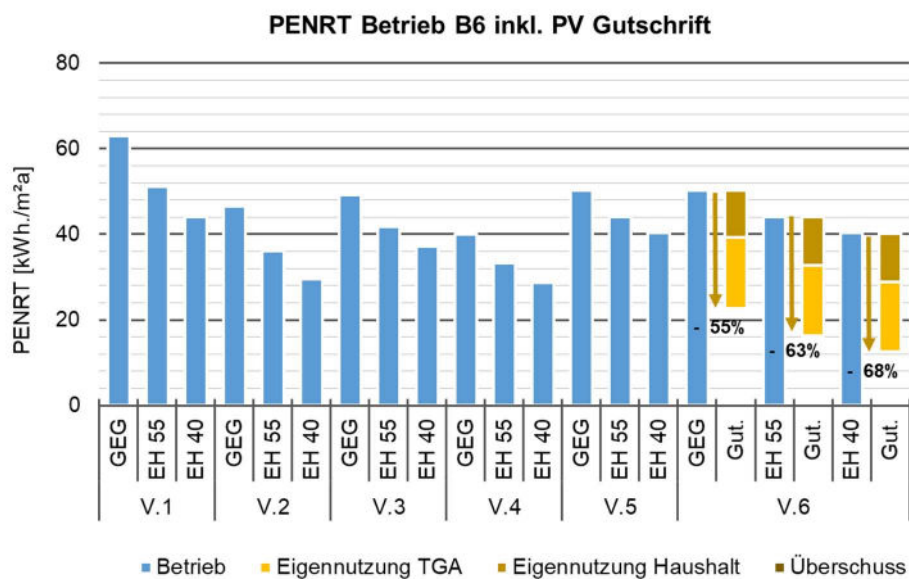


Abbildung 22: Jährliches PENRT Betrieb B6 inkl. PV Gutschrift

6.6 Auswertung der Ergebnisse über den gesamten Lebenszyklus

Fasst man die Ergebnisse der Ökobilanzierung über alle Lebensphasen von der Herstellung über den Ersatz, den Betrieb und den Rückbau zusammen, so lässt sich daraus eine Aussage zur gesamtenergetischen Nachhaltigkeit formulieren. In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind die Ergebnisse für das GWP und die PENRT pro Jahr und m² Nutzfläche dargestellt. Bei dieser Auswertung wird von einer Lebensdauer von 50 Jahren ausgegangen.

