

Ökobilanz von Einfamilienhäusern in moderner Ziegel- und Holzbauweise

FIW München:

Andreas Holm

Christine Maderspacher

Im Auftrag vom

Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.

Reinhardstr. 12-16

10117 Berlin



FIW München

Forschungsbericht FO-2021/04

FO-2021/04

Ökobilanz von Einfamilienhäusern in moderner Ziegel- und Holzbauweise

Der Bericht umfasst:
36 Seiten
0 Seiten Anhang

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

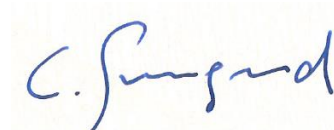
Gräfelfing, den 28. September 2021

Institutsleiter



Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm

Abteilungsleiter



Christoph Sprengard

Bearbeiter



Christine Maderspacher

Inhaltsverzeichnis

1	Fragestellung	4
2	Hintergrund	5
3	Nachhaltigkeitsbewertung	8
3.1	Grundlagen der Ökobilanzierung von Gebäuden	8
3.2	Definition Ziel und Untersuchungsrahmen	9
3.3	Sachbilanz	9
3.4	Wirkungsabschätzung	9
3.5	Auswertung	10
4	Beispielgebäude und Varianten	11
4.1	Geometrie und Flächen	11
4.2	Varianten energetisches Niveau	14
4.3	Untersuchte Konstruktionen	14
5	Ergebnisse Ökobilanzierung	18
5.1	Auswertung der Ergebnisse auf Bauteilebene	18
5.2	Anteile der Komponenten über den gesamten Lebenszyklus für EH 55 Standard	20
5.3	Gebäudetechnik	23
5.4	Einfluss des energetischen Niveaus	25
5.5	Vergleich 50 zu 80 Jahren Nutzungsdauer	27
5.6	Betrachtung Betriebsphase und mögliche Einsparungen	29
6	Zusammenfassung und Fazit	31
7	Tabellenverzeichnis	34
8	Abbildungsverzeichnis	35
9	Literaturverzeichnis	36

1 Fragestellung

Im Rahmen dieser Studie wird eine vergleichende ökobilanzielle Untersuchung über den gesamten Lebenszyklus von Einfamilienhäusern in monolithischer Ziegel- und Holzständerbauweise in Abhängigkeit des energetischen Niveaus 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-EFH der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE Kiel e.V.) verwendet. Es ist repräsentativ in Größe und Ausstattung für den aktuellen Neubaustandard in Deutschland.

Neben einer monolithischen Ziegelbauweise, mit unverfüllten sowie mit Dämmstoff gefüllten Ziegeln, wird eine gängige Variante in Holzständerbauweise mit Mineralfaserdämmung untersucht. Für die Innenbauteile, Zwischendecke und Raumtrennwände, gibt es wiederum zwei Varianten, Ziegelbauweise und Holzleichtbau.

Neben der Variation der Konstruktionsarten, werden drei verschiedene energetische Niveaus betrachtet. Zusätzlich zur Basisvariante nach GEG (Gebäudeenergiegesetz), werden zwei ambitioniertere Varianten, der Effizienzhausstandard 55 und 40 (EH55 und EH40), betrachtet.

Mit Hilfe dieser Variantenstudie kann eine Aussage gemacht werden, inwieweit sich der ökobilanzielle „Mehraufwand“ in die thermische Optimierung der Gebäudehülle im Vergleich zu den dazu generierten Einsparungen in der Betriebsphase, lohnt.

2 Hintergrund

Mit der Ende Juni 2021 beschlossenen Änderung des Klimaschutzgesetzes will Deutschland bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral werden. Bereits bis zum Jahr 2030 sollen die Emissionen um 65% gegenüber 1990 gesenkt werden. Dazu soll der Gebäudesektor durch massive Einsparung von Primär- bzw. Endenergie und die verstärkte Nutzung von Erneuerbaren Energien beitragen. Für die Verringerung des aus der Beheizung des Wohnraumes resultierenden CO₂-Ausstoßes stehen im Prinzip zwei Methoden zur Verfügung. Eine ist es, auf nachhaltige Heizungssysteme wie z.B. eine Biomassefeuerung oder eine teilsolare Heizung umzusteigen. Dies hat zwar den Vorteil, dass hierdurch die CO₂-Bilanz erheblich verbessert wird, aber der absolute Heizenergieverbrauch unverändert bleibt. Ein zweiter Ansatz ist die Verringerung des Energieverbrauchs durch eine Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäudehülle. Durch die Kombination von nachhaltigen Energieressourcen und einer energieoptimierten Bauweise entstehen so sehr energieeffiziente Wohnräume.

Infokasten

Bisher richtet der normative Rahmen zur energetischen Bilanzierung von Gebäuden seinen Fokus auf die Betriebs- bzw. Nutzungsphase des Gebäudes, indem die Verbrauchs- bzw. Bedarfswerte als wesentliche Kenngrößen verwendet werden. Aufwendungen für die Herstellung der Bauprodukte, die Errichtung des Gebäudes und die letztlich notwendige Entsorgung sind darin nicht enthalten.

Mit dem am 31. August 2021 in Kraft getretenen Klimaschutzgesetz wurde die Treibhausgasneutralität von Deutschland bis zum Jahr 2045 festgelegt. Bereits im 2017 veröffentlichten Klimaschutzplan 2050 (BMU 2017) wurde das Ziel formuliert, „den Einsatz nachhaltiger Bau- und Dämmstoffe zu stärken. Dabei sollen auch vor- und nachgelagerte Klimaschutzaspekte – also Emissionen, die bei der Herstellung, der Verarbeitung, der Entsorgung oder der Wiederverwertung von Baustoffen entstehen – auf Basis frei verfügbarer Ökobilanzdaten berücksichtigt werden. Außerdem sollen Instrumente zur stärkeren Einbeziehung des gesamten Lebenszyklus („Cradle to Grave“ oder „Cradle to Cradle“) von Baumaterialien überprüft und stärker in die Praxis der Bauplanung mit einbezogen werden.“

Das würde aber in der praktischen Konsequenz bedeuten, dass die von vielen heute schon häufig beklagte, hohe Komplexität bei der energetischen Bewertung von Gebäuden um weitere relevante Phasen im Lebenszyklus erweitert werden müsste. Erst eine Ausweitung der Bilanzgrenzen über den Betrieb hinaus erlaubt eine vollständige Bewertung der Nachhaltigkeit auf Gebäudeebene. In diesem Zusammenhang fällt häufig auch der Begriff der so genannten „Grauen Energie“. Darunter wird meist jener Energiebedarf verstanden, der nötig war, um die Materialien herzustellen, an die Baustelle zu transportieren und zu verbauen. Der „Grauen Energie“ wird bei den üblichen energetischen Betrachtungen im Bausektor meist geringeres Interesse zuteil. Besonders energieeffiziente Bauweisen wie z.B. das Passivhaus erfordern jedoch durch

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

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.

Primärenergiebedarf für Gebäude erbaut um ...

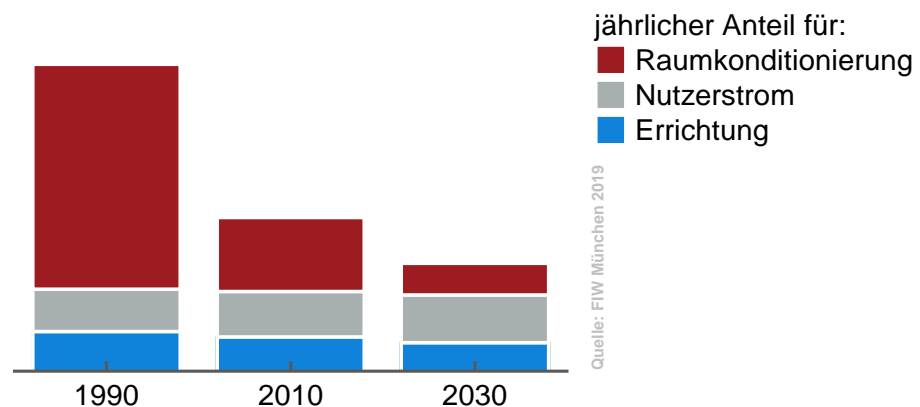


Abbildung 1: Qualitative Darstellung der Entwicklung des Primärenergiebedarfs eines typischen Gebäudes im Laufe der Zeit. Dargestellt sind die absoluten Anteile für Nutzerstrom, Raumwärme inklusive Warmwassererzeugung, sowie der Primärenergieeinsatz des Gebäudes für die Herstellungsphase der verwendeten Bauprodukte.

Abbildung 1 zeigt qualitativ diese Entwicklung des gesamten 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 üblich 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.

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

3 Nachhaltigkeitsbewertung

3.1 Grundlagen der Ökobilanzierung von Gebäuden

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 erfasst werden, beginnend bei der Rohstoffbereitstellung, über die Herstellung, Nutzung bis zur Verwertung am Lebensende.

Nachfolgend sind die in der (DIN EN 15804:2020-03) definierten Lebenszyklusphasen dargestellt. Die in Abbildung 2 grau hinterlegten Phasen wurden im Rahmen dieser Berechnungen mit einbezogen.

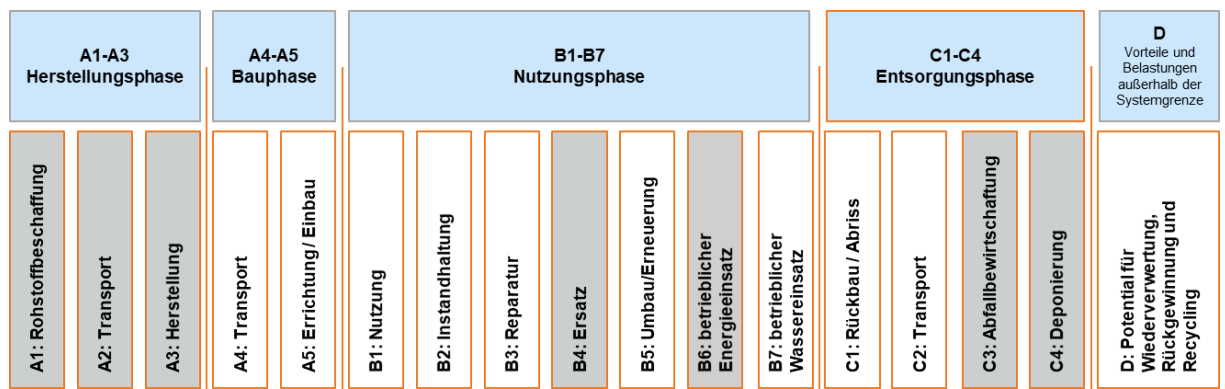


Abbildung 2: Phasen des Lebenszyklus, Eigene Darstellung nach DIN EN 15804

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.

