

# **Einfluss der Dämmung auf das Treibhauspotential (GWP) und den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand (PENRT) über den gesamten Gebäudelebenszyklus unter Berücksichtigung verschiedener Effizienzstandards am Beispiel eines Einfamilienhauses, eines Mehrfamilienhauses und einer Lagerhalle. Vergleich mit den Anforderungen des Qualitätssiegels Nachhaltige Gebäude (QNG)**

FIW München:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm

Raphaela Ivanica

Wolfgang Schmidt



# FIW München

**Forschungsbericht FO-2022-08**

FO-2022-08

**Einfluss der Dämmung auf das Treibhauspotential (GWP) und den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand (PENRT) über den gesamten Gebäudelebenszyklus unter Berücksichtigung verschiedener Effizienzstandards am Beispiel eines Einfamilienhauses, eines Mehrfamilienhauses und einer Lagerhalle. Vergleich mit den Anforderungen des Qualitätssiegels Nachhaltige Gebäude (QNG)**

im industriellen Auftrag

Der Bericht umfasst: 76 Seiten incl.

11 Seiten Anhang

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

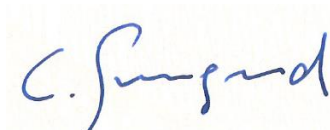
Gräfelfing, den 4. Mai 2023

Institutsleiter:in



Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm

Abteilungsleiter:in



Christoph Sprengard

Bearbeiter:in



Raphaela Ivanica

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Durchgeführte Rechnerische Untersuchungen</b>	<b>6</b>
2.1	Untersuchte Energiestandards	6
2.2	Untersuchte Dämmstoffe	7
2.2.1	Polyurethan-Hartschaum (PU)	7
2.2.2	Expandiertes Polystyrol (EPS)	8
2.2.3	Steinwolle (MW)	8
2.2.4	Holzfaser (HolzF)	9
2.3	Typengebäude	10
2.3.1	Einfamilienhaus	10
2.3.2	Mehrfamilienhaus	15
2.3.3	Lagerhalle	21
<b>3</b>	<b>Methodik der Ökobilanzierung</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Ökobilanz</b>	<b>29</b>
4.1	Einfamilienhaus	29
4.1.1	Treibhausgaspotential (GWP)	29
4.1.2	Primärenergieaufwand, nicht erneuerbar (PENRT)	32
4.1.3	QNG-Grenzwerte	34
4.2	Mehrfamilienhaus	35
4.2.1	Treibhausgaspotential (GWP)	35
4.2.2	Primärenergieaufwand, nicht erneuerbar (PENRT)	38
4.2.3	QNG-Grenzwerte	41
4.2.4	Mehrfamilienhaus – Vergleich von Gebäuden mit PU- und Holzfaserdämmung bei gleichen Außenmaßen	42
4.2.5	Vergleich der Umweltwirkungen über den Lebenszyklus: Altbaustandard WSchV82, GEG 23 und EFH40 H'T55 am Beispiel Mehrfamilienhaus	44
4.3	Lagerhalle	47
4.3.1	Treibhausgaspotential (GWP)	47
4.3.2	Primärenergieaufwand, nicht erneuerbar (PENRT)	49
4.3.3	QNG-Grenzwerte	50

<b>5</b>	<b>Diskussion und kritische Betrachtung</b>	<b>51</b>
5.1	Diskussion der Ergebnisse	51
5.2	Einschränkungen in der Betrachtung	53
<b>6</b>	<b>Kurzfassung und Fazit</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Anhang: Detaillierte Ergebnisse &amp; weiterführende Informationen</b>	<b>56</b>
7.1	Typengebäude EFH	56
7.2	Typengebäude MFH	57
7.3	Ergebnisse EFH, gegliedert nach Materialien – absolute Werte	58
7.4	Ergebnisse MFH, gegliedert nach Materialien – absolute Werte	62
7.5	Ergebnisse Lagerhalle, gegliedert nach Materialien – absolute Werte	66
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>69</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>72</b>

## 1 Zielsetzung

Mit dem Trend zu nahezu „zero Emission“-Gebäuden bzw. gehobenen Energiestandards für Wohn- und Nichtwohngebäude, können der Primärenergiebedarf sowie die Treibhausgasemissionen während der Nutzungsphase deutlich reduziert werden. Dadurch rücken die Umweltwirkungen, resultierend aus der Herstellung und dem Einbau sowie der End-of-Life Phase näher in den Fokus. Im Rahmen dieser Studie wird eine vergleichende, ökobilanzielle Untersuchung über den gesamten Gebäude-Lebenszyklus von drei Gebäudetypen mit unterschiedlichen Energiestandards und Dämmprodukten dargestellt.

Ziel der Studie ist es, aufzuzeigen, welchen Anteil die Gebäudedämmung an Treibhausgaspotential (GWP) und Primärenergieaufwand nicht erneuerbar (PENRT) über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes aufweist. Dabei soll beispielhaft untersucht werden, wie die Gebäudeart und -konstruktion die Ergebnisse beeinflussen. Dafür werden drei verschiedene Gebäudetypen herangezogen: Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Lagerhalle.

Zudem soll untersucht werden, wie sich die Anteile der grauen Emissionen (GWP) und grauen Energie (PENRT) durch gestiegene Anforderungen an die Energieeffizienz verändern. Mit dem gestiegenen Anspruch an die thermische Gebäudehülle steigt auch der Materialeinsatz während der Herstellungsphase des Gebäudes. Deshalb soll geprüft werden, ob das GWP während der Herstellungs-, Instandsetzung- und Entsorgungsphase durch den verringerten Endenergiebedarf während der Nutzungsphase ausgeglichen werden können. Untersucht werden die Energiestandards: GEG 2023 (erste Novelle gültig seit 01.01.23), die Effizienzhausstandards EH 55 mit  $H'_T$  85, EH 55 mit  $H'_T$  70, EH 40 mit  $H'_T$  70 sowie EH 40  $H'_T$  55.

Ein weiteres Ziel der Studie ist der Vergleich von Gebäuden mit verschiedenen Dämmstoffen. Dadurch erhält man eine Einschätzung wie sich die grauen Emissionen und Energie der verschiedenen Dämmstoffarten auf den Gebäudelebenszyklus auswirken. Für die Untersuchung wurden die Dämmstoffe Polyurethan-Hartschaum (PU) expandiertes Polystyrol (EPS), Steinwolle (MW) und Holzfaser (HolzF) ausgewählt.

## 2 Durchgeführte Rechnerische Untersuchungen

Für die Vergleichsstudie werden drei verschiedene Gebäudetypen fünf unterschiedlichen Energiestandards und verschiedenen Dämmstoffen miteinander verglichen. Dabei soll untersucht werden welchen Einfluss der Gebäudetyp, der Energiestandard und die Dämmstoffart auf das GWP und PENRT im Gebäudelebenszyklus haben.

### 2.1 Untersuchte Energiestandards

Der Energiestandard bezieht sich dabei auf einen Vergleich mit dem Referenzgebäude, welches im Gebäudeenergiegesetz (GEG) definiert ist (Deutscher Bundestag (BT) 2022). Untersucht wird zunächst ein Gebäude, welches die Anforderungen des GEG für Neubauten entspricht. Für die Berechnungen sollen bereits Kriterien des GEG 2023 (ersten Novelle gültig seit 1. Januar 2023) eingehalten werden. Diese beinhaltet u.a. gestiegene Anforderungen an den Primärenergiebedarf ( $Q_P$ ). Dieser darf nach GEG 2023 lediglich 55% des im GEG definierten Referenzgebäudes verursachen. Der spezifischen Transmissionswärmeverlustes ( $H'_T$ ) soll dabei nicht angeglichen werden. Eine weitere Anpassung betrifft den Primärenergiefaktor für Strom zum Bertreiben einer Wärmepumpe, dieser wird bei Großwärmepumpen von 1,8 auf 1,2 reduziert. Da in dieser Studie ausschließlich Kleinanlagen betrachtet werden, hat diese Änderung keine Auswirkung auf die Berechnungen. Zusätzlich zur GEG 23-Variante werden die KfW-Effizienzhaustandards (EH) 40 und 55 betrachtet (KfW 2023), sowie die EH 40 und 55 mit erhöhten Anforderungen an den Transmissionswärmeverlust. Die EH mit erhöhten Anforderungen sollen einen Zwischenschritt der Stufen GEG 23 und EH 40 und 55 bilden. Die geforderten Werte für den  $Q_P$  sowie  $H'_T$  für diese Studie sind in Tabelle 1 dargestellt. Für die Lagerhalle werden die Energiestandards GEG 23, EH 55  $H'_T70$  (EH 55) und EH 40  $H'_T55$  (EH 40) untersucht.