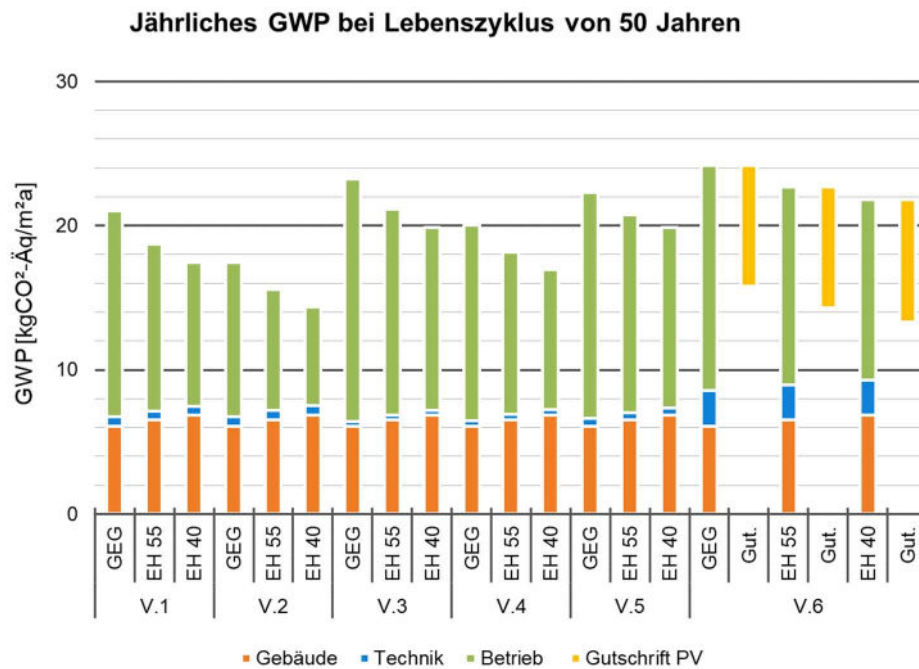


Abbildung 23: Jährliches GWP über gesamten Lebenszyklus

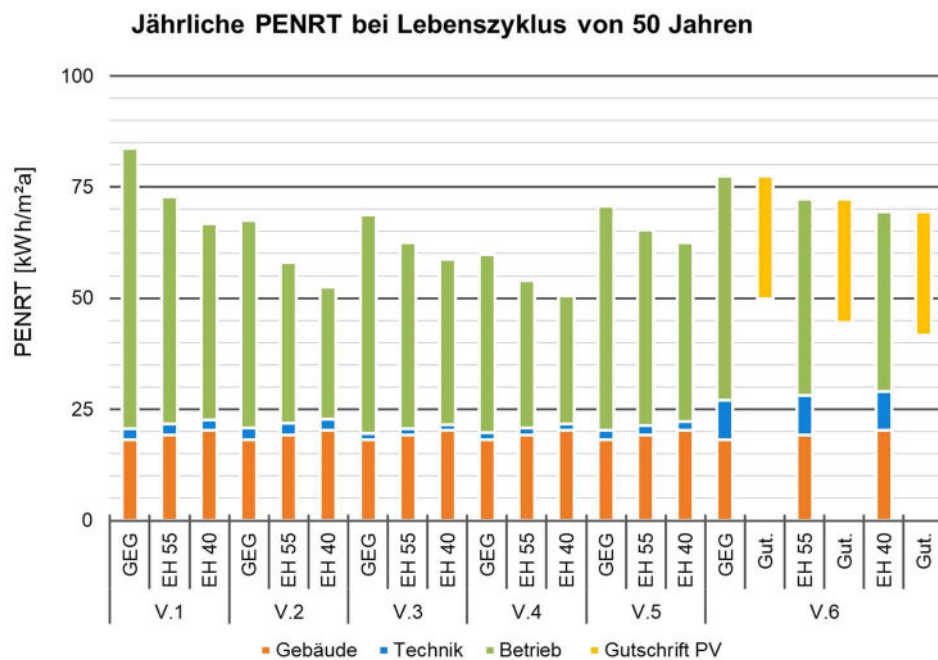


Abbildung 24: Jährliche PENRT über gesamten Lebenszyklus

Deutlich zu erkennen ist bei dieser Auswertung, dass der Betrieb in allen Varianten den größten Anteil sowohl am GWP, als auch an der PENRT besitzt. Die Unterschiede aufgrund der energetischen Standards sind innerhalb jeder Technikvariante von GEG, über EH 55 zu EH 40 dabei deutlich zu erkennen. Die „Aufwendungen“ für das Gebäude und Technik steigen mit dem erhöhten energetischen Standard nur leicht an, während der Betrieb deutlich sinkt. Daraus lässt sich gut ableiten, dass sich die höheren Aufwände bei der Herstellung (inkl. Erneuerungen und Rückbau) des

Gebäudes, durch besseren baulichen Wärmeschutz, am Ende über den Lebenszyklus durch die realisierte Einsparung an Heizenergie energetisch auszahlen. Für die Variante V.6 kann man bei dieser Auswertung erkennen, dass die zu erwartenden Gutschriften der PV-Anlage deutlich über dem Herstellungsaufwand liegen. Die energetische Amortisation erfolgt damit sehr schnell, auch wenn der Herstellungsaufwand im Vergleich zur sonstigen Anlagentechnik hoch ist.

6.7 Einfluss der angesetzten Lebensdauer des Gebäudes

Das untersuchte MFH wird in monolithischer Ziegelbauweise ausgeführt. Auch die anderen tragenden Bauteile der Innenkonstruktionen, wie Zwischendecke und Innenwände, sowie das Flachdach sind in massiver Bauweise ausgeführt. Gemäß den Angaben nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BBR 2011) kann man für diese Bauteile von einer Lebensdauer ≥ 50 Jahre ausgehen. Daher wird neben der üblichen Lebensdauer eines Gebäudes von 50 Jahren, auch eine Betrachtung von 80 Jahren durchgeführt.

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse für das GWP, in Abbildung 26 für PENRT für die drei betrachteten energetischen Niveaus GEG, EH 55 und EH 40 separat dargestellt. Für alle sechs Technikvarianten wird dabei jeweils das Ergebnis über den gesamten Lebenszyklus für die beiden betrachteten Lebensdauern von 50 und 80 Jahren nebeneinander dargestellt. Die Ergebnisse werden pro m^2 Nutzfläche und Jahr angegeben. Für den Anteil des Gebäudes und der Gebäudetechnik werden die zusätzlichen Erneuerungszyklen für die 80 Jahre Betrachtung berücksichtigt. Man kann erkennen, dass trotz der häufigeren Erneuerungen, die Ergebnisse pro Jahr bei der 80 Jahre Betrachtung deutlich niedriger ausfallen. Grund hierfür liegt in der langlebigen Bauweise des Gebäudes. Über die Lebensdauer müssen nur „geringfügige“ Komponenten, wie Dachdämmung, Putze und Anstriche erneuert werden. Die jährlichen Ergebnisse für den Betrieb bleiben in beiden betrachteten Lebensdauern gleich.