3.2 Definition Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel dieser Studie ist die Bewertung eines beispielhaften EFH. 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 Ersatz- und Betriebs- (B4 und B6) sowie die Lebensendphase (C3 und C4) berücksichtigt werden. In der Regel wird für Gebäude bei der Betrachtung der Umweltwirkungen nur eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angesetzt. Dies ist eine eher konservative Annahme. Die in Rahmen dieser Studie berücksichtigten Tragkonstruktionen sind sehr langlebig und können durchaus über eine längere Zeitspanne genutzt werden. Daher wird zusätzlich eine weitere Betrachtung über 80 Jahre vorgenommen. Als einheitliche Bezugsgröße werden die Ergebnisse dieser Studie auf 1 m² Gebäudenutzfläche und Jahr 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.

3.3 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 der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen. Außerdem werden die Materialien, Konstruktionen und Komponenten für alle Bauteile und Gebäudetechnikkomponenten definiert. Diese sind detailliert in Kapitel 4 zusammengefasst.

3.4 Wirkungsabschätzung

Hierfür wird als Datengrundlage die Ökobaodat (Version: 2021-II vom 25.06.2021) verwendet (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat). Die Ökobaodat 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. Für die beiden betrachteten Ziegelbauweisen (ungefüllt und mit Dämmstoff gefüllt) wurden die aktuellen Umweltproduktdeklarationen nach

der neuen DIN 15084+A2 verwendet (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. 2021b, 2021a). Im Rahmen dieser Studie werden die folgenden Wirkindikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit herangezogen:

Globales Treibhauspotential (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 Kilogramm CO₂-Äquivalente (kg CO₂-Äq.) angegeben.

Gesamteinsatz erneuerbare Primärenergie (PERT)

Primärenergie und die als Rohstoff verwendeten erneuerbaren Primärenergieträger aus erneuerbaren, nicht fossilen Quellen, z.B. Windenergie, Sonnenenergie, Wasserkraft, Biomasse, etc. Im Rahmen dieser Studie wird die Kenngröße zur besseren Vergleichbarkeit mit den Verbrauchskennwerten in kWh angegeben, die reguläre Einheit ist MJ.

Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie (PENRT)

Primärenergie und die als Rohstoff verwendeten nicht erneuerbaren Primärenergieträger, welche in einer begrenzten Menge vorliegen und im menschlichen Zeithorizont nicht wiederherstellbar sind. Dieser Indikator wird auch als „**Graue Energie**“ bezeichnet. Dieser Begriff stammt ursprünglich aus der Schweiz. Hierzulande ist er allerdings nicht eindeutig definiert und wird deshalb auch unterschiedlich verwendet bzw. interpretiert. Nach der Schweizer Definition laut SIA 2032 wird mit „Grauer Energie“ die „Gesamte Menge an nicht erneuerbarer Primärenergie im Bereich Erstellung“ definiert. Die „Erstellung“ wird dabei wie folgt beschrieben: „Umfasst in der Phasenbezeichnung gemäss SN EN 15804 die Herstellungsphase (Module A1-A3), die Errichtungsphase (Module A4 und A5), den Ersatz von Bauteilen während der Nutzungsphase (Modul B4) und die Entsorgungsphase (Module C1-C4).“

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.

3.5 Auswertung

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

4 Beispielgebäude und Varianten

Die Berechnungen im Rahmen dieser Studie werden anhand des von der ARGE Kiel definierten Typen- EFH durchgeführt. Dieses diente schon für vorangegangene Untersuchungen als Beispielgebäude zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit (Prof. Dr.-Ing. Holm et al. 2017) aber auch der Grauen Energie (Prof. Dr.-Ing. Holm und Kagerer 2019).

In der ökobilanziellen Untersuchung sollen verschiedene Bauweisen untersucht werden. Es werden monolithische Ziegelbauweise mit unverfüllten und verfüllten Ziegeln, sowie eine Holzständerbauweise verglichen. Für diese drei Konstruktionsweisen werden verschiedene energetische Standards, verschiedene Innenbauweisen und verschiedene Gebäudetechnikvarianten untersucht.

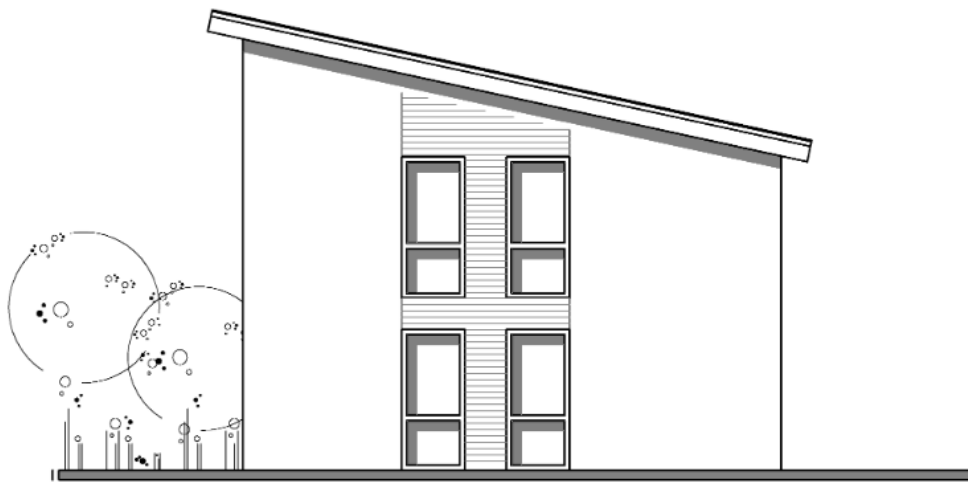
4.1 Geometrie und Flächen

Die Berechnungen wurden anhand eines fiktiven Typen- EFH durchgeführt. Dieses wurde von der ARGE Kiel auf Basis aktueller Statistiken, Marktbeobachtungen und einer differenzierten Bautätigkeitserfassung (z.B. durchschnittliche Größe, Ausführung und Ausstattung) für den deutschen Einfamilienhausbau definiert. Folgende Stichpunkte und Kennwerte beschreiben das Typengebäude:

- Einfamilienhaus im mittleren Qualitätssegment
- Einbausituation: Freistehend
- Anzahl Wohnungen: 1 WE
- Anzahl Vollgeschosse: 2
- Erschließung: Innenliegende Treppe
- Kellergeschoß

Tabelle 1: Auszug der wichtigsten Kennwerte des Typengebäudes

Kennwert / Angabe	
Beheiztes Volumen V_e	565 m ³
Gebäudenutzfläche A_n	181 m ²
Nettogrundfläche NGF	148 m ²
Thermische Gebäudehüllfläche	422,7 m ²
A/V_e	0,75 1/m
Keller	unbeheizt

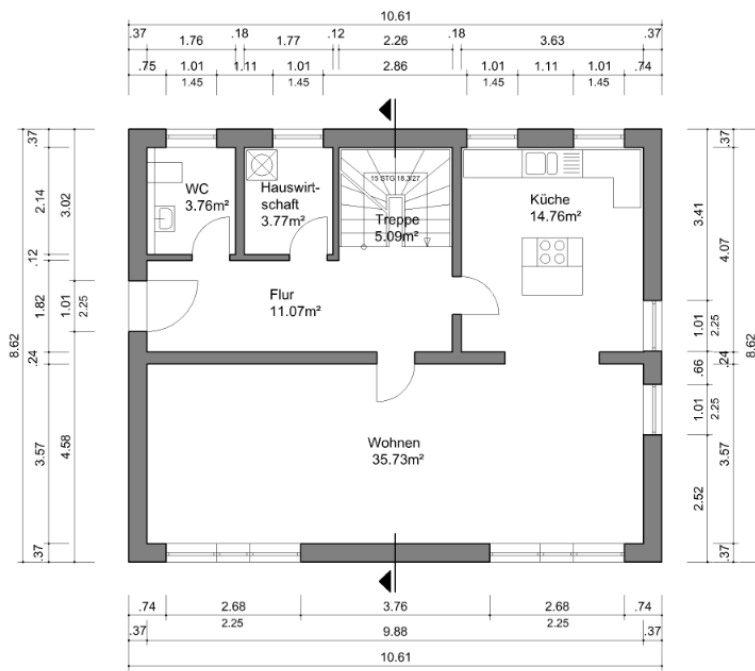


Ansicht 3



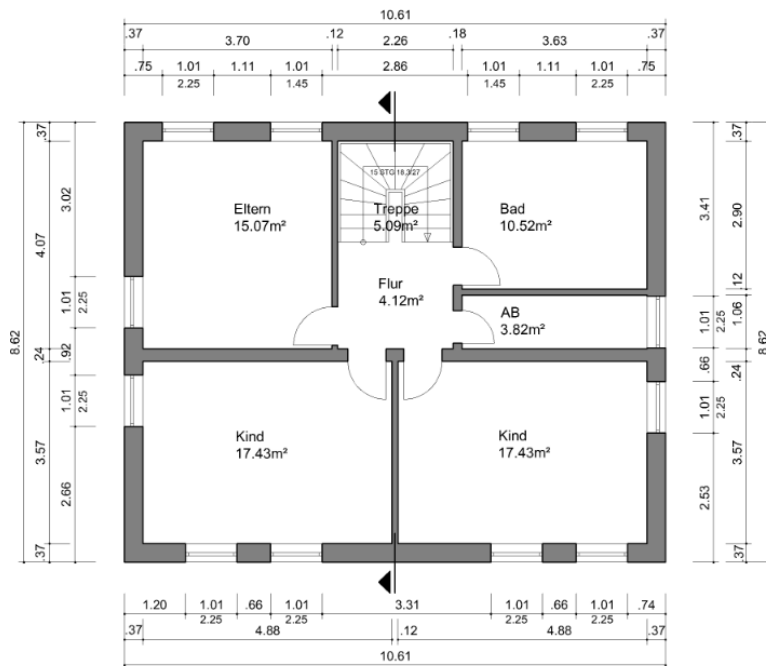
Ansicht 2 Garten

Abbildung 3: Ansichten des Typengebäudes



GR Erdgeschoss

EG gesamt
74.18m²



GR Dachgeschoss

OG gesamt
73.49m²

Abbildung 4: Grundrisse EG und 1. OG des Typengebäudes

4.2 Varianten energetisches Niveau

Bei den Untersuchungen soll der Einfluss des energetischen Niveaus auf die ökologische Qualität eines Gebäudes bewertet werden. Hierzu wurden drei verschiedene Standards berücksichtigt. Nachfolgend sind die Anforderungen an die Transmissionswärmeverluste der thermischen Hülle, sowie an den Primärenergiebedarf zusammengefasst. Die Niveaus wurden durch entsprechende Anpassung der U-Werte der Außenbauteile abgebildet. Im nachfolgenden Kapitel sind die verschiedenen Varianten der Bauteile und die angesetzten Schichtdicken zusammengefasst.