**Tabelle 1:** Auflistung der in der Studie betrachteten Energiestandards, die Angaben des Primärenergiebedarfs sowie des Transmissionswärmeverlustes beziehen sich auf das im GEG definierte Referenzgebäude

Bezeichnung	Primärenergiebedarf (QP) im Vergleich zur Referenzausführung	Spezifischer Transmissionswärmeverlust ( $H'_T$ ) im Vergleich zur Referenzausführung
GEG 23	55%	100%
EH 55 $H'_T$ 85	55%	85%
EH 55 $H'_T$ 70	55%	70%
EH 40 $H'_T$ 70	40%	70%
EH 40 $H'_T$ 55	40%	55%

## 2.2 Untersuchte Dämmstoffe

Bei der Untersuchung werden mit unterschiedlichen Dämmstoffen gedämmte Gebäude untereinander verglichen. Der Fokus der Untersuchung wird, entsprechend der Praxis, auf die Einhaltung der Grenzwerte des Primärenergiebedarfs ( $Q_P$ ) und des spezifischen Transmissionswärmeverlusts ( $H_T$ ) der jeweiligen Energiestandards gelegt. Die Anforderungen an die thermische Hülle der unterschiedlichen Typengebäude und Dämmstoffe wird dabei bestmöglich an die gegebenen Grenzwerte der Effizienzhausklassen angepasst. Diese Vorgehensweise bietet zum einen eine Optimierung der untersuchten Typengebäude und zum anderen eine gute Vergleichbarkeit der Varianten untereinander bzw. zu anderen Fallstudien. Da es sich bei dieser Studie um einen anwendungsbezogenen Vergleich der Dämmstoffe handelt (praxisnahe Dämmstoffdicken), ergeben sich geringe Abweichungen bei den U-Werten der einzelnen Bauteile. Für die thermische Gebäudehülle werden bei allen Varianten einheitliche Werte angestrebt.

Zu Vergleichszwecken wird zudem ein Vergleich mit identischen U-Werten der Bauteile vorgenommen. Dabei wird die Polyurethan-Variante als Basisfall. Der für die PU-Dämmung ermittelte R-Wert dient dann als Ausgangspunkt für die Berechnung der Dämmdicken der Dämmstoffalternativen. Bei dieser „R-Wert Variante“ genannten Vergleichsbetrachtung ergeben sich auf Millimeter gerundete Dämmstoffdicken, die nicht den handelsüblichen Dicken (in 20 mm Stufen) entsprechen.

Die untersuchten Dämmstoffe werden nachfolgend vorgestellt. Neben Polyurethan werden extrudiertes Polystyrol, Steinwolle und Holzfaser untersucht und miteinander verglichen. Je nach Einsatzgebiet werden unterschiedliche Anforderungen an die verwendeten Dämmstoffe gestellt. Nachfolgend werden die Eigenschaften der Dämmstoffe in den jeweiligen Anwendungen dargestellt und die verwendeten Hintergrunddatensätze für die Berechnung der Ökobilanz genannt. Die wärmetechnische Bemessung erfolgt mit den Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit, die für die untersuchten Dämmstoffe in den jeweiligen Anwendungen Wand, Dach und Kellerdecke aus den von den Herstellern deklarierten Nennwerten in Verbindung mit DIN 4108-4 ermittelt wurden.

### 2.2.1 Polyurethan-Hartschaum (PU)

Für das WDV-System der Außenwand des EFH und MFH wird ein PU-Blockschaum mit einer Rohdichte  $\rho$  von 30-37 kg/m<sup>3</sup> als Standardfall angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit variiert dabei mit der Schichtdicke des Blockschaums:  $\lambda_B$   $d < 80$  mm = 0,026 W/(m·K),  $\lambda_B$   $80 \leq d < 120$  mm = 0,025 W/(m·K),  $\lambda_B$   $d > 120$  mm = 0,024 W/(m·K). Zur Berechnung der Umweltwirkungen wird repräsentativ für PU der Ökobaudat-Datensatz „PU-Dämmplatten aus Blockschaumstoff“ (IVPU 2016) verwendet.

Für die Aufsparrendämmung des Pult- und Flachdaches des EFH und MFH wird eine PU-Dämmplatte mit Aluminium-Deckschicht mit einer Rohdichte  $\rho$  von  $>30$  kg/m<sup>3</sup> und einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von 0,023 W/(m·K) angenommen. Zur Berechnung der

Umweltwirkungen wird repräsentativ für PU der Ökobaudat-Datensatz „PU-Dämmplatten mit 50µm Aluminium-Deckschicht“ (IVPU 2021a) verwendet.

Zum Dämmen der Kellerdecke wird ebenfalls eine PU-Dämmplatte mit Aluminium-Deckschicht mit einer Rohdichte  $\rho$  von 30 kg/m<sup>3</sup> und einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von 0,023 W/(m·K) angenommen. Zur Berechnung der Umweltwirkungen wird repräsentativ für Polyurethandämmstoffe der Ökobaudat-Datensatz „PU-Dämmplatten mit Aluminium-Mehrlagen-Deckschicht“ (IVPU 2021b) verwendet.

Die Dämmebene der Außenwände und des Daches der Lagerhalle wird durch Sandwichelementen ausgeführt. Zur Berechnung der Umweltwirkungen wird repräsentativ für PU der Ökobaudat-Datensatz „Double skin steel faced sandwich panels with a core made of polyurethane“ (PPA-Europe 2018b) verwendet.

### 2.2.2 Expandiertes Polystyrol (EPS)

Für das WDV-System der Außenwand des EFH und MFH wird ein Standard EPS 032 in grau verwendet. Die Rohdichte  $\rho$  weist dabei einen Wert von 15-20 kg/m<sup>3</sup> auf. Die Ökobaudat 2021\_II bietet zwei herstellereigenspezifische Datensätze für EPS-Hartschaum bei denen die Randbedingungen jedoch nicht zu den Anforderungen passen. Daher wird bei den Hintergrunddaten repräsentativ für EPS auf die Umweltproduktdeklaration (EPD) „EPS-Hartschaum – grau mit niedriger Rohdichte vorzugsweise für WDVS und Innendämmung“ (IVH 2022a) zurückgegriffen.

Für das Pultdach im EFH sowie das Flachdach im MFH wird ein weißer EPS-Hartschaum als Standardfall angenommen. Der Hartschaum hat eine Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von 0,035 W/(m·K) und eine Rohdichte  $\rho$  von 30 kg/m<sup>3</sup>. Als Dämmmaterial für die Kellerdecke wird ebenfalls ein weißer EPS-Hartschaum mit einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von 0,035 W/(m·K) und einer Rohdichte  $\rho$  von 30 kg/m<sup>3</sup> verwendet. Die Ökobilanzdaten werden einer EPD entnommen, da die gegebenen Ökobaudat-Datensätze nicht für die gesetzten Rahmenbedingungen passen. Die verwendete EPD ist repräsentativ für EPS: „EPS-Hartschaum – weiß mit hoher Rohdichte vorzugsweise für Perimeter und Sockeldämmung, sehr hohe Druckbelastbarkeit“ (IVH 2022b).

EPS wird üblicherweise nicht für Stahlsandwichelemente verwendet, daher wird für die Lagerhalle keine EPS-Variante berechnet.

### 2.2.3 Steinwolle (MW)

Für die WDVS-Dämmung in der Außenwandkonstruktion im EFH und MFH wird Steinwolle mit einer Rohdichte  $\rho$  von 105 kg/m<sup>3</sup> und einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von 0,035 W/(m·K) als Standardfall angenommen. Zum Dämmen der Kellerdecke wird eine Steinwolle mit einer Rohdichte  $\rho$  von 110 kg/m<sup>3</sup> und einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von 0,035 W/(m·K) eingesetzt. Zur Berechnung der Ökobilanz wird repräsentativ für Steinwolldämmungen der Ökobaudat-Datensatz „ROCKWOOL Steinwolle-Dämmstoff im mittleren Rohdichtenbereich“ (ROCKWOOL 2018b) verwendet.