Abbildung 25: Jährliches GWP für 50 und 80 Jahre Lebensdauer GEG - EH55 - EH40

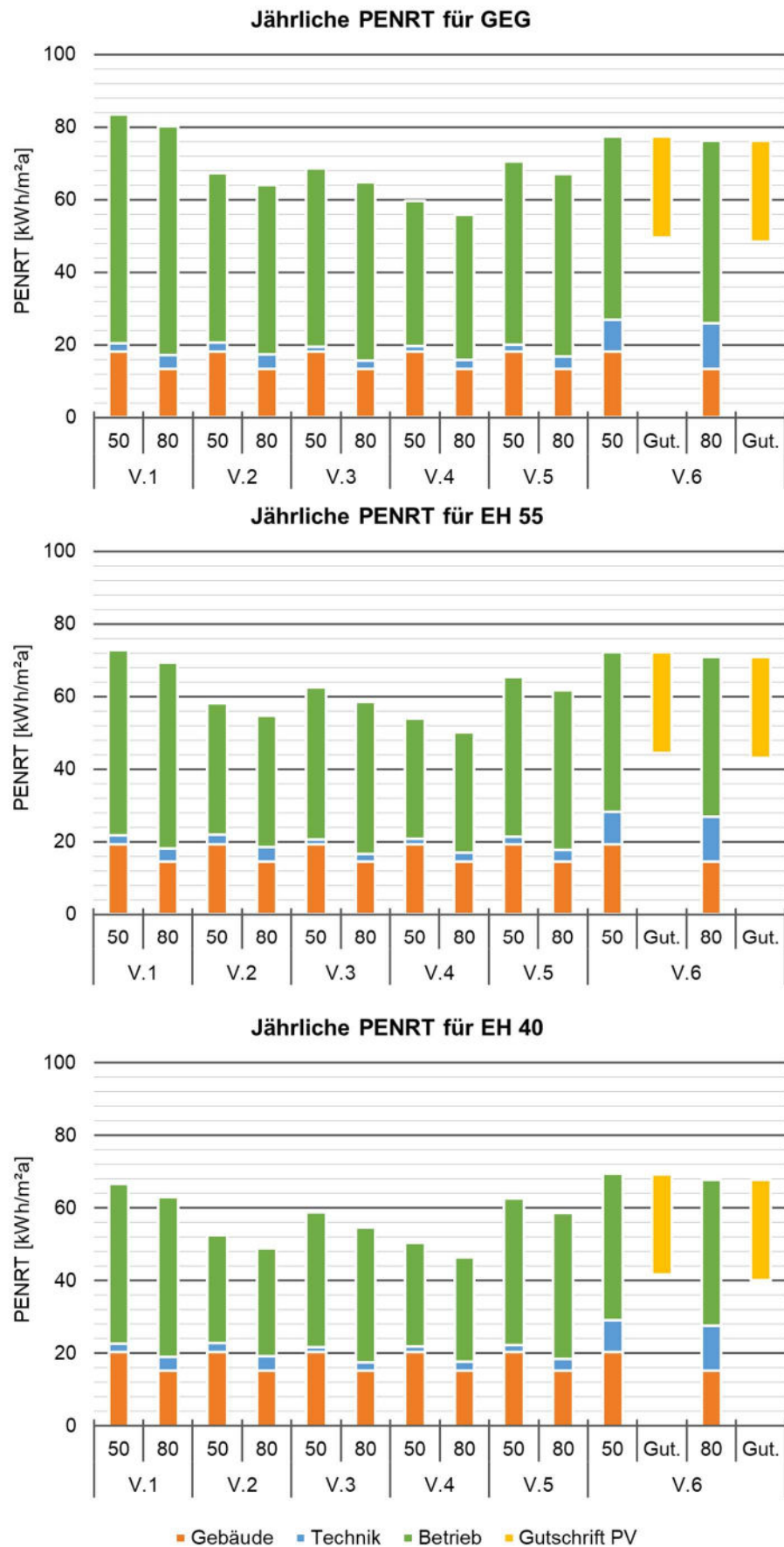


Abbildung 26: Jährliche PENRT für 50 und 80 Jahre Lebensdauer - GEG- EH55- EH40

6.8 Zukunftsszenario – Einfluss Primärenergiefaktoren

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden die oben beschriebenen Berechnungen zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen einmal für die aktuell gültigen Energieträgerkennwerte nach GEG vorgenommen und einmal für eine für die nächsten Jahre angenommene Entwicklung – der Ausblick orientiert sich an Werten für das Jahr 2030 aus der *Analyse von spezifischen Dekarbonisierungsoptionen zur Erreichung der Energie- und Klimaziele [...]* (Holm et al. 2021). Für fossiles Erdgas besteht praktisch kein Potential zur Verringerung des primärenergetischen Aufwands sowie der Treibhausgasemissionen. Demgegenüber kann bei der Erzeugung und Bereitstellung von Elektroenergie und Fernwärme von deutlichen Verringerungen ausgegangen werden – vordergründig machen sich hier die steigende Nutzung erneuerbarer Energien und technologische Entwicklungen und Effizienzsteigerungen bemerkbar.

Tabelle 20: Energieträgerkennwerte

Energieträger	Kennwerte 2021 (GEG)		Kennwerte 2030	
	fP	THG [g/kWh]	fP	THG [g/kWh]
Erdgas	1,1	240	1,1	240
Strom	1,8	560	1,0	321
Fernwärme	0,7	180	0,5	157

In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die Ergebnisse für GWP und PENRT für heute und für 2030 gegenübergestellt. Trotz des gleichbleibenden Faktors für Erdgas, zeigen sich in den Varianten mit Gasbrennwertkessel (V.1 und V.2) leichte Verbesserungen. Dies ist auf den Stromanteil dieser Technikvarianten zurückzuführen. Bei den Varianten mit Fernwärmeversorgung (V.3 und V.4) ist eine deutliche, bei den Varianten mit WP (V.5 und V.6) eine starke Reduzierung zu sehen.