Tabelle 2: Anforderungen der Standards an den Transmissionswärmeverlust und den Primärenergiebedarf

Effizienzhausstandard	GEG	EH 55	EH 40
Anforderungen % von HT ¹ des Referenzgebäudes	100	70	55
Anforderungen % von QP ¹ des Referenzgebäudes	75	55	40

4.3 Untersuchte Konstruktionen

Kern der Untersuchung ist der Vergleich von monolithischer Ziegelbauweise, einerseits mit dämmstoff-gefüllten bzw. ungefüllten Ziegeln und einer Holzrahmenbauweise. Diese werden durch Anpassung der Schichtdicken so variiert, dass sie den Anforderungen der drei betrachteten energetischen Standards entsprechen. Variation gibt es ebenfalls bei den Innenbauteilen. Für die Variante „Ziegelbauweise“ wird die Zwischendecke in Stahlbeton und die Innenwände in Ziegelbauweise ausgeführt. Bei der Variante „Leichtbau“ wird eine Brettstapeldecke und Innentrennwände in Holzrahmenbauweise angesetzt. Für die Varianten in Ziegelbauweise werden außerdem die Kellerwände in Mauerwerk ausgeführt. Für die Holzbauvariante ist diese Variante aus statischen Gründen nicht möglich. Aufgrund des geringeren Gewichts der Holzbaukonstruktionen, würde eine Kellerkonstruktion in Ziegelbauweise zum Auftrieb neigen, daher wird in dieser Variante das Kellergeschoss komplett in Stahlbeton ausgeführt.

Keine Unterscheidung gibt es für die Bauteile, Dach, Fenster, Bodenplatte und Kellerdecke. Diese sind für alle Konstruktionsvarianten gleich, es gibt lediglich teilweise Anpassung bei den thermischen Eigenschaften zur Erfüllung des jeweiligen energetischen Niveaus.

In nachfolgenden Tabellen sind die angesetzten Konstruktionen mit den jeweiligen Kurzzeichen, den Materialschichten- und -stärken, sowie die für die Ökobilanzierung angesetzte Lebensdauer zusammengefasst. Die Lebensdauern der einzelnen Schichten wurden unter Berücksichtigung des Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) definiert (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2017). Dieses geht von einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren aus. Im Rahmen dieser Untersuchungen soll jedoch auch eine Lebensdauer des Gebäudes von 80 Jahren

untersucht werden. Bei beiden Ansätzen werden die primären, tragenden Konstruktionen, welche laut BNB eine Lebensdauer von >50 Jahren haben, nicht ausgetauscht.

Tabelle 3: Übersicht Außenwandkonstruktionen¹

Bauteil	Material	GEG	EH 55	EH40	Lebensdauer
		Schichtdicke in m			
ZI-U	Fassadenfarbe	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	15
	Voranstrich	0,1 l/m ²	0,1 l/m ²	0,1 l/m ²	15
	Außenputz	0,02	0,02	0,02	45
	Ziegel ungefüllt	0,365	0,425	0,49	>50
	Kalk- Innenputz	0,01	0,01	0,01	>50
	Innenfarbe	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	10
	U-Wert	0,23	0,20	0,17	W/m ² K
ZI-D	Fassadenfarbe	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	15
	Voranstrich	0,1 l/m ²	0,1 l/m ²	0,1 l/m ²	15
	Außenputz	0,02	0,02	0,02	45
	Ziegel Dämmstoff gefüllt	0,3	0,365	0,425	>50
	Kalk- Innenputz	0,01	0,01	0,01	>50
	Innenfarbe	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	10
	U-Wert	0,25	0,20	0,18	W/m ² K
HZ	Fassadenfarbe	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	15
	Voranstrich	0,1 l/m ²	0,1 l/m ²	0,1 l/m ²	15
	Außenputz	0,02	0,02	0,02	45
	Putzträgerplatte	0,01	0,01	0,01	30
	Mineralfaser (80%)	0,16	0,20	0,24	>50
	Holzständer (20%)	0,16	0,20	0,24	>50
	Unterkonstruktion / Lattung (10%)	0,04	0,04	0,04	>50
	Installationsebene Miwo (90%)	0,04	0,04	0,04	>50
	Folie	-	-	-	>50
	Gipskartonplatte	0,0125	0,0125	0,0125	>50
	Innenfarbe	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	10
U-Wert	0,23	0,20	0,18	W/m ² K	

¹ Hierbei handelt es sich um Konstruktionsvorschläge zur Erreichung des jeweiligen Effizienzhausstandards. Es sind auch andere Ausführungsvarianten zur Erreichung des gleichen energetischen Standards möglich/umsetzbar.

Tabelle 4: Übersicht Konstruktionen Dach und Fenster

Bauteil	Material	GEG	EH 55	EH40	Lebensdauer
		Schichtdicke in m			
Dach - DA	Dachziegel				>50
	Unterkonstruktion / Latung (10%)	0,04	0,04	0,04	>50
	Unterdeckbahn	-	-	-	>50
	Aufsparrendämmung PU	0	0,06	0,08	>50
	Holzschalung	0,02	0,02	0,02	>50
	Zwischensparrendämmung MiWo (80%)	0,22	0,22	0,22	>50
	Sparren (20%)	0,22	0,22	0,22	>50
	Holzschalung	0,02	0,02	0,02	>50
	Dampfbremse	-	-	-	>50
	Installationsebene Miwo (90%)	0,04	0,04	0,04	>50
	Unterkonstruktion / Latung (10%)	0,04	0,04	0,04	>50
	Gipskartonplatte 2fach	0,025	0,025	0,025	>50
	Innenfarbe	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	0,15 l/m ²	10
U-Wert	0,17	0,12	0,11	W/m ² K	
Fenster - FE	Blend- und Flügelrahmen aus PVC mit	2-fach Verglasung	3-fach Verglasung	3-fach Verglasung	40
	Uw-Wert	1,3	0,9	0,7	W/m ² K

Tabelle 5: Übersicht Konstruktionen Keller

Bauteil	Material	GEG	EH 55	EH40	Lebensdauer
		Schichtdicke in m			
Bodenplatte	Bitumenabdichtung	0,004			>50
	Beton	0,2			>50
	Stahlbewehrung 1%		Keine Variation		>50
	EPS Trittschalldämmung	0,04			>50
	PE-Folie	-			>50
	Zement Estrich	0,05			>50
Kellerwand Holzbau	Bitumenabdichtung	0,004			>50
	Beton	0,2			>50
	Stahlbewehrung 1%		Keine Variation		>50
	Innenputz	0,01			>50
Kellerwand Ziegelbau	Bitumenabdichtung	0,004			>50
	Ziegel	0,365			>50
	Kalk- Innenputz	0,01			>50
Kellerdecke	Mineralwolle	0,06	0,10	0,14	>50
	Beton	0,2	0,2	0,2	>50
	Stahlbewehrung 1%				>50
	EPS Trittschalldämmung	0,04	0,04	0,04	>50
	PE-Folie	-	-	-	>50
	Zement Estrich	0,05	0,05	0,05	>50
	Parkett	0,01	0,01	0,01	40
	U-Wert	0,31	0,23	0,18	W/m ² K

Tabelle 6: Übersicht Konstruktionen Innenbauteile

Bauteil	Material	GEG	Schichtdicke in m		Lebensdauer
			EH 55	EH40	
Zwischen- decke Zie- gelbau- weise	Innenfarbe	15 l/m ²			10
	Kalk- Innenputz	0,01			>50
	Beton	0,2			>50
	Stahlbewehrung 1%		Keine Variation		>50
	EPS Trittschalldämmung	0,04			>50
	PE-Folie	-			
	Zement Estrich	0,05			>50
	Parkett	0,01			40
Zwischen- decke Leichtbau- weise	Brettstapeldecke	0,18			>50
	EPS Trittschalldämmung	0,04	Keine Variation		>50
	Trockenestrich	0,05			>50
	Parkett	0,01			40
Innenwand tragend Ziegelbau- weise	Innenfarbe	15 l/m ²			10
	Kalk- Innenputz	0,01			>50
	Ziegel	0,24	Keine Variation		>50
	Kalk- Innenputz	0,01			>50
Innenwand nicht tra- gend Zie- gelbau- weise	Innenfarbe	15 l/m ²			10
	Kalk- Innenputz	0,01			>50
	Ziegel	0,2	Keine Variation		>50
	Kalk- Innenputz	0,01			>50
	Innenfarbe	15 l/m ²			10
Innenwand nicht tra- gend Leichtbau- weise	Innenfarbe	15 l/m ²			10
	Gipsfaserplatte	0,0125			>50
	OSB Platte	0,015			>50
	Mineralwolle	0,04			>50
	Ständerkonstruktion Holz (12%)	0,12	Keine Variation		>50
	OSB Platte	0,015			>50
	Gipsfaserplatte	0,0125			>50
	Innenfarbe	15 l/m ²			10
Innenwand tragend Leichtbau- weise	Innenfarbe	15 l/m ²			10
	Lehmbauplatte	0,015			>50
	OSB Platte	0,015			>50
	Mineralwolle	0,04			>50
	Ständerkonstruktion Holz (9,6%)	0,06	Keine Variation		>50
	OSB Platte	0,015			>50
	Lehmbauplatte	0,015			>50
	Innenfarbe	15 l/m ²			10

5 Ergebnisse Ökobilanzierung

Als funktionelle Einheit wurde im Rahmen dieser Ökobilanz 1 m² Nutzfläche des Beispielgebäudes angenommen. Die nachfolgenden Ergebnisse der Ökobilanzierung sind daher alle pro m² und Jahr angegeben. Dadurch lassen sich die Ergebnisse besser mit anderen Projekten vergleichen.