Für die Modellierung der Pult- und Flachdachkonstruktion im EFH und MFH wird eine DAA-Steinwolldämmung mit einer Rohdichte  $\rho$  von  $160 \text{ kg/m}^3$  und einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von  $0,038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  als Standardfall angenommen. Zur Berechnung der Ökobilanz wird repräsentativ für Steinwolldämmungen der Ökobaudat-Datensatz „ROCKWOOL Steinwolle-Dammstoff im hohen Rohdichtenbereich“ (ROCKWOOL 2018a) verwendet.

Bei den verwendeten Ökobaudat-Datensätzen ist zu erwähnen, dass die Datensätze Durchschnittswerte repräsentieren. Die beschriebenen Rohdichten der Datensätze weichen daher von den angenommenen Standardwerten ab. So weist der Datensatz für Steinwolle im hohen Rohdichtenbereich eine durchschnittliche Rohdichte  $\rho$  von  $155 \text{ kg/m}^3$  aus (für den Ausgangsfall sind  $160 \text{ kg/m}^3$  für das Flachdach angenommen). Und der Datensatz für Steinwolle im mittleren Rohdichtebereich eine durchschnittliche Rohdichte  $\rho$  von  $96 \text{ kg/m}^3$ . Im Ausgangsfall wird für die Rohdichte  $\rho$  im Durchschnitt  $105 \text{ kg/m}^3$  für das WDV-S-Dämmung und  $110 \text{ kg/m}^3$  für die Hartschaumdämmung in der Kellerdecke angenommen.

Die Dämmebene der Außenwände und des Daches der Lagerhalle wird durch Sandwichelementen ausgeführt. Zur Berechnung der Umweltwirkungen wird repräsentativ für MW der Ökobaudat-Datensatz „Double skin steel faced sandwich panels with a core made of mineral wool“ (PPA-Europe 2018a) verwendet.

#### 2.2.4 Holzfaser (HolzF)

Für das WDV-System der Außenwand des EFH und MFH wird eine Holzfaserdämmplatte mit einer Rohdichte  $\rho$  von  $110 \text{ kg/m}^3$  und einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von  $0,039 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  als Standardfall angenommen. Bei der Modellierung der Pult- und Flachdachkonstruktion im EFH und MFH wird eine Holzfaserdämmplatte mit einer Rohdichte  $\rho$  von  $140 \text{ kg/m}^3$  und einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von  $0,042 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  als Standardfall angenommen. Und bei der Holzfaserplatte für die Dämmung der Kellerdecke eine Rohdichte  $\rho$  von  $160 \text{ kg/m}^3$  und einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  von  $0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

Für die Berechnung der Umweltwirkungen wird repräsentativ für Holzfaserdämmstoffe der Ökobaudat-Datensatz „STEICO Holzfaserdämmplatten aus dem Trockenverfahren“ (STEICO SE 2020) verwendet. Der Datensatz ist ein Durchschnittsdatensatz aus verschiedenen Produkten des Herstellers, die einzelnen Produkte sind auch gelistet. Dabei variieren die Rohdichten der Produkte zwischen  $110 \text{ kg/m}^3$  und  $210 \text{ kg/m}^3$ . Die Berechnungen der Hintergrunddaten beziehen sich auf ein Produkt mit einer Rohdichte von  $140 \text{ kg/m}^3$ . Somit ergeben sich Abweichungen in der Rohdichte zum angenommenen Standardfall für die Dämmung der Kellerdecke.

Holzfaser wird üblicherweise nicht für Stahlsandwichelemente verwendet, daher wird für die Lagerhalle keine HolzF-Variante berechnet.

## 2.3 Typengebäude

Für die oben beschriebenen Variationen der Energiestandards in unterschiedlichen Materialausführungen werden drei Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus und Lagerhalle) herangezogen.

### 2.3.1 Einfamilienhaus

Für die Vergleichsstudie wird das Typengebäude Einfamilienhaus (EFH) der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE eV), Kiel herangezogen. Es handelt es sich um ein freistehendes EFH im mittleren Qualitätssegment mit Pultdach, das nach Norden orientiert ist. Das Gebäude verfügt über ein beheiztes Erdgeschoss und Dachgeschoss und ist vollständig unterkellert, das Kellergeschoss ist unbeheizt (Walberg et al. 2015). Die thermische Gebäudehülle wird durch die Außenwände (AW), das Pultdach (DA) und die Kellerdecke (KD) abgebildet. Die Gebäudekennwerte können Tabelle 2 entnommen werden, die Planunterlagen sind dem Anhang 8.1 zu entnehmen. Bei allen Berechnungsvarianten wurden die gegebenen Gebäudekennwerte verwendet.

Für alle Berechnungsvarianten wird ein Wärmebrückenzuschlag von  $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angenommen. Bei der EH 40 H'T 55 Variante wird davon ausgegangen, dass eine genaue Berechnung für den Wärmebrückenzuschlag vorgenommen wurde. Dadurch wurde dieser auf  $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  reduziert.

**Tabelle 2: Gebäudekennwerte Typengebäude EFH**

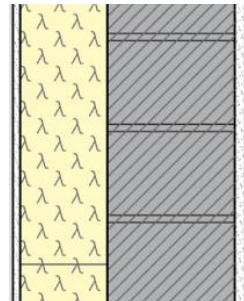
Kennwert	
Gebäudenutzfläche $A_N$	172 m <sup>2</sup>
beheizte Fläche	143 m <sup>2</sup>
äußeres Bruttovolumen	539 m <sup>3</sup>
Vollgeschosse	3
beheizt	2

### Außenwand

Die Außenwand wird in Massivbauweise mit 240 mm Ziegeln und einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) ausgeführt. Der genaue Schichtenaufbau kann Abbildung 1 entnommen werden. Das WDV-System der Außenwand weist eine Nutzungsdauer von 40 Jahren (BBSR 2017), wodurch sich ein Erneuerungszyklus während des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren ergibt.

Das für die Berechnungen verwendete Dämmmaterial passt sich an die jeweilige Variante an und ist nur exemplarisch im Schichtenaufbau dargestellt. Die Dämmstärken sind an die jeweiligen Energieeffizienzhaus-Standards angepasst.

Für die Fenster in der Außenwand wurde bei der GEG 23 Variante eine 2-fach-Ver-  
glasung gewählt, bei den anderen Varianten eine 3-fach-Ver-  
glasung. Dies kann dazu  
führen, dass trotz eines besseren Energiestandards geringere Dämmstärken ausrei-  
chen um den Grenzwert für  $H_T$  einzuhalten.

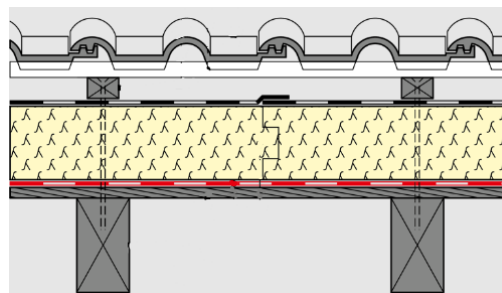


Innenfarbe  
Kalk-Gips-Putz 10 mm  
Ziegel 240 mm  
Klebemörtel mineralisch 4,0 kg/m<sup>2</sup>  
Dämmung (je nach Variante)  
Glasfasergewebe 0,18 kg/m<sup>2</sup>  
Kunstharzspachtel 4,0 kg/m<sup>2</sup>  
Voranstrich Kunstharz  
Kunstharzputz 4,0 kg/m<sup>2</sup>  
Fassadenfarbe

**Abbildung 1:** Schichtenaufbau Außenwand EFH mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) von innen (rechts) nach außen (links) (IVPU 2023d)

## Pulldach

Die Dachfläche des Pulldaches ist nach Norden ausgerichtet. Die Sparren sind im Innenraum sichtbar (Sichtdachstuhl). Die Dachkonstruktion besteht aus 200 mm Sparren, einer 20 mm Holzschalung und einer Aufsparrendämmung. Als Deckung werden Dachziegel auf einer Holzlattung verwendet. Der Schichtenaufbau ist Abbil-  
dung 2 zu entnehmen. Für die Aufsparrendämmung wird eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen (BBSR 2017), daher erfolgt kein Austausch der Dämmung wäh-  
rend des Betrachtungszeitraums.