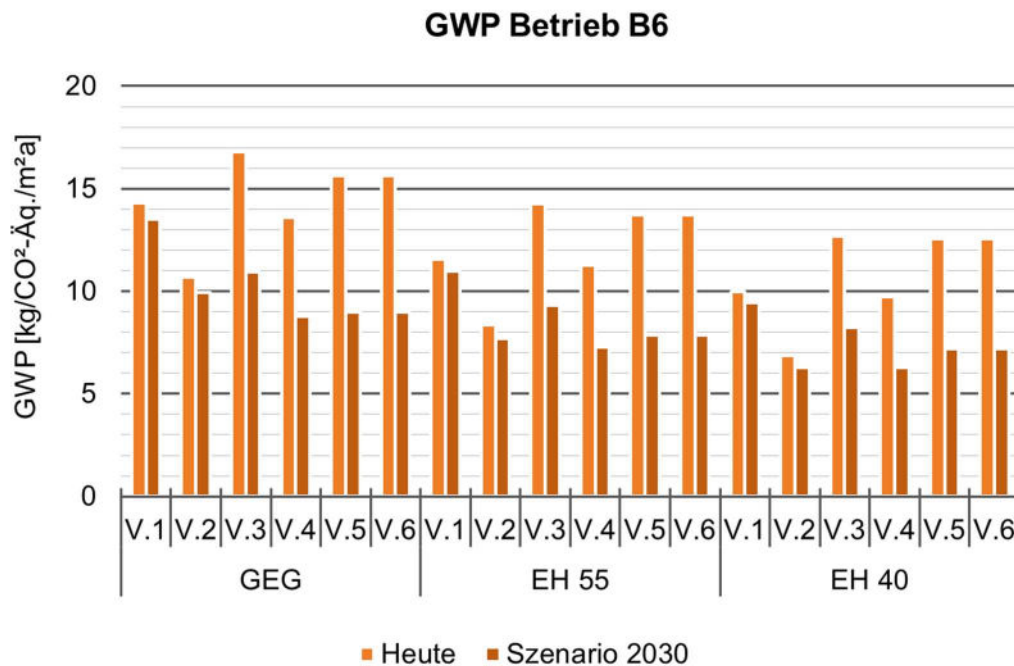


Abbildung 27: Jährliches GWP des Betriebs mit Faktoren für heute und 2030

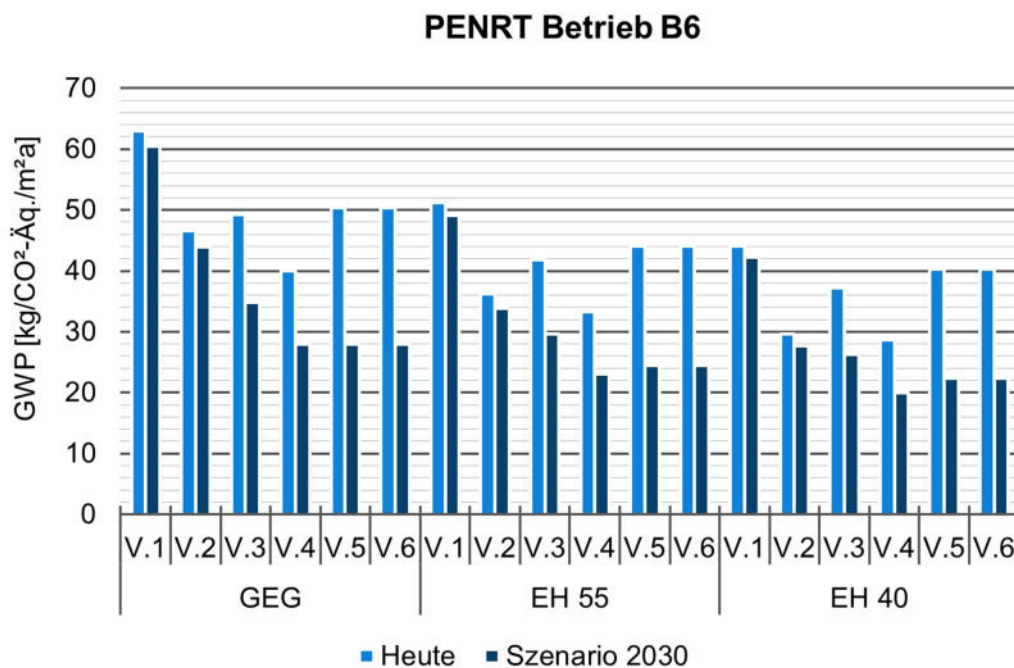


Abbildung 28: Jährliches PENRT im Betrieb für heute und 2030

Beispielhaft für das GEG-Gebäude sind in Abbildung 29 und Abbildung 30 die Ergebnisse für GWP und PENRT für das gesamte Gebäude über den ganzen Lebenszyklus dargestellt. Die Lebensdauer wurde bei dieser Auswertung mit 50 Jahren angesetzt. Die Werte für das Gebäude sind gleich, die Werte für die Gebäudetechnik innerhalb einer Variante ebenfalls.

Wie bei den vorangegangenen Auswertungen kann man bei den Varianten mit Gasbrennwertkessel nur geringfügige Veränderungen von heute zu 2030 erkennen. Bei den Varianten mit Fernwärmeversorgung (V.4 und V.5) sinkt der Anteil des Betriebs am gesamten Lebenszyklus von etwa 70 % auf 60 %. Durch diese Reduktion steigt der relative Anteil des Gebäudes von etwa 30 % auf 40 % an. Das bedeutet, dass durch die positive Veränderung der Energieversorgung die Bedeutung und der Einfluss des Gebäudes und dessen Konstruktion steigen. Dieser Effekt wird mit zunehmendem energetischem Niveau, aufgrund des ohnehin schon geringen Anteils des Betriebs, noch verstärkt.