5.1 Auswertung der Ergebnisse auf Bauteilebene

Als ersten Schritt sollen die Ergebnisse der verschiedenen Konstruktionen auf „Bauteil, bzw. Komponentenebene“ ausgewertet werden. Hierzu wird der gesamte Lebenszyklus von der Erstellung, Ersatz und Rückbau/Entsorgung betrachtet. Die dargestellten Ergebnisse wurden beispielhaft für das Gebäude im Standard nach EH 55 für eine Betrachtungszeit von 80 Jahren angenommen. Durch diese Auswertung können die einzelnen Bauteile und Komponenten untereinander direkt miteinander verglichen werden. Da die Ergebnisse dabei nicht pro m² des jeweiligen Bauteils, sondern auf die Nutzfläche des Gebäudes bezogen sind, können außerdem die Anteile der einzelnen Komponenten im gesamten Gebäude bewertet werden. Folgende Bauteile / Komponenten wurden betrachtet:

- AW-ZI-U Außenwand- monolithische Ziegelbauweise, unverfüllt
- AW-ZI-D Außenwand- monolithische Ziegelbauweise, Dämmstoff gefüllt
- AW-HZ Außenwand Holzrahmenbauweise
- DA Dach
- FE Fenster, Dreischeibenverglasung, PVC Rahmen
- IB-ZI Innenbauteile inkl. Treppe (Innenwände Ziegelbauweise, Zwischendecke Stahlbeton)
- IB-LB Innenbauteile inkl. Treppe (Innenwände Leichtbau, Zwischendecke Brettstapeldecke)

Vergleich der konstruktiven Komponenten (ohne Gebäudetechnik und Betrieb) im EH55 Standard über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren pro m² Nutzfläche und Jahr

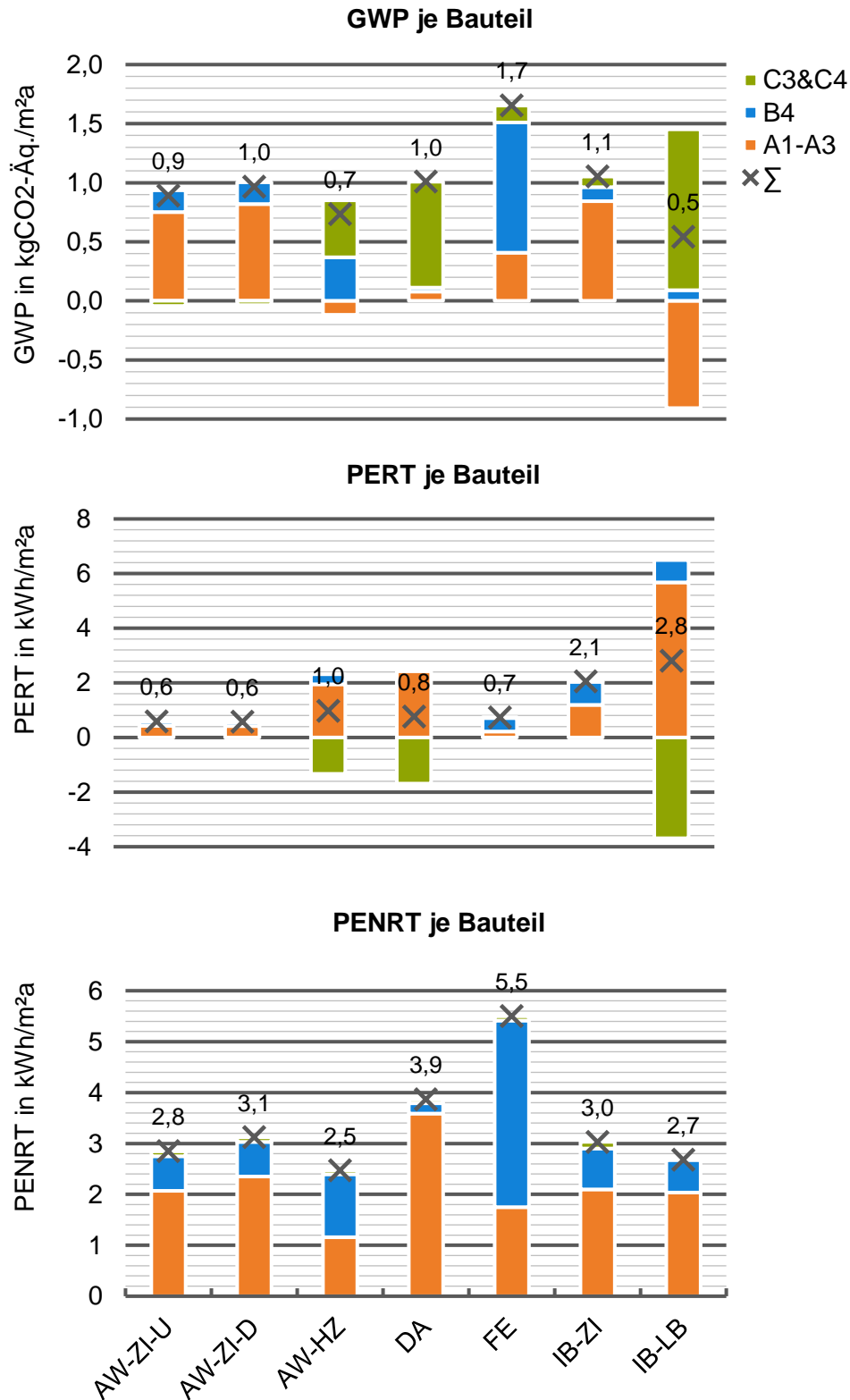


Abbildung 5: GWP, PERT und PENRT für die verschiedenen Bauteile über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren pro m² Gebäudenutzfläche A_n und Jahr des Beispielgebäudes im EH55 Standard

Beim Vergleich der drei **Außenwandkonstruktionen** liegen die beiden Ziegelkonstruktionen bei allen drei Indikatoren nahe beieinander. Die Holzrahmenbauweise schneidet beim GWP, trotz hoher Belastungen in der Entsorgungsphase, besser ab, als die beiden Ziegelkonstruktionen. Dabei ist zu beachten, dass nur nachhaltig gewonnenes Holz die dargestellten Eigenschaften bezüglich des GWP aufweist, da dort eine ausgeglichene CO₂ Bilanz vorliegt. Bei Verwendung von importiertem Holz aus nicht nachhaltig bewirtschafteten Wäldern ist dies jedoch nicht der Fall.

Bei PERT liegt die Holzbauvariante über den Mauerwerkskonstruktionen. Grund hierfür ist die Holzständerkonstruktion. Die erneuerbare Primärenergie wird dabei jedoch nicht für die Bearbeitung aufgewendet, sondern ist im Material gespeichert und kann bei einer thermischen Verwertung am Ende der Lebensdauer wieder genutzt werden.

Beim **Dach** gibt es aufgrund der Langlebigkeit fast aller Komponenten kaum Ersatzmaßnahmen über den Betrachtungszeitraum. Für die **Fenster** wurde eine Lebensdauer von maximal 40 Jahren angesetzt. Gemäß Nutzungsdauern nach BNB können für Fensterrahmen aus Kunststoff 40 Jahre, für Verglasungen 30 Jahre angesetzt werden. Für den im Rahmen dieser Untersuchung angesetzten Lebensdauer von 80 Jahren wurden daher 2 Erneuerungszyklen für die Fenster angesetzt. Obwohl sie eine im Vergleich zu den anderen Bauteilen eher geringe Bauteilfläche im Gebäude haben, sind die Ergebnisse pro m² Nutzfläche und Jahr relativ hoch.

Bei den beiden Varianten der **Innenbauteile** hat die Leichtbauvariante beim GWP, trotz hoher Belastungen in der Entsorgungsphase, gegenüber der schweren Bauweise deutliche Vorteile. Die Ergebnisse PERT liegen für den Leichtbau dagegen höher. Dies ist wiederum auf die zuvor bereits genannten im Material gespeicherten erneuerbare Primärenergie im Holz zurückzuführen. Auf Basis dieser Auswertung soll eine Optimierungsvariante mit einer hybriden Bauweise mit gemauerten Außenwänden und Innenkonstruktionen in Leichtbauweise betrachtet werden.

5.2 Anteile der Komponenten über den gesamten Lebenszyklus für EH 55 Standard

Für die nachfolgenden Auswertungen wurden die Ergebnisse der Ökobilanzierung für die betrachteten Komponenten des EFH über alle Lebenszyklusphasen aufsummiert. Die Kennwerte berücksichtigen also neben der Erstellung, auch die im Betrachtungszeitraum von 80 Jahren anfallenden Erneuerungen, sowie den Rückbau und die Entsorgung aller Baukonstruktionen des gesamten Gebäudes.

Wie zuvor genannt, werden neben den beiden Ziegelbauweisen und der Holzbauweise, auch zwei Hybridbauweisen betrachtet. Die Komponenten der thermischen Gebäudehülle sind so dimensioniert, dass sie dem EH 55 Standard entsprechen.

Nachfolgend sind die betrachteten Konstellationen der Außenwände und Innenbauteile nochmals zusammengefasst. Das Dach, die Fenster, sowie Kellerdecke und Bodenplatte sind in allen betrachteten Varianten gleich.

- ZI-U Außenwand- monolithische Ziegelbauweise, unverfüllt
Innenbauteile Ziegelbauweise, Stahlbetondecke
Kellerwände Ziegelbauweise

- ZI-U-LB Außenwand- monolithische Ziegelbauweise, unverfüllt
Innenbauteile Leichtbauweise, Brettstapeldecke
Kellerwände Ziegelbauweise

- ZI-D Außenwand- monolithische Ziegelbauweise, Dämmstoff gefüllt
Innenbauteile Ziegelbauweise, Stahlbetondecke
Kellerwände Ziegelbauweise

- ZI-D-LB Außenwand- monolithische Ziegelbauweise, Dämmstoff gefüllt
Innenbauteile Leichtbauweise, Brettstapeldecke
Kellerwände Ziegelbauweise

- HZ Außenwand Holzrahmenbauweise
Innenbauteile Leichtbauweise, Brettstapeldecke
Kellerwände Stahlbeton

Vergleich der verschiedenen Bauweisen im EH55 Standard über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren pro m² Nutzfläche und Jahr für die Baukonstruktion ohne Gebäudetechnik und Betrieb