Dachziegel  
Lattung 30 x 50 mm  
Konter-Lattung 30 x 50 mm  
Abdichtungsbahn  
Dämmung (je nach Variante)  
Dampfbremse PE  
Holzschalung 20 mm  
Holzbalken 200 mm

**Abbildung 2:** Schichtenaufbau Pulldach EFH mit Aufsparrendämmung von außen nach innen (IVPU 2023c)

Das für die Berechnungen verwendete Dämmmaterial passt sich an die jeweilige Va-  
riante an und ist nur exemplarisch im Schichtenaufbau dargestellt. Die Dämmstärken  
sind an die jeweiligen Energieeffizienzhaus-Standards angepasst.

## Kellerdecke

Die Kellerdecke ist in Stahlbetonbauweise realisiert und bildet den thermischen Ge-  
bäudeabschluss nach unten. Die Dämmebene befindet sich oberhalb des Stahlbe-  
tons und wird durch eine Trittschalldämmung und einen Zementestrich abgedeckt.  
Als Fußbodenbelag wurde Parkett gewählt, was für die Berechnungen eine

unbedeutende Rolle spielt. Der genaue Schichtenaufbau kann Abbildung 3 entnommen werden. Für die Dämmung der Kellerdecke wird eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen (BBSR 2017), daher erfolgt keine Austausch der Dämmung während des Betrachtungszeitraums.

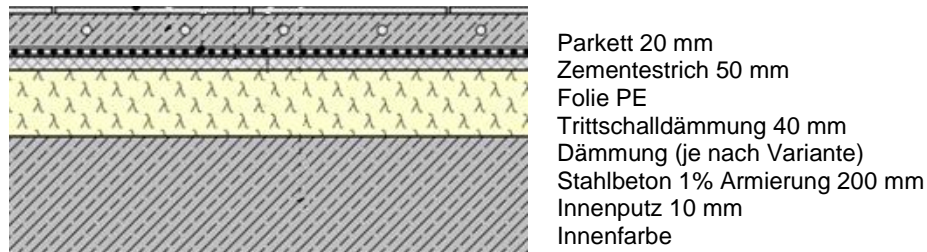


Abbildung 3: Schichtenaufbau Kellerdecke EFH als thermischer Gebäudeabschluss nach unten mit Schichtenfolge von innen nach außen (IVPU 2023a)

Das für die Berechnungen verwendete Dämmmaterial passt sich an die jeweilige Variante an und ist nur exemplarisch im Schichtenaufbau dargestellt. Die Dämmstärken sind an die jeweiligen Energieeffizienzhaus-Standards angepasst.

### Anlagentechnik

Die Berechnungen der Primär- und Endenergiebedarfe der verschiedenen Varianten erfolgt mit der Software ZUB Helena (ZUB Systems GmbH 2019). Die berechneten Endenergiebedarfe für die verschiedenen Effizienzhaus-Standards und Dämm-Varianten sind in Tabelle 3 dargestellt. Dabei wird als Endenergiebedarf die Energiemenge bezeichnet, die von der Anlagentechnik zur Bereitstellung der Wärme und des Trinkwarmwassers benötigt wird.

Zur Wärmeerzeugung und Trinkwassererwärmung wird eine Wasser/Wasser **Wärmepumpe** mit einer Nennleistung von 4,3 kW und einer elektronischen Spitzenlastabdeckung verwendet. Die Vorlauf-/Rücklauftemperatur für das System beträgt 35/28°C. Die Wärmeübertragung erfolgt mittels bauteilintegrierter Flächenheizung (Fußbodenheizung). Zusätzlich ist eine **solarthermische Anlage** mit Flachkollektoren auf dem Dach des Gebäudes montiert. Die Fläche entspricht dabei den Mindestanforderungen gemäß §35 des GEG mit 0,04 m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro m<sup>2</sup> beheizter Nutzfläche für Gebäude bis zu zwei Wohneinheiten und 0,03 m<sup>2</sup> für Gebäude mit mehr als zwei Wohneinheiten (Deutscher Bundestag (BT) 2022).

Zudem wird in allen Varianten ein **zentrales Abluftsystem** eingesetzt um den geforderten Mindestluftwechsel zu gewährleisten. Das System ist im Ganzjahresbetrieb und die Abluft wird zentral abgeführt. Es erfolgt keine Kühlung der Wohneinheiten.

In Tabelle 3 sind die Energiestandards sowie der Endenergiebedarf der Nutzungsphase gelistet. Die Endenergie beinhaltet dabei die gesamte Anlagentechnik und wird in kWh/(m<sup>2</sup>\*a) angegeben. Dabei bezieht sich die Fläche auf die beheizte Fläche im Gebäude (ohne Kellergeschoss da unbeheizt). Für die Berechnungen des GWP und der PENRT wird der Endenergiebedarf der Nutzungsphase auf die gesamte Nutzfläche umgelegt (inkl. Kellergeschoss). Die Berechnung des GWP erfolgt mit einem Emissionswert von 350 g/kWh (Pehnt et al. 2022). Dieser Wert ist bereits

zukunftsorientiert und daher niedriger als der aktuell im deutschen Strommix gegebene Emissionswert von 550 g/kWh. Der Primärenergiefaktor für den Strommix bleibt unverändert bei 1,8.

**Tabelle 3: Darstellung des Endenergiebedarfs in kWh pro Quadratmeter beheizter Fläche gegliedert nach dem GEG bzw. den Effizienzhausstandards sowie Dämmvariante für das EFH**

Variante	GEG 23	EH 55 H' <sub>T</sub> 85	EH 55 H' <sub>T</sub> 70	EH 40 H' <sub>T</sub> 70	EH 40 H' <sub>T</sub> 55
<b>PU</b>	20,1	17,7	17,3	16,3	15,1
<b>EPS</b>	21,4	19,2	17,6	16,3	15,3
<b>MW</b>	21,3	18,8	17,4	16,2	15,2
<b>HolzF</b>	21,3	19,3	17,5	16,4	15,3

### Eingabeparameter für die Untersuchungen

Aufgrund der verschiedenen Anforderungen an Energiestandards ergeben sich unterschiedliche Dämmstoffdicken für die jeweiligen Varianten. Die Dämmstoffdicken wurden dabei so gewählt, dass die **Grenzwerte für den Primärenergiebedarf ( $Q_P$ ) und den spezifischen Transmissionswärmeverlust ( $H'_T$ )** eingehalten werden. Da die Dämmstoffdicken auf handelsübliche Maße (20 mm Stufen) aufgerundet werden, ergeben sich für jede Dämmstoffvariante etwas unterschiedliche  $H'_T$ -Werte, die jedoch alle unter den Grenzwerten liegen. Die verwendeten Dämmstoffdicken sind in Tabelle 4 gelistet.

**Tabelle 4: Gegenüberstellung der Eingabeparameter EFH: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards**

	<b>GEG 23</b>	<b>EH 55 H'<sub>T</sub> 85</b>	<b>EH 55 H'<sub>T</sub> 70</b>	<b>EH 40 H'<sub>T</sub> 70</b>	<b>EH 40 H'<sub>T</sub> 55</b>
H' <sub>T</sub> Grenzwerte in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,407	0,346	0,285	0,285	0,224
<b>Polyurethan – Dämmstärken in mm</b>					
H' <sub>T</sub> in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,388	0,315	0,280	0,253	0,222
Außenwand	80	80	120	160	200
Pultdach	120	120	140	160	180
Kellerdecke	80	80	80	100	100
<b>EPS – Dämmstärken in mm</b>					
H' <sub>T</sub> in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,400	0,346	0,280	0,252	0,224
Außenwand	120	100	180	240	300
Pultdach	140	120	180	260	280
Kellerdecke	80	80	100	120	120
<b>Steinwolle – Dämmstärken in mm</b>					
H' <sub>T</sub> in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,400	0,339	0,284	0,254	0,224
Außenwand	140	120	180	260	300
Pultdach	140	120	220	280	300
Kellerdecke	80	80	100	120	120
<b>Holzfaser – Dämmstärken in mm</b>					
H' <sub>T</sub> in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,402	0,344	0,284	0,254	0,224
Außenwand	160	140	200	300	340
Pultdach	160	140	220	300	320
Kellerdecke	80	80	120	140	140
<b>Verglasung</b>	<b>2-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>

Zu Vergleichszwecken wird auch die Berechnung des GWP und PENRT mit **identischen R-Werten zum Basisfall** (Polyurethan-Dämmung) vorgenommen. Die Dämmstoffdicken werden aus den R-Wert berechnet und auf Millimeter gerundet. Dadurch ergeben identische H'<sub>T</sub>-Werte. Die Dämmstoffdicken werden genau berechnet und somit nicht in handelsüblichen Maßen (20 mm Stufen) ausgegeben (siehe Tabelle 5).