Durch die Umstellung im Strom Mix 2030 ändern sich in der Nutzungsphase (Betrieb) jedoch nicht nur die Verbräuche. Auch die Gutschrift der PV-Anlage ändert sich. Diese spiegelt die Einsparungen durch dieselbe Menge an „verdrängten“ Standard- Strom Mix wider. Da dieser im Jahr 2030 niedrige Kennwerte für GWP und PENRT besitzt, verringert sich dadurch auch die Gutschrift.

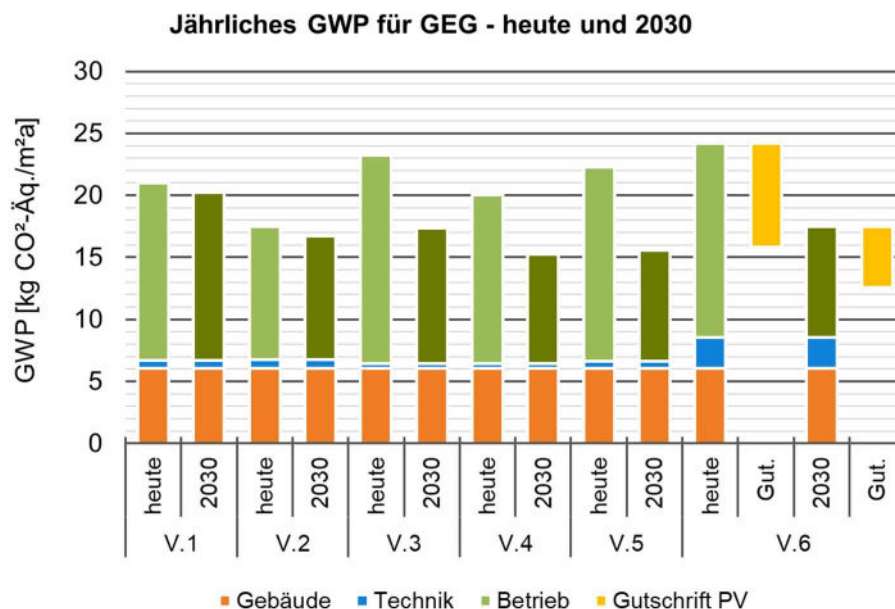


Abbildung 29: Jährliches GWP für GEG - Zukunftsszenario

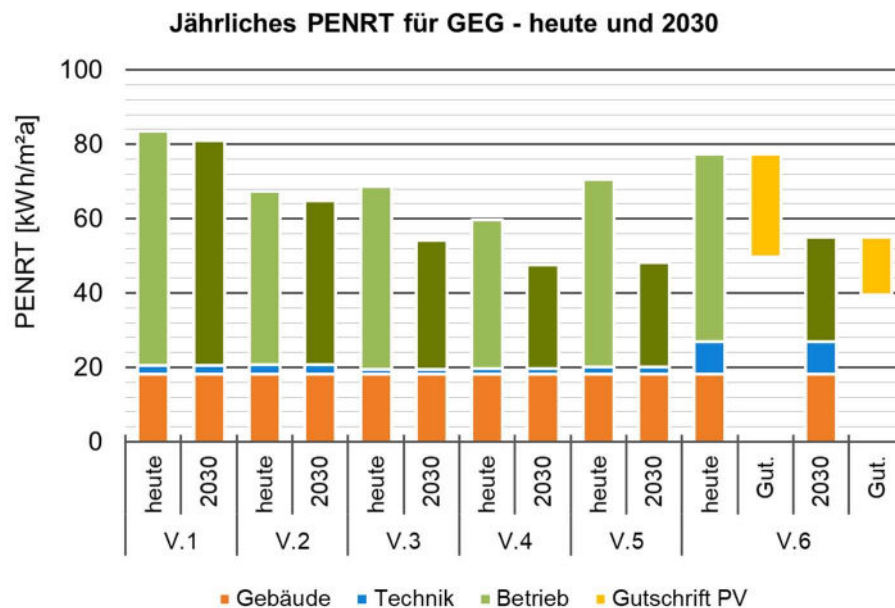


Abbildung 30: Jährliche PENRT für GEG - Zukunftsszenario

Für diesen Ausblick wurden allein die Primärenergiefaktoren und spezifischen Treibhausgasemissionen des Energiebedarfs der Nutzungsphase variiert. Zwar ist davon auszugehen, dass eine Verringerung des primärenergetischen Aufwands und der spezifischen Emissionen von Energieträgern – hier besonders Elektroenergie – sich zukünftig auch auf den Aufwand an Grauer Energie auswirkt. Allerdings lässt sich diese Entwicklung zum einen nur schlecht belastbar prognostizieren; zum anderen ist der Effekt für die vorliegende Betrachtung von deutlich geringerer Bedeutung als die Entwicklung des Energieaufwands der Nutzungsphase.

- Die Nutzung des Gebäudes und seiner Anlagentechnik erfolgt gleichmäßig über den gesamten Nutzungszeitraum. Änderungen der Energieversorgung, welche in diesem Zeitraum anfallen, haben damit zu jedem Zeitpunkt unmittelbaren Einfluss auf die Aufwände der Nutzung – d. h. die Nutzung verbraucht stets "tagesaktuelle" Energie.
- Demgegenüber wird der wesentlichste Anteil der grauen Energie – die Gebäudeerrichtung selbst – deutlich überwiegend nur einmalig zu Beginn des Betrachtungszeitraums aufgebracht. Zeitlich nachgelagerte Aufwendungen an Grauer Energie (z. B. für Ersatz, Rückbau und Entsorgung) fallen i. d. R. geringer bis deutlich geringer aus.