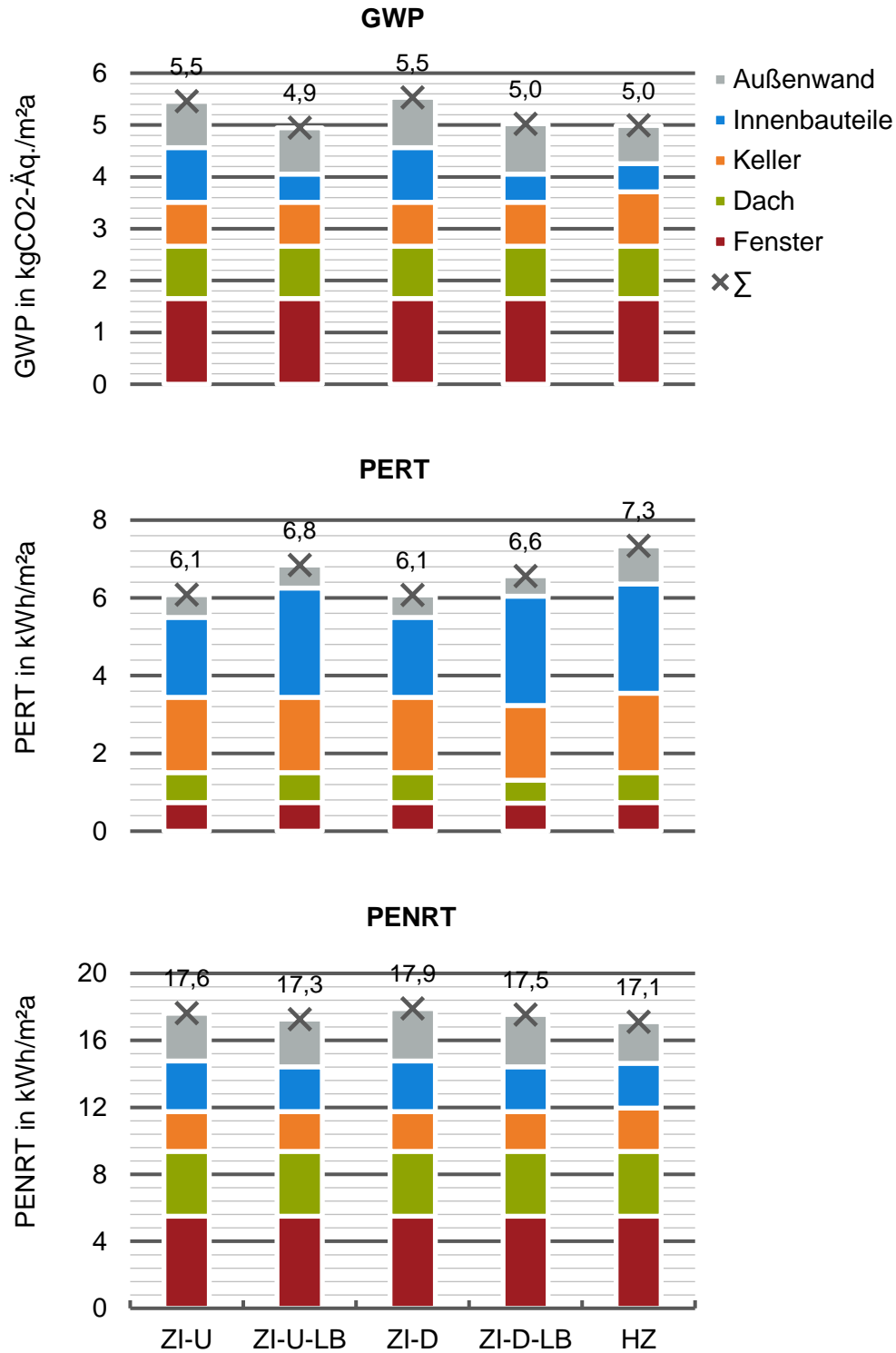


Abbildung 6: GWP, PERT und PENRT unterteilt nach Komponenten über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren pro m² Gebäudenutzfläche A_n und Jahr des Beispielgebäudes im EH55 Standard

Durch die Kombination der Ziegelaußenwände und den Innenbauteilen in Leichtbauweise kann bei den Hybridvarianten ZI-U-LB und ZI-D-LB im Indikator GWP über den Lebenszyklus ca. gut 9% Treibhausgasemissionen gegenüber der Ziegelbauweise mit schweren Innenbauteilen eingespart werden. Bei einem reinen Holzbau liegen die CO₂-Emissionen gleich auf mit den Hybridvarianten in Ziegelbauweise kombiniert mit dem leichten Innenausbau. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Holzbauvariante mit einem Kellergeschoss in Stahlbetonbauweise ausgeführt wird, im Vergleich zu einer Ziegelkonstruktion der Kellerwände in den Ziegelgebäuden. Die reine Stahlbetonkonstruktion im Untergeschoss ist aus statischer Sicht notwendig um die geringen Auflasten des Holzgebäudes zu kompensieren und einen Auftrieb des Gebäudes zu verhindern.

Aufgrund der im Holz gespeicherten erneuerbaren Primärenergie, liegen die Ergebnisse bei PERT für die Hybridvarianten etwas über den reinen Ziegelbauten. Für den Holzbau werden daher auch die höchsten Werte in diesem Indikator erzielt. Für PERNT können durch Kombination aus Ziegelbauweise mit leichter Innenbauweise keine großen Vorteile generiert werden.

5.3 Gebäudetechnik

Neben den Konstruktionen müssen auch die Gebäudetechnischen Anlagen in der Ökobilanz berücksichtigt werden. In Tabelle 7 sind die untersuchten Varianten zusammengefasst. Bei der Bilanzierung wurden neben der Wärmeerzeugung auch die notwendigen Pufferspeicher, Pumpen und Übergabesysteme (Fußbodenheizung) mitberücksichtigt.

Tabelle 7: Versorgungsvarianten für das Typengebäude

Abkürzung	Wärmeerzeugung	Lüftung
BW1	Gas- Brennwert, Solarthermie	Fensterlüftung
BW2	Gas- Brennwert	Zu- und Abluft mit WRG
WP1	Luft-Wasser- Wärmepumpe	Zu- und Abluft mit WRG
WP2	Wasser- Wasser- Wärmepumpe	Zu- und Abluft mit WRG
HzP	Holzpelletkessel	Fensterlüftung
FW	Fernwärme	Fensterlüftung

Nachfolgend werden die Ergebnisse über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren für die verschiedenen Konstruktionsvarianten im EH 55 Standard den sechs betrachteten Technikvarianten gegenübergestellt. Die Erneuerungszyklen für die Gebäudetechnikkomponenten richten sich nach den Lebensdauern der VDI 2067 Blatt 1. Diese belaufen sich für Wärmeerzeuger und Pufferspeicher auf 20 Jahre, Umwälzpumpen mit 10 Jahren, Fußbodenheizung mit 30 Jahren und die Lüftungsanlagen mit 20 Jahren. Daher sind für die verschiedenen Komponenten in den betrachteten Technikvarianten zwischen 2 und 7 Erneuerungszyklen für einen Betrachtungszeitraum von 80 Jahren notwendig. Hierbei ist anzumerken, dass nicht mit allen dieser Technikvarianten die untersuchten Niveaus des EH55 und des EH40 erfüllt werden können.

Vergleich der verschiedenen Bauweisen im EH55 Standard über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren pro m² Nutzfläche und Jahr für die betrachteten Varianten der Baukonstruktion und der Gebäudetechnik

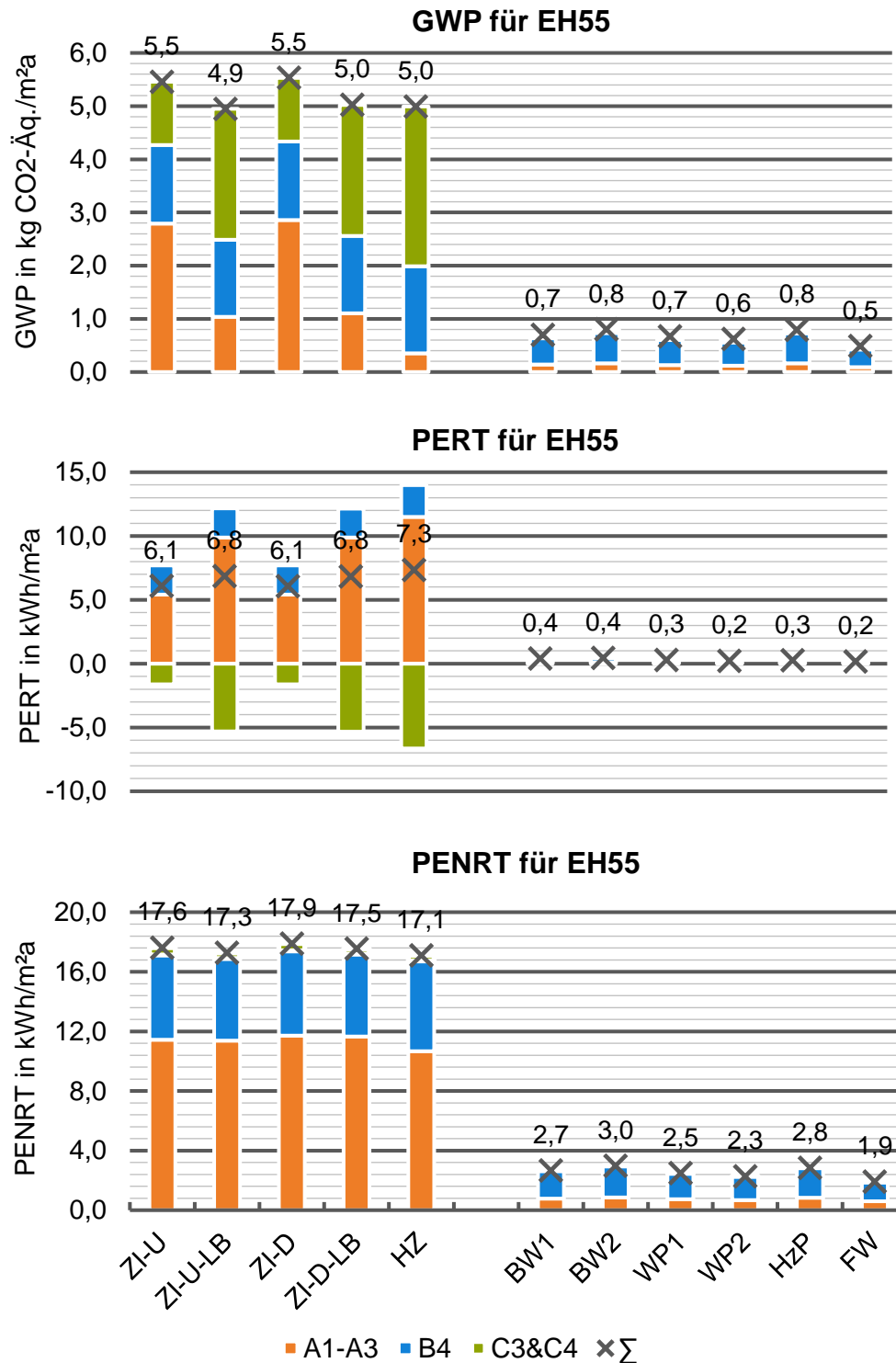


Abbildung 7: GWP, PERT und PENRT für die verschiedenen Varianten der Konstruktion, sowie die Gebäudetechnik am Beispiel des EH 55 für eine Nutzungsdauer von 80 Jahren pro m² Nutzfläche und Jahr

Generell lässt sich aus den Auswertungen ableiten, dass die Gebäudetechnik im Vergleich zu den konstruktiven Bauteilen des Gebäudes eine eher untergeordnete Rolle bei der ökobilanziellen Bewertung spielen. Auch sind zwischen den sechs Technikvarianten keine großen Unterschiede zu erkennen. Aufgrund der kürzeren Lebensdauern der technischen Komponenten im Vergleich zu den langlebigeren konstruktiven Bauteilen, sind die Ergebnisse für die Nutzungsphase B4 im größten.