**Tabelle 5: Gegenüberstellung der Eingabeparameter EFH: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards; gerundet auf ganze Millimeter, identische  $H'_{T}$ -Werte, Referenz PU)**

	<b>GEG 23</b>	<b>EH 55 <math>H'_{T}</math> 85</b>	<b>EH 55 <math>H'_{T}</math> 70</b>	<b>EH 40 <math>H'_{T}</math> 70</b>	<b>EH 40 <math>H'_{T}</math> 55</b>
$H'_{T}$ Grenzwerte in $W/(m^2 \cdot K)$	0,407	0,346	0,285	0,285	0,224
<b>Polyurethan – Dämmstärken in mm</b>					
$H'_{T}$ in $W/(m^2 \cdot K)$	0,388	0,315	0,280	0,253	0,222
Außenwand	80	80	120	160	200
Pultdach	120	120	140	160	180
Kellerdecke	80	80	80	100	100
<b>EPS – Dämmstärken in mm</b>					
$H'_{T}$ in $W/(m^2 \cdot K)$	0,388	0,315	0,280	0,253	0,222
Außenwand	102	102	160	213	267
Pultdach	183	183	213	243	274
Kellerdecke	122	122	122	152	152
<b>Steinwolle – Dämmstärken in mm</b>					
$H'_{T}$ in $W/(m^2 \cdot K)$	0,388	0,315	0,280	0,253	0,222
Außenwand	112	112	175	233	292
Pultdach	198	198	231	264	297
Kellerdecke	122	122	122	152	152
<b>Holzfaser – Dämmstärken in mm</b>					
$H'_{T}$ in $W/(m^2 \cdot K)$	0,388	0,315	0,280	0,253	0,222
Außenwand	125	125	195	260	325
Pultdach	219	219	256	292	329
Kellerdecke	139	139	139	174	174
<b>Verglasung</b>	<b>2-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>

### 2.3.2 Mehrfamilienhaus

Für die Vergleichsstudie des Mehrfamilienhauses (MFH) wird das entsprechende Typengebäude der ARGE eV (Walberg et al. 2015) verwendet. Bei dem Gebäude handelt es sich um ein freistehendes MFH mit Flachdach. Es verfügt über fünf oberirdischen Vollgeschosse und ein unbeheiztes Kellergeschoss. Laut der Dokumentation des ARGE eV sind lediglich 60% des Gebäudes unterkellert. Zur Vereinfachung wird für die Berechnungen in dieser Studie angenommen, dass das gesamte Gebäude unterkellert ist. Laut Planunterlagen ist die Außenwand zum Treppenhaus eine Glasfassade mit einer Pfosten-Riegel-Konstruktion. Für diese Studie wird angenommen, dass die Außenwand durchgängig als Ziegelwand mit WDV-System ausgeführt ist, um die Verglasungsflächen zu reduzieren und damit die Überhitzung im Sommer zu

verhindern. Zudem wird dadurch der Anteil der gedämmten Außenwand erhöht, für die in dieser Studie eine Aussage getroffen werden soll.

Die thermische Gebäudehülle wird durch die Außenwände (AW), das Flachdach (DA) und die Kellerdecke (KD) abgebildet. Die Gebäudekennwerte können Tabelle 6 entnommen werden, die Planunterlagen sind dem Anhang 8.2 zu entnehmen. Bei allen Berechnungsvarianten wurden die gegebenen Gebäudekennwerte verwendet.

**Tabelle 6: Gebäudekennwerte Typengebäude MFH**

Kennwert	
Gebäudenutzfläche $A_N$	1.162 m <sup>2</sup>
Beheizte Fläche	873 m <sup>2</sup>
Äußeres Bruttovolumen	3.325 m <sup>3</sup>
Vollgeschosse	6
beheizt	5

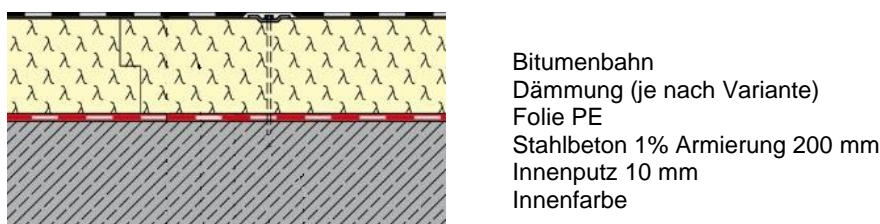
### Außenwand

Der Außenwand-Aufbau des MFH ist identisch zu dem des EFH (siehe Abbildung 1). Lediglich die Dicke des Mauerwerks wird von 240 mm auf 365 mm erhöht. Das WDV-Systems der Außenwand weist eine Nutzungsdauer von 40 Jahren (BBSR 2017), wodurch sich ein Erneuerungszyklus während des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren ergibt.

Das für die Berechnungen verwendete Dämmmaterial passt sich an die jeweilige Variante an und ist nur exemplarisch im Schichtenaufbau dargestellt. Die Dämmstärken sind an die jeweiligen Energieeffizienzhaus-Standards angepasst.

### Flachdach

Das Flachdach des MFH wird in Stahlbetonbauweise ausgeführt. Die Dämmebene befindet sich oberhalb der tragenden Konstruktion. Die Abdichtung besteht aus Bitumenbahnen. Der Schichtenaufbau ist Abbildung 4 zu entnehmen. Die Dachfläche wird zum Aufstellen einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) genutzt. Für die Dämmebene wird eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen (BBSR 2017), daher erfolgt keine Austausch der Dämmung während des Betrachtungszeitraums.



**Abbildung 4: Schichtenaufbau Flachdach MFH mit Stahlbeton-Tragkonstruktion von außen nach innen (IVPU 2023b)**



## Kellerdecke

Der Schichtenaufbau der Kellerdecke des MFH ist identisch zum EFH und kann Abbildung 3 entnommen werden. Für die Dämmung der Kellerdecke wird eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen (BBSR 2017), daher erfolgt keine Austausch der Dämmung während des Betrachtungszeitraums.

## Anlagentechnik

Zur Wärmeerzeugung und Warmwasserbereitung wird eine Wasser/Wasser **Wärmepumpe** mit einer Nennleistung von 23,7 kW und einer elektronischen Spitzenlastabdeckung verwendet. Die Vorlauf-/Rücklauftemperatur für das System beträgt 35/28°C. Die Wärmeübertragung erfolgt mittels Flächenheizung (Fußbodenheizung).

Zusätzlich wird eine **PV-Anlage** mit einer Fläche von 100 m<sup>2</sup> installiert. Es wird angenommen, dass die Module aufgeständert und im 30° Winkel nach Süden ausgerichtet sind. Da das MFH ein Flachdach besitzt und die Module aufgeständert werden, kann nicht die gesamte Dachfläche von 240 m<sup>2</sup>, sondern nur knapp 50% davon verwendet werden. Die PV-Anlage verfügt über eine Nennleistung  $P_{pk}$  von 18,2 kW. Laut QNG-Handbuch muss nur der Anteil der PV-Anlage, der für die eigene Stromproduktion verwendet wird, in die Berechnungen der Umweltwirkungen in die Bilanz aufgenommen werden (PV-Deckungsgrad) (BMWSB 2023a). Der restliche Anteil wird (rechnerisch) einem Dritten (Abnehmer des Stroms) angerechnet.