Nach der Gebäudeerrichtung eintretende Veränderungen der Energieversorgung haben damit deutlichen bis sehr deutlichen Einfluss auf den Energieaufwand der Nutzung, aber nur vergleichsweise geringen Einfluss auf den Gesamtaufwand an Grauer Energie über den Betrachtungszeitraum.

7 Fazit und Handlungsempfehlungen

Die Untersuchung des Typengebäude MFH hinsichtlich der Umweltwirkungen Graue Energie und GWP zeigt, dass durch die Verringerung des Energiebedarfs im Betrieb der Anteil des Energieaufwands für die Herstellung, Errichtung und Entsorgung immer mehr zunimmt. Was für vergangene energetische Standards der alten Wärmeschutzverordnungen noch ein vernachlässigbar kleiner Teil war – im Vergleich zu dem Anteil des Betriebs – sollte zukünftig bei der Planung und Errichtung von Gebäuden beachtet werden. Allerdings zeigt sich auch, dass insgesamt der energetische Aufwand und die Treibhausgasemissionen für die Errichtung und den Betrieb von Gebäuden durch den deutlich verbesserten Effizienzstandard bei der Hülle und der Anlagentechnik zurückgegangen ist.

Insgesamt haben vor allem die massiven Innenbauteile, Wände und Decken und der massive Keller den größten Anteil an der verbauten Grauen Energie und dem GWP. Trotz ihres hohen Anteils bei den Flächen sind die Werte der Grauen Energie für die POROTON Außenwände – beispielsweise im Vergleich zu den Fenstern mit ihrem deutlich kleineren Flächenanteil – vergleichsweise niedrig. Die Innenbauteile haben zusammen mit dem Keller etwa einen doppelt so großen Anteil an der gesamten Grauen Energie als die Außenwände aus POROTON Ziegeln. Damit ist auch der Hebel für die Reduzierung der Grauen Energie und der Treibhausgasemissionen bei den Außenwänden vergleichsweise gering.

Ebenso ist der Anteil der Gebäudetechnik (mit Ausnahme der PV-Anlage) an der Grauen Energie und dem GWP im Kontext des gesamten Gebäudes gering. Mehraufwendungen zur Effizienzsteigerung und Einsparungen, z.B. Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG im Vergleich zu einer Abluftanlage, zahlen sich durch die damit erzielten Einsparungen im Betrieb, aus energetischer Sicht, sehr schnell aus. Aus Sicht der Nachhaltigkeit ist es sehr sinnvoll mit einem sehr guten energetischen Standard für die Außenbauteile und mit sehr effizienter Anlagentechnik zu bauen.

Auch der hohe Anteil an Grauer Energie durch die Herstellung, Erneuerung und Entsorgung der PV-Anlage wird durch die erzielten Gutschriften schnell kompensiert. Zu beachten ist jedoch, dass diese Gutschrift sich auf den nicht-erneuerbaren Anteil des Stroms bezieht und damit in der Zukunftsbetrachtung mit deutlich weiter dekarbonisiertem Strom kleiner ausfallen wird.

Bei allen betrachteten anlagentechnischen Varianten V.1 bis V.6 zeigt sich mit verbessertem Wärmeschutzniveau eine Verringerung der spezifischen jährlichen nicht erneuerbaren Primärenergie. Damit überwiegt die im Betrieb realisierte Energieeinsparung die zusätzlichen Aufwendungen von Grauer Energie für die Bauteile mit höherem Wärmeschutzniveau bei weitem. Die Reduzierung des Heizwärmebedarfs zahlt sich damit über dem Lebenszyklus gegenüber der mehr aufgewendeten Grauen Energie deutlich aus. Das trifft gleichermaßen auch auf die Treibhausgasemissionen zu.

Für Investoren und Bauherren zeigt das, dass ein nachhaltiges und zukunftsicheres Gebäude einen sehr guten Wärmeschutz haben sollte und energieeffiziente Anlagentechnik. Die Berücksichtigung der Grauen Energie bei der Planung von Gebäuden erscheint aus der Gesamtbetrachtung der Nachhaltigkeit sinnvoll, sie sollte jedoch keinesfalls gegen einen guten Wärmeschutz ausgespielt werden. Wobei eine sehr wissenschaftlich detaillierte und genaue Berücksichtigung der Grauen Energie beim Nachweis nach GEG den Planungsaufwand deutlich erhöht und vermieden werden sollte. Aus Sicht der Bearbeiter ist eine einfache pauschale Berücksichtigung über die Bauweise, die eingesetzte Anlagentechnik und das Wärmeschutzniveau ausreichend und zielführend.