5.4 Einfluss des energetischen Niveaus

Neben der Untersuchung der einzelnen Konstruktionen, soll nun auch der Einfluss des energetischen Niveaus auf das Ergebnis der Ökobilanz ermittelt werden. Hierzu werden die thermischen Eigenschaften der zuvor beschriebenen Bauteilkombinationen so angepasst, dass sie den Anforderungen nach GEG, EH 55 und EH 40 entsprechen. In Tabelle 3 bis Tabelle 6 sind die Konstruktionen und die Anpassungen in den Schichtdicken und U-Werten zusammengefasst.

Variation des energetischen Niveaus (GEG, EH55 und EH40) für die verschiedenen Konstruktionsvarianten über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren ohne Gebäudetechnik und Betrieb

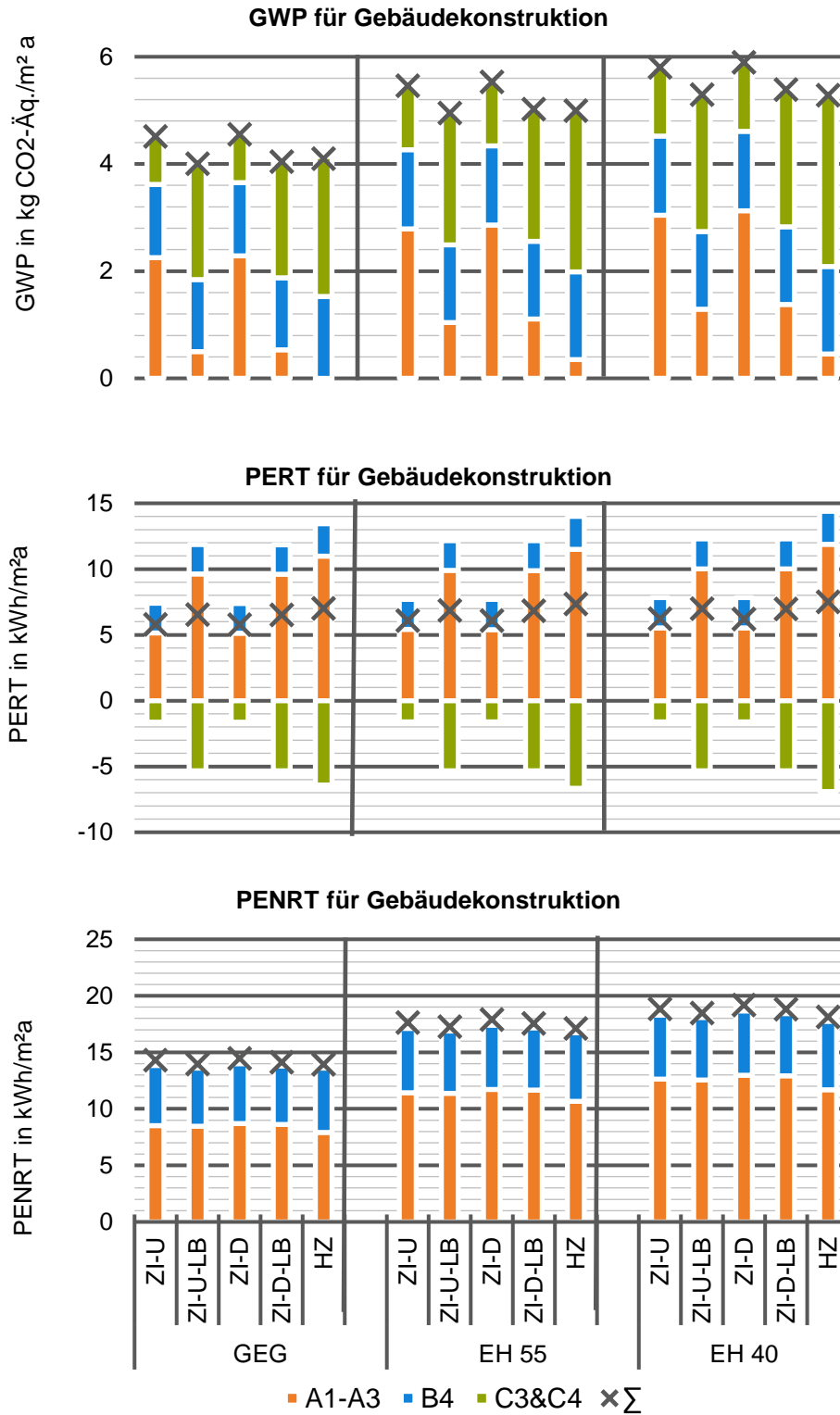


Abbildung 8: GWP, PERT und PENRT über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren für verschiedene Bauweisen und energetische Standards pro m² Nutzfläche und Jahr

Generell lässt sich sagen, dass mit steigendem energetischem Niveau, auch die Umweltbelastungen ansteigen. Dies ist in den drei betrachteten Indikatoren jedoch unterschiedlich ausgeprägt. Bei den Treibhausgasemissionen führt die Verbesserung von GEG auf EH 55 zu einer Steigerung von rund 21% - 24%. Für die Verbesserung von GEG auf EH40 werden zwischen 29% - 45 % mehr Treibhausgasemissionen frei.

Bei der erneuerbaren Primärenergie sind die Einflüsse des energetischen Niveaus deutlich geringer ausgeprägt. Dort verursacht die Verbesserung von GEG auf EH55 ein Plus von rund 5%, und von GEG auf EH40 von rund 7%.

Deutlich ausgeprägter ist der Einfluss des energetischen Niveaus wiederum bei der nicht erneuerbaren Primärenergie. Dort führt die Verbesserung von GEG auf EH55 zu einer Erhöhung von rund 23%. Beim Anheben des energetischen Niveaus von GEG auf EH40 ist bei diesem Indikator ein Zuwachs zwischen 30% und 36% zu erwarten.

5.5 Vergleich 50 zu 80 Jahren Nutzungsdauer

Gemäß BNB werden für Gebäude im Rahmen einer ökobilanziellen Betrachtung eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angesetzt. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollte für Gebäude eine möglichst lange Nutzungsdauer angestrebt werden. Die im Rahmen dieser Studie betrachteten Konstruktionen aus Ziegel und Holz können durchaus über eine Lebensdauer von 80 Jahren genutzt werden. Der positive Einfluss der längeren Nutzungsdauer auf die ökobilanziellen Ergebnisse des Beispielgebäudes soll dargestellt werden.

In nachfolgender Abbildung 9 sind die Ergebnisse über alle Lebenszyklusphasen pro m² Nutzfläche und Jahr für diese beiden Betrachtungszeiträume dargestellt. Die Erneuerungszyklen der einzelnen Komponenten wurden dafür entsprechend angepasst. Die Darstellungen zeigen beispielhaft die Ergebnisse für das Gebäude im EH55 Standard. Beispielhaft wurden die beiden Ziegelbauweisen mit schwerem Innenausbau, sowie das Holzhaus mit leichter Innenbauweise dargestellt.

Einfluss der Nutzungsdauern von 50 und 80 Jahren auf die ökobilanziellen Ergebnisse der Gebäudekonstruktion (ohne Gebäudetechnik und Betrieb) über den kompletten Lebenszyklus beispielhaft für das EH55

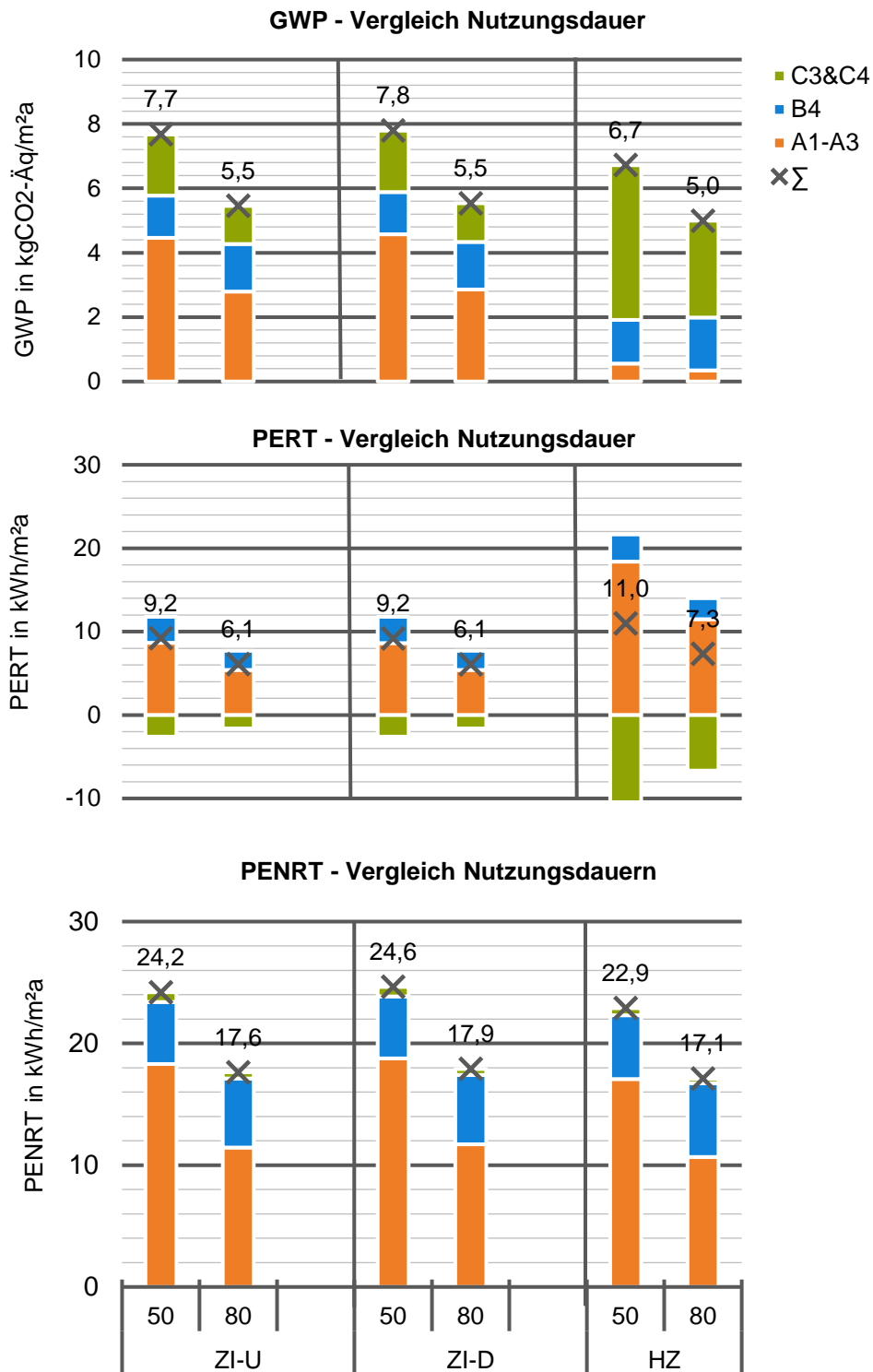


Abbildung 9: GWP, PERT und PENRT für die Konstruktion des Gebäudes (ohne Gebäudetechnik und Betrieb) über den Lebenszyklus für einen Betrachtungszeitraum von 50 und 80 Jahren pro m² Nutzfläche und Jahr