In Tabelle 7 sind die Energiestandards, der Endenergiebedarf der Nutzungsphase sowie die Deckung des eigenen Strombedarfs mittels der PV-Anlage (PV-Deckungsgrad) gelistet. Die Endenergie beinhaltet dabei die gesamte Anlagentechnik und wird in kWh/(m<sup>2</sup>\*a) angegeben. Dabei bezieht sich die Fläche auf die beheizte Fläche im Gebäude (ohne Kellergeschoss). Für die Berechnungen des GWP und den PENRT wird der Endenergiebedarf der Nutzungsphase auf die gesamte Nutzfläche umgelegt. Die Berechnung des GWP erfolgt mit einem Emissionswert von 350 g/kWh (Pehnt et al. 2022). Der Primärenergiefaktor für den Strommix bleibt unverändert bei 1,8. Der PV-Deckungsgrad wird in % ausgegeben und bezieht sich dabei auf die H'<sub>T</sub>-Variante. Für die R-Wert-Variante ist die Deckungsrate für alle Dämm-Varianten identisch und entspricht den Werten der PU-Dämmung.

**Tabelle 7:** Darstellung des Endenergiebedarf und des PV-Deckungsgrad in Abhängigkeit vom Energieeffizienzstandard. Der PV-Deckungsgrad ergibt sich aus den jeweiligen  $H'_T$ -Werten der Dämmstoff-Varianten und Effizienzhausstandard für das MFH

Variante		GEG 23	EH 55 $H'_T$ 85	EH 55 $H'_T$ 70	EH 40 $H'_T$ 70	EH 40 $H'_T$ 55
<b>PU</b>	$Q_E$ in kWh/(m <sup>2</sup> a)	23,5	21,1	20,2	20,2	18,1
	PV-Deckung in %	29,0	31,5	32,7	32,7	35,5
<b>EPS</b>	$Q_E$ in kWh/(m <sup>2</sup> a)	24,1	21,7	20,2	20,2	18,2
	PV-Deckung in %	28,5	30,8	32,7	32,7	35,5
<b>MW</b>	$Q_E$ in kWh/(m <sup>2</sup> a)	23,8	21,9	20,2	20,2	18,2
	PV-Deckung in %	28,7	30,5	32,7	32,7	35,4
<b>HolzF</b>	$Q_E$ in kWh/(m <sup>2</sup> a)	23,9	22,0	20,2	20,2	18,2
	PV-Deckung in %	28,6	30,4	32,7	32,7	35,4

### Eingabeparameter für die Untersuchungen

Aufgrund der verschiedenen Anforderungen an Energiestandards ergeben sich unterschiedliche Dämmstoffdicken für die jeweiligen Varianten. Die Dämmstoffdicken wurden dabei so gewählt, dass die **Grenzwerte für den Primärenergiebedarf ( $Q_P$ ) und den spezifischen Transmissionswärmeverlust ( $H'_T$ )** eingehalten werden. Da die Dämmstoffdicken auf handelsübliche Maße (20 mm Stufen) aufgerundet werden, ergeben sich für jede Dämmstoffvariante etwas unterschiedliche  $H'_T$ -Werte, die jedoch alle unter den Grenzwerten liegen. Die verwendeten Dämmstoffdicken sind in Tabelle 8 gelistet.

**Tabelle 8: Gegenüberstellung der Eingabeparameter MFH: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards**

	<b>GEG 23</b>	<b>EH 55 H<sub>T</sub> 85</b>	<b>EH 55 H<sub>T</sub> 70</b>	<b>EH 40 H<sub>T</sub> 70</b>	<b>EH 40 H<sub>T</sub> 55</b>
H <sub>T</sub> Grenzwerte in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,449	0,382	0,316	0,316	0,248
<b>Polyurethan – Dämmstärken in mm</b>					
H <sub>T</sub> in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,426	0,347	0,316	0,316	0,245
Außenwand	60	60	80	80	140
Flachdach	120	120	140	140	160
Kellerdecke	80	80	80	80	100
<b>EPS – Dämmstärken in mm</b>					
H <sub>T</sub> in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,444	0,365	0,315	0,315	0,247
Außenwand	80	80	140	140	220
Flachdach	120	120	120	120	200
Kellerdecke	80	80	80	80	100
<b>Steinwolle – Dämmstärken in mm</b>					
H <sub>T</sub> in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,436	0,374	0,315	0,315	0,247
Außenwand	100	80	140	140	220
Flachdach	120	120	180	180	260
Kellerdecke	80	80	80	80	100
<b>Holzfaser – Dämmstärken in mm</b>					
H <sub>T</sub> in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,438	0,376	0,316	0,316	0,248
Außenwand	120	100	160	160	240
Flachdach	120	120	180	180	300
Kellerdecke	80	80	80	80	100
<b>Verglasung</b>	<b>2-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>

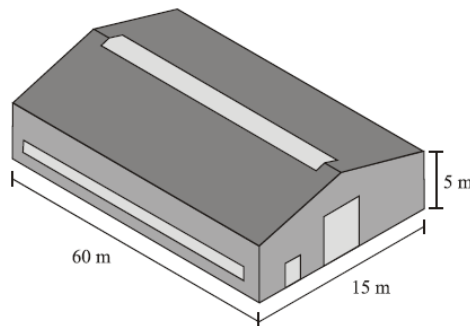
Zu Vergleichszwecken wird auch die Berechnung des GWP und PENRT mit **identischen R-Werten zum Basisfall** (Polyurethan-Dämmung) vorgenommen. Die Dämmstoffdicken werden aus den R-Wert berechnet und auf Millimeter gerundet. Dadurch ergeben sich Dämmstoffdicken, die nicht in der bautechnischen Praxis entsprechen (siehe Tabelle 9).

**Tabelle 9: Gegenüberstellung der Eingabeparameter MFH: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards; gerundet auf ganze Millimeter, identische H'T-Werte, Referenz PU)**

	<b>GEG 23</b>	<b>EH 55 H'T 85</b>	<b>EH 55 H'T 70</b>	<b>EH 40 H'T 70</b>	<b>EH 40 H'T 55</b>
H'T Grenzwerte in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,449	0,382	0,316	0,316	0,248
<b>Polyurethan – Dämmstärken in mm</b>					
H'T in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,426	0,347	0,316	0,316	0,245
Außenwand	60	60	80	80	140
Flachdach	120	120	140	140	160
Kellerdecke	80	80	80	80	100
<b>EPS – Dämmstärken in mm</b>					
H'T in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,426	0,347	0,316	0,316	0,245
Außenwand	74	74	102	102	187
Flachdach	183	183	213	213	243
Kellerdecke	122	122	122	122	122
<b>Steinwolle – Dämmstärken in mm</b>					
H'T in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,426	0,347	0,316	0,316	0,245
Außenwand	81	81	112	112	204
Flachdach	198	198	231	231	264
Kellerdecke	122	122	22	122	152
<b>Holzfaser – Dämmstärken in mm</b>					
H'T in W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,426	0,347	0,316	0,316	0,245
Außenwand	90	90	125	125	228
Flachdach	219	219	256	256	292
Kellerdecke	139	139	139	139	174
<b>Verglasung</b>	<b>2-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>	<b>3-fach</b>

### 2.3.3 Lagerhalle

Für die Berechnungsvarianten zur Lagerhalle wurde auf ein Typengebäude aus der Studie von Kuhnhenne et al. (2010) zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um eine Lagerhalle mit einer Länge von 60 m, einer Breite von 15 m und einer Traufhöhe von 5 m (Abbildung 5). Die Halle verfügt über ein Dach mit einer Dachneigung von 5°. Im First der Halle befindet sich ein Lichtband über die Länge von 50 m. An den langen Seiten verfügt die Halle über ein Fensterband, an den Giebelseiten befinden sich jeweils eine Tür sowie ein Tor. Das Nutzungsprofil wird der DIN V 18599-10 Tabelle A.41 „Nutzung Lagerhallen, Logistikhallen“ entnommen.



**Abbildung 5: Typenhalle mit gewählten Abmessungen (Kuhnhenne et al. 2010)**

Die thermische Gebäudehülle wird durch die Außenwände (AW), das Dach (DA) und die Bodenplatte (BP) abgebildet. Die Gebäudekennwerte können Tabelle 10 entnommen werden. Detaillierte Planunterlagen zur Konstruktion und Statik der Halle können dem Bericht von Kocker und Müller (2016) entnommen werden. Bei allen Berechnungsvarianten wurden die gegebenen Gebäudekennwerte verwendet.