8 Abkürzungsverzeichnis / Glossar

A	Bezugsfläche
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches institut für Normung
EG	Erdgeschoss
EH 55	Effizienzhaus 55
EH 40	Effizienzhaus 40
EPD	Environmental Product Declaraion (Umwelt Produkt Deklaration)
EPS	Expandiertes Polystyrol
F_x	Temperaturkorrekturfaktor
GEG	Gebäudeenergiegesetz – Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden
GWP	Global Warming Potentialial / Treibhausgasemissionen
H_T	Transmissionswärmeverlust
H_T'	Spezifischer Transmissionswärmeverlust
MFH	Mehrfamilienhaus
n_{50}	Luftwechselrate bei einer Druckdifferenz von 50 Pascal
OG	Obergeschoss
PENRT	Totale Nichterneuerbare Primärenergie (engl. Primary Energy Not Renewable Total)
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
Q_P	Primärenergiebedarf
Q_P'	Spezifischer Primärenergiebedarf
Ref	Referenzgebäude
Soll	Zielwert
THG	Treibhausgasemissionen
TGA	Technische Gebäude Ausrüstung
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
WLG	Wärmeleitgruppe
WP	Wärmepumpe
XPS	Extrudiertes Plystyrol

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anforderungen und Dimensionierung der Gebäudehülle	5
Tabelle 2:	Zusammenfassung der untersuchten Gebäudetechnikvarianten	6
Tabelle 3:	Daten des Gebäudemodells in Anlehnung an das Typengebäude	18
Tabelle 4:	Kennwerte GWP und PENRT aus EPD und Umrechnungsfaktoren	24
Tabelle 5:	Komponenten Wärmeerzeugung in Abhängigkeit von der Versorgungsvariante	26
Tabelle 6:	Komponenten Wärmeverteilung/ übergabe und Wasserverteilung, einheitlich für alle Versorgungsvarianten	27
Tabelle 7:	Komponenten Lüftung in Abhängigkeit von der Versorgungsvariante	27
Tabelle 8:	Komponenten Photovoltaik in Abhängigkeit von der Versorgungsvariante	27
Tabelle 9:	Erzeugerleistung Modellgebäude, gerundet	28
Tabelle 10:	Auswahl Lebensdauern und Erneuerungszyklen einzelner Bauteilschichten	29
Tabelle 11:	Auswahl Lebensdauern und Erneuerungszyklen wesentlicher anlagentechnischer Komponenten	30
Tabelle 12:	Anforderungen der Standards an den Transmissionswärmeverlust und den Primärenergiebedarf	31
Tabelle 13:	Dimensionierung der Gebäudehülle für die Variante nach GEG 2020 Standard	32
Tabelle 14:	Dimensionierung der Gebäudehülle für die Variante nach EH 55 Standard (fettgedruckt sind die gegenüber der vorhergehenden Tabelle geänderten Bauteile zum Erreichen des EH 55 Standards)	33
Tabelle 15:	Dimensionierung der Gebäudehülle für die Variante nach EH 40 Standard (fettgedruckt sind die gegenüber der vorhergehenden Tabelle geänderten Bauteile zum Erreichen des EH 40 Standards)	34
Tabelle 16:	Versorgungsvarianten Modellgebäude	35
Tabelle 17:	Zielwerte zur Auslegung der Gebäudehülle und Anlagentechnik	36
Tabelle 18:	Berechnung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes je nach Standard	37
Tabelle 19:	Primärenergiefaktoren und GWP Kennwerte für 2021	47
Tabelle 20:	Energieträgerkennwerte	53

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich der Grauer Energie nach Bauteilen und Material	7
Abbildung 2: PENRT über den gesamten Lebenszyklus pro m ² Nutzfläche für 50 Jahre Nutzungsdauer	9
Abbildung 3: PENRT über den gesamten Lebenszyklus pro m ² Nutzfläche für 80 Jahre Nutzungsdauer	9
Abbildung 4: Entwicklung des Energiesparenden Bauens in Deutschland und Anteile an den Wärmeverlusten – mittlerer Endenergiebedarf typischer EFH-Wohngebäude	12
Abbildung 5: Qualitative Darstellung der Entwicklung des Primärenergiebedarfs eines typischen Gebäudes im Laufe der Zeit. Dargestellt sind die absoluten Anteile für Nutzerstrom, Raumwärme inklusive Warmwassererzeugung, sowie der Primärenergieeinsatz des Gebäudes für die Herstellungsphase der verwendeten Bauprodukte.	14
Abbildung 6: Schematisches Vorgehen im Rahmen der Studie	16
Abbildung 7: Ansicht des Typengebäudes	18
Abbildung 8: Phasen des Lebenszyklus, Eigene Darstellung nach DIN EN 15804 (DIN EN 15804:2014-07)	22
Abbildung 9: Transmissionswärmeverluste der Außenbauteile je Standard	38
Abbildung 10: Primärenergiebedarf der Varianten im Vergleich zu den Zielwerten der Standards	39
Abbildung 11: GWP Herstellungsphase A1-A3 für das Gebäude nach Bauteilen	40
Abbildung 12: PENRT Herstellungsphase A1-A3 für das Gebäude nach Bauteilen	41
Abbildung 13: GWP Herstellungsphase A1-A3 für das Gebäude nach Material	42
Abbildung 14: PENRT Herstellungsphase A1-A3 für das Gebäude nach Material	42
Abbildung 15: Jährliches GWP inkl. Ersatz und Rückbau für das Gebäude	43
Abbildung 16: Jährliche PENRT inkl. Ersatz und Rückbau für das Gebäude	44
Abbildung 17: Jährliches GWP Gebäudetechnik für Nutzungsdauer 50 Jahre	45
Abbildung 18: Jährliche PENRT Gebäudetechnik für Nutzungsdauer 50 Jahre	45
Abbildung 19: GWP Herstellungsphase A1-A3 für Gebäude und Gebäudetechnik	46
Abbildung 20: PENRT Herstellungsphase A1-A3 für Gebäude & Gebäudetechnik	46
Abbildung 21: Jährliches GWP Betrieb B6 inkl. PV Gutschrift	48
Abbildung 22: Jährliches PENRT Betrieb B6 inkl. PV Gutschrift	48
Abbildung 23: Jährliches GWP über gesamten Lebenszyklus	49
Abbildung 24: Jährliche PENRT über gesamten Lebenszyklus	49