Der Einfluss der höheren Nutzungsdauer zeigt sich für alle Gebäude deutlich. Bei einer Nutzungsdauer von 80 Jahren reduzieren sich die jährlichen Ergebnisse der Ökobilanz beim GWP um knapp 30%, bei PERT um rund 33% und bei PENRT um gut 25% im Vergleich zu einer Nutzungsdauer von 50 Jahren.

5.6 Betrachtung Betriebsphase und mögliche Einsparungen

Neben den Umweltbelastungen für die Erstellung, den Ersatz und den Rückbau des Gebäudes, muss für eine vollständige ökobilanzielle Bewertung auch die Betriebsphase berücksichtigt werden. Hierbei wurde für alle Varianten die Technikvariante WP1 angesetzt. Dabei handelt es sich um eine Luft- Wasserwärmepumpe und eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Für das EH40 muss zusätzlich noch eine Solarthermie- Anlage angesetzt werden, da sonst die Anforderungen an den Primärenergiebedarf nicht erfüllt würden.

In Abbildung 10 werden die aufsummierten Ergebnisse für das Gebäude inkl. Gebäudetechnik den Aufwendungen durch den Gebäudebetrieb gegenübergestellt. Die Werte sind jeweils pro m² Nutzfläche und Jahr angegeben. Die Betrachtung der Bauteile und die Ersatzzyklen wurde für eine Nutzungsdauer von 80 Jahren berechnet.

Für die Erstellung, Ersatz und Rückbau steigen die Ökobilanzergebnisse mit zunehmendem energetischem Standard bei allen dargestellten Indikatoren leicht an. Im Gegenzug nehmen die errechneten Kennwerte für den Betrieb stark ab. Ausnahme hierbei sind die Ergebnisse für PERT in der Betriebsphase im EH40. Grund hierfür ist die in dieser Variante angesetzte Solarthermie- Anlage. Dies führt zu einem höheren Verbrauch an erneuerbarer Primärenergie im Betrieb im Vergleich zu den anderen Varianten ohne Solarthermie- Anlage.

Vergleich der ökobilanziellen Ergebnisse über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren für das Gebäude inkl. Gebäudetechnik und den Betrieb für die verschiedenen Bauweisen und energetischen Standards im Vergleich

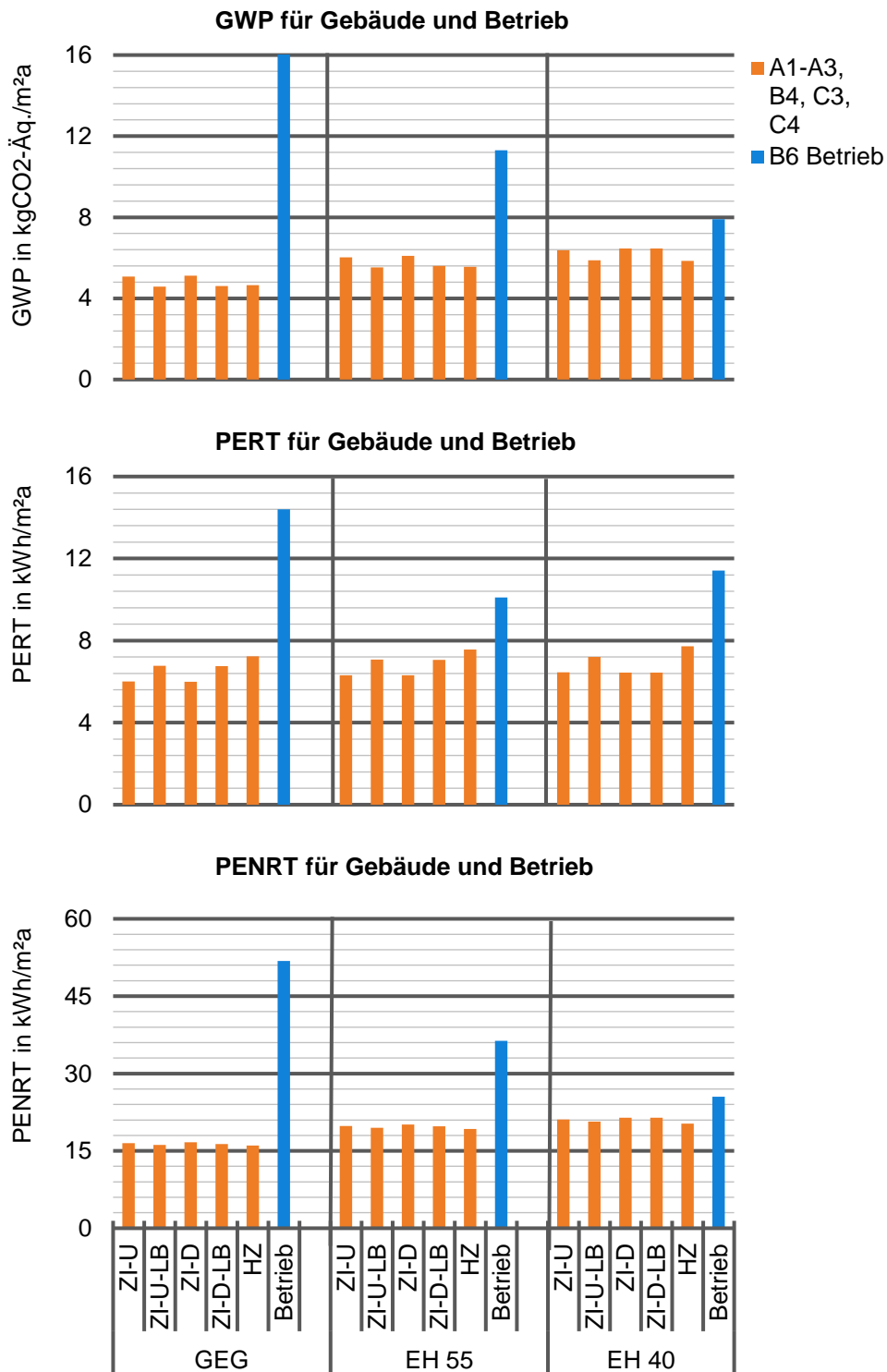


Abbildung 10: Jährliches GWP, PERT und PENRT pro m² Nutzfläche und Jahr für die das Gebäude inkl. Gebäudetechnik für einen Betrachtungszeitraum von 80 Jahren im Vergleich zum jährlichen Betrieb für die verschiedenen energetischen Standards

6 Zusammenfassung und Fazit

Die Berechnungen und Auswertungen der hier beschriebenen ökobilanziellen Untersuchung anhand eines beispielhaften Einfamilienhauses sollen den Einfluss der Bauweise und des energetischen Niveaus auf die ökologische Qualität zeigen.

Für diese Untersuchung wurden insgesamt fünf verschiedene Konstruktionsarten untersucht. Neben einer monolithischen Ziegelbauweise, mit unverfüllten sowie mit Dämmstoff gefüllten Ziegeln, wird eine gängige Variante in Holzständerbauweise mit Mineralfaserdämmung untersucht. Für die Innenbauteile, Zwischendecke und Raumtrennwände, gibt es wiederum zwei Varianten, Ziegelbauweise und Holzleichtbau.

Neben der Variation der Konstruktionsarten, werden drei verschiedene energetische Niveaus betrachtet. Zusätzlich zur Basisvariante nach GEG (Gebäudeenergiegesetz), wurden zwei ambitioniertere Varianten, der Effizienzhausstandard 55 und 40 (EH55 und EH40), betrachtet. Exemplarisch für eine Gebäudetechnikvariante wurde der Energiebedarf berechnet und so die Betriebsphase abgebildet.

Es wurde eine detaillierte Ökobilanz der genannten Varianten über einen Betrachtungszeitraum von 80 Jahren durchgeführt. Dabei wurde sowohl die Erstellung, eventuelle Ersatzzyklen einzelner Komponenten, sowie der Rückbau und die Entsorgung am Ende des Lebenszyklus berücksichtigt. Die Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt wurde mit Hilfe der drei Indikatoren GWP, PERT und PENRT quantifiziert.

Mit Hilfe dieser detaillierten Berechnungen und Auswertungen können folgenden Erkenntnisse gewonnen werden.

- Durch Ausführung des **Innenausbaus in Leichtbauweise** können in Ziegelgebäuden die **Treibhausgasemissionen** des Gebäudes (ohne Betrieb) über den Lebenszyklus von 80 Jahren um gut **9% reduziert** werden (Versionen ZI-U-LB und Z-D-LB; vgl. Kapitel 5.2) im Vergleich zu einer Ausführung in massiver Ziegelbauweise, bzw. Stahlbetondecken.
- Bei Kombination von monolithischer Ziegelaußenwand, leichter Innenbauweise und Kellerwänden in Ziegelbauweise kann bei den **Treibhausgasemissionen ein gleiches Niveau** wie die Holzrahmenbauweise erzielt werden (Versionen ZI-U-LB und Z-D-LB; vgl. Kapitel 5.2).
- Bei **Erhöhung der Nutzungsdauer von 50 auf 80 Jahre** des Gebäudes stellen sich in den drei betrachteten Indikatoren zwischen **25% und 33%** geringere Werte (pro Jahr und Nutzfläche) ein (vgl. Kapitel 5.5).
- Die **Verbesserung des energetischen Niveaus** von GEG auf EH55, bzw. auf EH40 führt zu einer **Erhöhung** der ökobilanziellen Ergebnisse vor allem bei den **Treibhausgasemissionen** und nicht erneuerbarer Primärenergie (**PENRT**) (vgl. Kapitel 5.4).