**Tabelle 10: Gebäudekennwerte Typengebäude Lagerhalle**

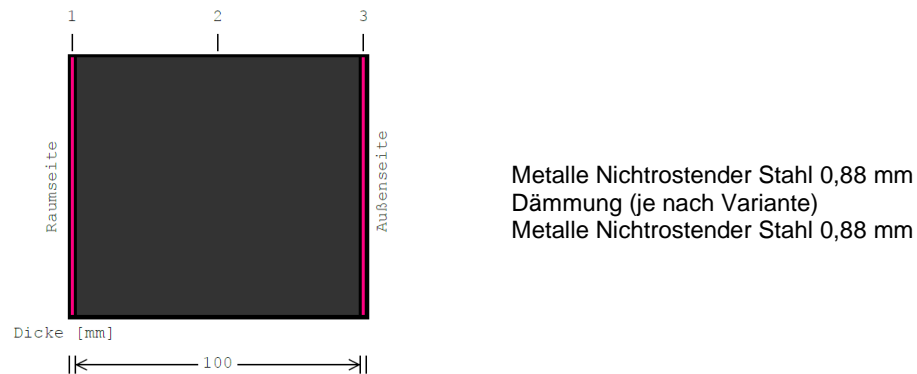
Kennwert	
Gebäudenutzfläche $A_N$	747 m <sup>2</sup>
Beheizte Fläche	747 m <sup>2</sup>
Nettovolumen	3.735 m <sup>3</sup>
Vollgeschosse	1
beheizt	1

### Tragwerk

Für das Tragwerk der Lagerhalle wurde ein Zweigelenkrahmen aus Stahl S355 mit Blockfundamenten aus Stahlbeton gewählt (Kuhnhenne et al. 2010). Die daraus folgende Massenermittlung von Kuhnhenne et al. (2010) basiert auf der statischen Bemessung von Kocker und Müller (2016). Das Tragwerk der Halle wird übergreifend für alle Berechnungsvarianten verwendet.

## Außenwand

Für die Außenwandkonstruktion werden selbsttragende Stahlsandwichelemente mit PU- oder MW-Dämmung, die an der Tragkonstruktion befestigt sind, verwendet. Der Schichtaufbau kann Abbildung 6 entnommen werden. Die Nutzungsdauer der Sandwichelemente wird auf 50 Jahre gesetzt (BBSR 2017), daher erfolgt kein Austauschzyklus während des Betrachtungszeitraums.

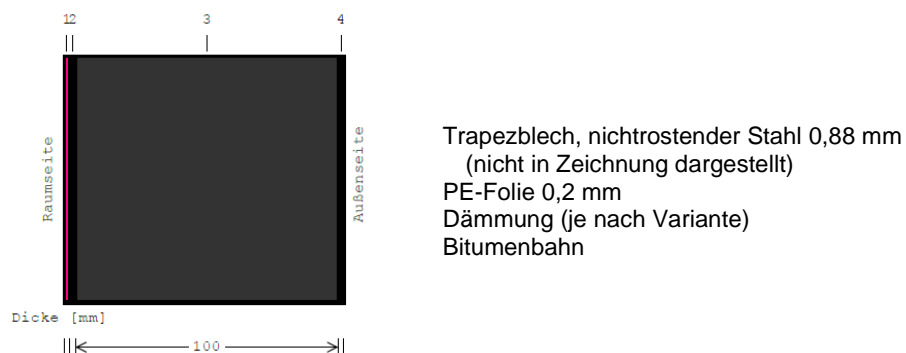


**Abbildung 6:** Schematische Darstellung der Außenwandaufbaus der Lagerhalle mit Sandwichelementen (ZUB Systems GmbH 2019)

Es werden zwei Varianten, eine mit PU-, die andere mit MW-Dämmung gerechnet. Der Schichtenaufbau ist exemplarisch in Abbildung 6 dargestellt. Die Dämmstärken variieren mit den Anforderungen an den spezifischen Transmissionswärmeverlust  $H_T$  sowie an den Primärenergiebedarf  $Q_P$ , die durch das GEG 23 und die Energieeffizienzhaus-Standards gegeben sind.

Für die Fenster in der Außenwand wurde bei der GEG 23 Variante mit einem U-Wert von  $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , bei den anderen Effizienzhaus-Standards mit einem U-Wert von  $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  gerechnet.

## Dach



**Abbildung 7:** Schematische Darstellung des Dachaufbaus des Trapezblechdaches Lagerhalle; von Raumseite zu Außenseite (ZUB Systems GmbH 2019)

Das Dach der Halle verfügt über eine Dachneigung von  $5^\circ$ . Die Dachfläche wird für die Anbringung einer PV-Anlage verwendet. Das Tragwerk des Dachs wird aus einer

Rahmenkonstruktion und einer Tragschale aus Stahltrapezblechen gebildet. Darauf befinden sich eine dünne PE-Folie (Luftdichtheit/Dampfbremse), die Dämmung und eine Abdichtung aus einlagigen PVC-Dachbahnen. Anschließend folgt die Dämmebene mit einer Bitumenbahn als oberer Gebäudeabschluss. Der Schichtenaufbau kann Abbildung 7 entnommen werden. Für die Dämmebene wird eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen (BBSR 2017), daher erfolgt kein Austausch der Dämmung während des Betrachtungszeitraums.

Die Berechnungen erfolgen jeweils für eine Variante mit PU- und eine mit MW-Dämmung. Der Schichtenaufbau ist exemplarisch dargestellt. Die Dämmstärken sind an die jeweiligen Energieeffizienzhaus-Standards angepasst.

### Bodenplatte zum Erdreich

Die Bodenplatte zum Erdreich besteht aus Stahlbeton und bildet den thermischen Gebäudeabschluss nach unten. Die Dämmebene befindet sich unterhalb des Stahlbetons. Der raumseitige Abschluss wird mit einem Zementestrich realisiert. Der Schichtenaufbau kann Abbildung 8 entnommen werden. Für die Perimeterdämmung unter der Bodenplatte wird eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen (BBSR 2017), daher erfolgt keine Austausch der Dämmung während des Betrachtungszeitraums.

Der Schichtenaufbau ist für alle Berechnungsvarianten identisch.



Abbildung 8 Schematische Darstellung des Fußbodenaufbaus der Bodenplatte Lagerhalle (ZUB Systems GmbH 2019)

### Anlagentechnik

Zur Wärmeerzeugung wird eine Luft/Wasser **Wärmepumpe** mit einer Nennleistung von max. 49,76 kW verwendet. Das Heizungssystem verfügt über einen Pufferspeicher und befindet sich im Teil-Parallelbetrieb (elektronischen Spitzenlastabdeckung). Die Vorlauf-/Rücklauftemperatur für das System beträgt 50/40°C. Die Wärmeübertragung erfolgt mittels Strahlplatten an der Decke der Lagerhalle. Es erfolgt keine Trinkwarmwasserbereitung.

Zusätzlich wird eine **PV-Anlage** mit einer Fläche von 320 m<sup>2</sup> auf der Halle installiert. Es wird angenommen, dass die Module auf dem Dach montiert sind. Die PV-Anlage

verfügt über eine Nennleistung  $P_{pk}$  von 58,2 kW. Laut QNG-Handbuch muss nur der Anteil der PV-Anlage, der für die eigene Stromproduktion verwendet wird, in die Berechnungen der Umweltwirkungen in die Bilanz aufgenommen werden (PV-Deckungsgrad) (BMWSB 2023a). Der restliche Anteil wird (rechnerisch) einem Dritten (Abnehmer des Stroms) angerechnet.

In Tabelle 11 sind die Energiestandards sowie der Endenergiebedarf der Nutzungsphase gelistet. Die Endenergie beinhaltet dabei die gesamte Anlagentechnik und wird in kWh/(m<sup>2</sup>\*a) angegeben. Dabei bezieht sich die Fläche auf die beheizte Fläche im Gebäude. Für die Berechnungen des GWP und den PENRT wird der Endenergiebedarf der Nutzungsphase auf die gesamte Nutzfläche umgelegt. Die Berechnung des GWP erfolgt mit einem Emissionswert von 350 g/kWh (Pehnt et al. 2022). Der Primärenergiefaktor für den Strommix bleibt unverändert bei 1,8. Der PV-Deckungsgrad wird in % ausgegeben.