Abbildung 25: Jährliches GWP für 50 und 80 Jahre Lebensdauer GEG - EH55 - EH40	51
Abbildung 26: Jährliche PENRT für 50 und 80 Jahre Lebensdauer - GEG- EH55- EH40	52
Abbildung 27: Jährliches GWP des Betriebs mit Faktoren für heute und 2030	54
Abbildung 28: Jährliches PENRT im Betrieb für heute und 2030	54
Abbildung 29: Jährliches GWP für GEG - Zukunftsszenario	55
Abbildung 30: Jährliche PENRT für GEG - Zukunftsszenario	56

11 Literatur

ArGe MZ (2020): Ziegel Wärmebrückenkatalog 5.0: Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel e. V. Online verfügbar unter <https://www.lebensraum-ziegel.de/presse/presse-detail/artikel/news/ziegel-waermebrueckenkatalog-50.html>.

BBR (Hg.) (2011): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.

BMI (Hg.) (2021): ÖKOBAUDAT. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. Online verfügbar unter <https://www.oekobaudat.de/>.

BMU (2017): Klimaschutzplan 2050. Hg. v. BMU. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>.

BMWi (2010): Energiekonzept für eine umwelt schonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 09.07.2018.

DIN V 18599:2018-09, 09/2018: Energetische Bewertung von Gebäuden.

Eurostat (2016): Eurostat 2016. Eurostat. Online verfügbar unter <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>.

GEG:2020-08-08: Gebäudeenergiegesetz.

SIA 2032, 08-2020: Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden.

Hertwich, E.; Lifset, R.; Pauliuk, S.; Heeren, N. (2020): Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. Hg. v. IRP.

Holm, Andreas H.; Oschatz, Bert; Thamling, Nils (2021): Analyse von spezifischen Dekarbonisierungsoptionen zur Erreichung der Energie- und Klimaziele 2030 und 2050 bei unterschiedlichen Wohn- und Nichtwohngebäudetypologien. Unter Mitarbeit von Christoph Sprengard, Wolfgang Schmidt, Bernadetta Winiewska, Bettina Mailach, Jens Rosenkranz, Dominik Rau et al. Hg. v. BMWi. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/dekarbonisierungsoptionen-zum-erreichung-der-energie-und-klimaziele-2030-2050%20bei-wohn-und-nichtwohn-gebaeudetypologien.pdf?__blob=publicationFile&v=10.

IBU (Hg.) (2019): Umweltproduktdeklaration Perlitgefüllte POROTON Ziegel. Deklarationsnummer: EPD-POT_20180161-IBC1-DE. Institut Bauen und Umwelt. Online verfügbar unter www.oekobaudat.de.

KfW (2015): Infoblatt KfW Wärmebrückenbewertung. Online verfügbar unter [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/Arbeitshilfen-Pr%C3%A4sentationen/Arbeitshilfen/Infoblatt_KfW-Waermebrueckenbewertung.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/Arbeitshilfen-Pr%C3%A4sentationen/Arbeitshilfen/Infoblatt_KfW-Waermebrueckenbewertung.pdf), zuletzt geprüft am 29.03.2021.

Lichtmeß, Markus (2016): Vereinfachte Bestimmung der Eigenstromnutzung von PV-Anlagen in einer Monatsbilanz für Wohngebäude. Studie mit Unterstützung des Wirtschaftsministeriums Luxemburg. Hg. v. Goblet Lavandier & Associates. Luxemburg.

DIN EN 15978, 2012-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken.

DIN EN 15804:2014-07: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.

DIN EN 15804:2020-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.

DIN EN ISO 14040:2009-11: Umweltmanagement - Ökobilanz- Grundsätze und Rahmenbedingungen.

DIN EN ISO 14044:2006-10: Umweltmanagement - Ökobilanzierung - Anforderungen und Anleitungen.

Walberg, Dietmar; Brosius, Oliver; Schulze, Thorsten; Cramer, Antje (2017): Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden. Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht. Hg. v. DGfM. Berlin. Online verfügbar unter https://www.dgfm.de/fileadmin/downloads/02_Technik_Normung/Studien/ARGE-Kiel-Studie-Massiv-Holz-08-01-2015.pdf.

Walberg, Dietmar; Gniechwitz, Timo; Schulze, Thorsten; Cramer, Antje (Hg.) (2014): Optimierter Wohnungsbau. Untersuchung und Umsetzungsbetrachtung zum bautechnisch und kostenoptimierten Mietwohnungsbau in Deutschland. Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen. Kiel: Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (Bauforschungsbericht, 66).

VDI 2067 Blatt 1, 2012: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung.



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

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

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des
Wärme- und Feuchteschutzes

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