- Durch die Verbesserung des energetischen Niveaus können im Umkehrschluss die Ergebnisse für den Betrieb des Gebäudes um **30% bzw. 50% reduziert** werden (vgl. Kapitel 5.6)

In folgender Tabelle 8 werden die mittleren Mehraufwendungen für alle 5 betrachteten Konstruktionsarten zur Erfüllung der jeweiligen Anforderungen den jährlichen Einsparungen für die drei Indikatoren gegenübergestellt. Die jährlichen Einsparungen durch die Erreichung eines höheren energetischen Standards sind in allen Fällen um ein Vielfaches höher, als die notwendigen Mehraufwendungen. Bei der Gebäudetechnik handelt es sich um eine Luft- Wasserwärmepumpe und eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Für das EH40 muss zusätzlich noch eine Solarthermie- Anlage angesetzt werden, da sonst die Anforderungen an den Primärenergiebedarf nicht erfüllt würden

Tabelle 8: Übersicht der mittleren Mehraufwendungen zu den Einsparungen bei Verbesserung des energetischen Niveaus pro m² Nutzfläche und Jahr

		GWP	PERT	PENRT
		kgCO ₂ -Äq./m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a
GEG → EH55	Mehraufwand	+ 0,9	+ 0,3	+ 3,3
	Einsparung	- 4,8	-4,3	-15,5
GEG → EH40	Mehraufwand	+ 1,3	+0,4	+4,5
	Einsparung	-8,2	-3,0	-26,3

Diese Verhältnisse von Mehraufwendungen in der Konstruktion und den dadurch erzielbaren Einsparungen im Betrieb ist Abbildung 11 nochmals graphisch ausgewertet. Aus diesen Zusammenhängen lässt sich ableiten, dass sich ein „Mehraufwand“ in die Gebäudekonstruktion zur Erreichung eines höheren energetischen Standards durch die jährlichen erzielbaren Einsparungen im Betrieb, auszahlt. Diese Aussage ist unabhängig von der gewählten Konstruktionsart gültig.

Notwendige Mehraufwendungen in der Gebäudekonstruktion zur Erreichung eines höheren energetischen Niveaus (verglichen mit dem GEG Standard) im Vergleich zu den dadurch erzielbaren Einsparungen im Betrieb pro m² Nutzfläche und Jahr

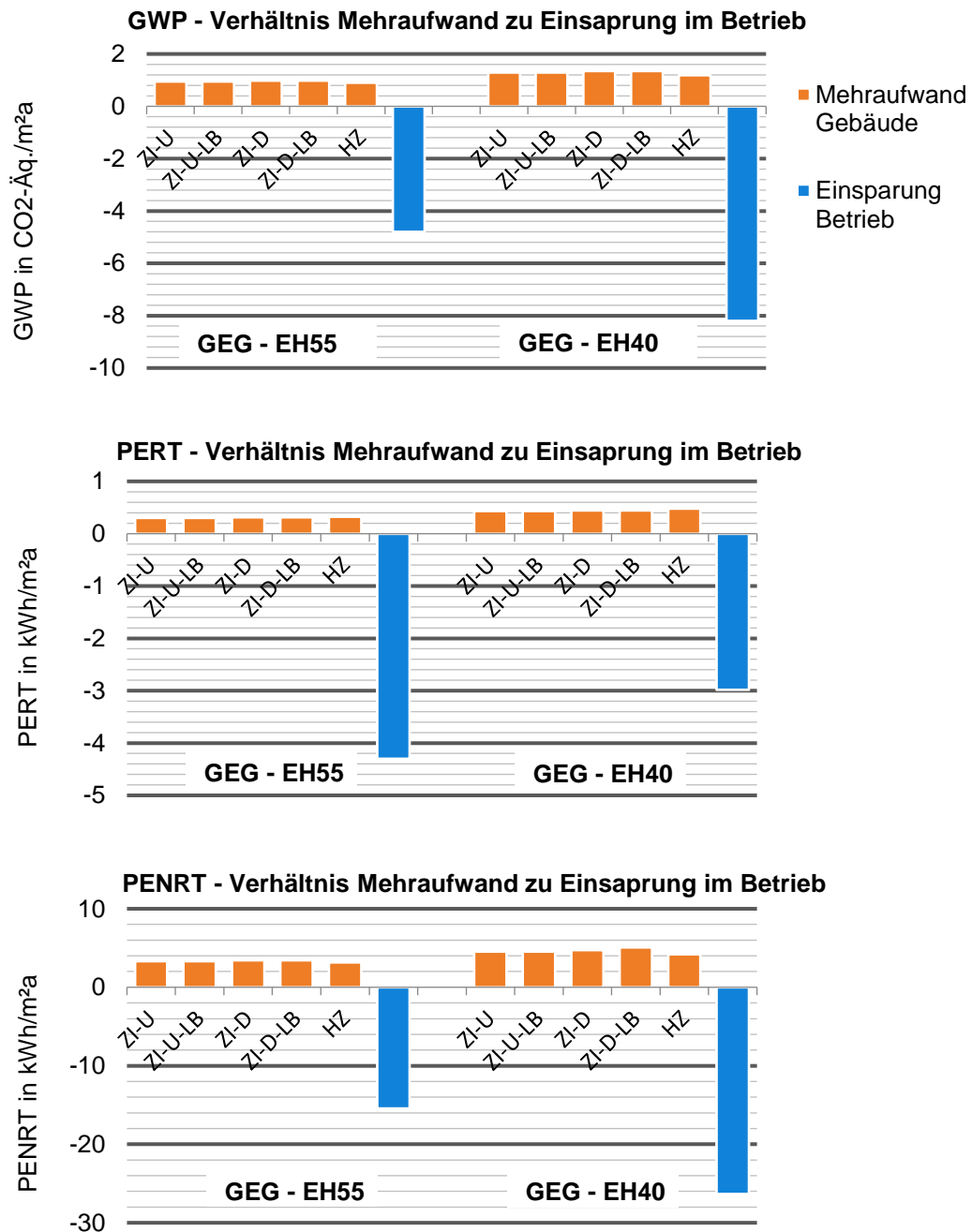


Abbildung 11: Verhältnis von GWP, PERT und PENRT der Mehraufwendungen für die Erreichung eines höheren energetischen Niveaus (verglichen mit dem GEG Standard) im Vergleich zu den dadurch erzielbaren Einsparungen im Betrieb pro m² Nutzfläche und Jahr

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auszug der wichtigsten Kennwerte des Typengebäudes	11
Tabelle 2:	Anforderungen der Standards an den Transmissionswärmeverlust und den Primärenergiebedarf	14
Tabelle 3:	Übersicht Außenwandkonstruktionen	15
Tabelle 4:	Übersicht Konstruktionen Dach und Fenster	16
Tabelle 5:	Übersicht Konstruktionen Keller	16
Tabelle 6:	Übersicht Konstruktionen Innenbauteile	17
Tabelle 7:	Versorgungsvarianten für das Typengebäude	23
Tabelle 8:	Übersicht der mittleren Mehraufwendungen zu den Einsparungen bei Verbesserung des energetischen Niveaus pro m ² Nutzfläche und Jahr	32

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 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.	6
Abbildung 2: Phasen des Lebenszyklus, Eigene Darstellung nach DIN EN 15804	8
Abbildung 3: Ansichten des Typengebäudes	12
Abbildung 4: Grundrisse EG und 1. OG des Typengebäudes	13
Abbildung 5: GWP, PERT und PERNT für die verschiedenen Bauteile über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren pro m ² Gebäudenutzfläche A _n und Jahr des Beispielgebäudes im EH55 Standard	19
Abbildung 6: GWP, PERT und PENRT unterteilt nach Komponenten über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren pro m ² Gebäudenutzfläche A _n und Jahr des Beispielgebäudes im EH55 Standard	22
Abbildung 7: GWP, PERT und PENRT für die verschiedenen Varianten der Konstruktion, sowie die Gebäudetechnik am Beispiel des EH 55 für eine Nutzungsdauer von 80 Jahren pro m ² Nutzfläche und Jahr	24
Abbildung 8: GWP, PERT und PENRT über den gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren für verschiedene Bauweisen und energetische Standards pro m ² Nutzfläche und Jahr	26
Abbildung 9: GWP, PERT und PENRT für die Konstruktion des Gebäudes (ohne Gebäudetechnik und Betrieb) über den Lebenszyklus für einen Betrachtungszeitraum von 50 und 80 Jahren pro m ² Nutzfläche und Jahr	28
Abbildung 10: Jährliches GWP, PERT und PENRT pro m ² Nutzfläche und Jahr für die das Gebäude inkl. Gebäudetechnik für einen Betrachtungszeitraum von 80 Jahren im Vergleich zum jährlichen Betrieb für die verschiedenen energetischen Standards	30
Abbildung 11: Verhältnis von GWP, PERT und PENRT der Mehraufwendungen für die Erreichung eines höheren energetischen Niveaus (verglichen mit dem GEG Standard) im Vergleich zu den dadurch erzielbaren Einsparungen im Betrieb pro m ² Nutzfläche und Jahr	33

9 Literaturverzeichnis

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Online. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>.

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (Hg.): ÖKOBAUDAT. Online verfügbar unter <https://www.oekobaudat.de/>, zuletzt geprüft am 17.09.2021.

Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. (2021a): Umwelt Produktdeklaration - Mauerziegel (mit Dämmstoff gefüllt). Deklarationsnummer EPD-BDZ-20210071-ICG1-DE.

Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. (2021b): Umwelt Produktdeklaration - Mauerziegel (ungefüllt). Deklarationsnummer EPD-BDZ-20210066-ICG1-DE.

SIA 2032, 01.08.2020: Graue Energie- Ökobilanzierung für die ERstellung von Gebäuden.

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

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

Prof. Dr.-Ing. Holm, Andreas; Kagerer, Florian (2019): Graue Energie von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie- Gebäudestandard. Hg. v. DGfM Service GmbH.

Prof. Dr.-Ing. Holm, Andreas; Kagerer, Florian; Maderspacher, Christine; Sprengard, Christoph; Walberg, Dietmar; Gniechwitz, Timo (2017): Wirtschaftlichkeit von Einfamilienhäusern in Niedrigstenergie- Gebäudestandard. Hg. v. DGfM.

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

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

VDI 2067 Blatt 1, 09.2012: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.