**Tabelle 11: Darstellung des Endenergiebedarf und des PV-Deckungsgrad in Abhängigkeit vom Energieeffizienzstandard. Der PV-Deckungsgrad ergibt sich aus den jeweiligen H'T-Werten der Dämmstoff-Varianten und Effizienzhausstandard für die Lagerhalle**

Variante		GEG 23	EH 55 H' <sub>T</sub> 70	EH 40 H' <sub>T</sub> 55
<b>PU</b>	Q <sub>E</sub> in kWh/(m <sup>2</sup> a)	44,2	32,3	29,0
	PV-Deckung in %	32,5	38,7	40,6
<b>MW</b>	Q <sub>E</sub> in kWh/(m <sup>2</sup> a)	42,6	32,0	29,1
	PV-Deckung in %	33,3	38,9	40,5

### Eingabeparameter für die Untersuchungen

Die Dämmstoffdicken für die jeweilige Konstruktion, bezogen auf die unterschiedlichen Energiestandards sowie die Dämmmaterialien, können Tabelle 12 entnommen werden.

**Tabelle 12: Gegenüberstellung der Eingabeparameter Lagerhalle: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards**

	GEG 23	EH 55 H' <sub>T</sub> 70	EH 40 H' <sub>T</sub> 55
<b>Polyurethan – Dämmstärken in mm</b>			
Außenwand	40	80	100
Flachdach	40	80	100
Bodenplatte	80 XPS	80 XPS	80 XPS
<b>Steinwolle – Dämmstärken in mm</b>			
Außenwand	60	120	160
Flachdach	80	120	140
Bodenplatte	80 XPS	80 XPS	80 XPS



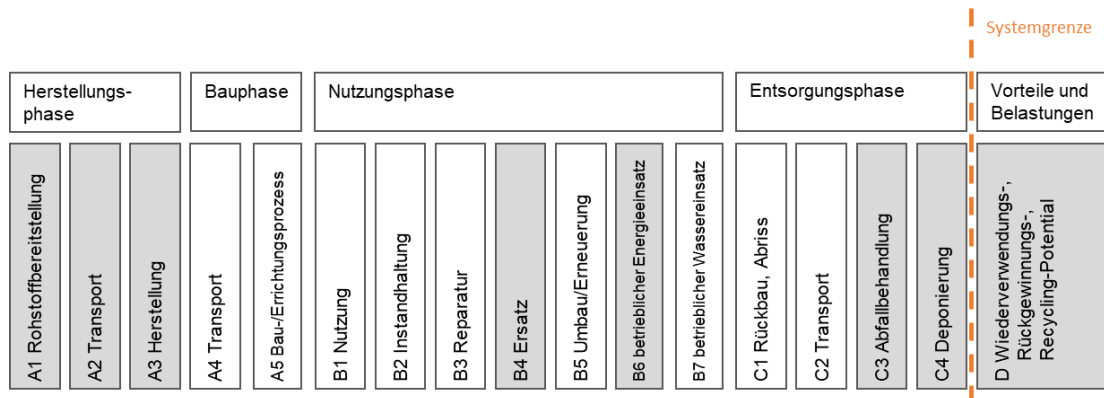


### 3 Methodik der Ökobilanzierung

#### Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel dieser Studie ist eine der Gebäudetypen EFH, MFH und einer Lagerhalle mit unterschiedlichen Dämmstoffen und Energieeffizienzstandards. Dabei ist Grundkonstruktion aller untersuchten Gebäudevarianten (Typenhäuser) identisch, lediglich die Dämmung (Dämmstoff und Dicke) sowie die U-Werte der Fenster werden in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Energieeffizienzstandards variiert. Weitere bauphysikalische Kennwerte wie der Schallschutz oder Brandschutz werden in dieser Studie nicht betrachtet. Zudem ist zu erwähnen, dass keine ökonomische Betrachtung der Varianten vorgenommen wird.

Der Untersuchungsrahmen der Ökobilanz erstreckt sich entlang des gesamten Lebenszyklus der vorgestellten Typengebäude. Die einbezogenen Gebäudelebenszyklusphasen nach DIN EN 15804 (DIN EN 15804:2020-03) werden durch das QNG-Handbuch festgelegt. In die Untersuchung miteinbezogen ist die Herstellungsphase (A1-A3), der Austausch (B4) und der Energieverbrauch im Betrieb (B6) der Nutzungsphase sowie die Abfallbehandlung (C3) und Entsorgung (C4) während der End-of-Life Phase. Gutschriften und Belastungen außerhalb der Systemgrenze (Modul D) werden separat ausgewiesen. Die ausgewählten Phasen können der Abbildung 9 entnommen werden (hellgrau hinterlegt).



**Abbildung 9: Schematische Darstellung des Untersuchungsrahmens anhand der Phasen des Gebäude-Lebenszyklus nach (DIN EN 15804:2020-03)**

Die Modellierung und Berechnung der Ökobilanz erfolgt auf Grundlage der DIN EN ISO 14040 und 14044 (DIN EN ISO 14040:2021-02; DIN EN ISO 14044:2021-02). Speziell für die Ökobilanzierung von Gebäuden ist das Vorgehen in der DIN EN 15978 (DIN EN 15978:2012-10) definiert. Die Vorgehensweise zur Modellierung der Ökobilanz folgt den Richtlinien des Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) (BMWSB 2023f).

Als Datengrundlage für die Berechnungen wurde bis zum 28.02.2023 im QNG-Handbuch auf den Datensatz der Ökobaudat 2020\_II verwiesen. Seit 01.03.2023 stehen interne Rechenwerte (Ökobilanzierung – Rechenwerte) zur Verfügung. Da für den Zeitraum der Berechnung dieser Ergebnisse die internen Rechenwerte noch nicht zur Verfügung standen und da bereits eine neue, aktuellere Ökobaudat existierte, wurde

für die Berechnungen in dieser Studie der Ökobilanz 2021\_II Datensatz verwendet. Abweichungen von der Ökobaudat 2021\_II Datenbank werden explizit genannt.

### **Funktionelle Einheit**

Zur Vergleichbarkeit der Berechnungsvarianten in dieser Studie und mit anderen Studien wird eine funktionelle Einheit benötigt. Im Rahmen dieser Ökobilanz ist die funktionelle Einheit auf 1 m<sup>2</sup> Gebäudenutzfläche  $A_N$  des jeweiligen Typengebäudes bezogen auf ein Nutzungsjahr gesetzt (1 m<sup>2</sup>  $A_N/a$ ). Der Betrachtungszeitraum der Nutzungsphase für die Typengebäude ist laut QNG-Handbuch (BMWSB 2023f) auf 50 Jahre festgelegt. Die Nutzungsdauern bis zum Ersatz der verwendeten Materialien und Bauteile wurden dem BNB-Katalog Nutzungsdauern von Bauteilen (BBSR 2017) entnommen.

### **Erstellung der Sachbilanzen**

Nachfolgend wird auf die Modellierung und Berechnung des GWP und PENRT für Wohngebäude (in dieser Studie: EFH und MFH) eingegangen. Die Berechnung der Umweltwirkungen erfolgt nach den angegebenen Formeln der QNG-Bilanzierungsregeln nach Anhang 3.1.1 zur Anlage 3 des QNG-Handbuches (BMWSB 2023a):

Für die Herstellungsphase wird laut QNG neben den benötigten Materialien und Bauteilen ein pauschaler Sockelbetrag für die Kostengruppe 400 gefordert (BMWSB 2023a). Die vom QNG-Handbuch festgelegte Pauschale berücksichtigt die Herstellung, den Austausch und Entsorgung von Teilen für die technischen Anlagen. Dabei gibt es zwei Werte, einmal für Gebäude mit einem Energiestandard von >40 kWh/m<sup>2</sup> und für Gebäude ≤40 kWh/m<sup>2</sup>. Zusätzlich zum Anlagenstrom wird für die Nutzungsphase B6 nach Anlage 3.1.1 des QNG-Handbuches eine Nutzerstrompauschale von 20 kWh pro Quadratmeter beheizter Nutzfläche angesetzt (BMWSB 2023a). Die Nutzerstrompauschale entspricht dem Endenergiebedarf und soll die Nutzung von Leuchtmitteln, Ausstattung und Geräten mit der Effizienz-Stufe A der Gebäudenutzer darstellen. Die Nutzerstrompauschale ist für alle Varianten identisch.

Für die Berechnung des GWP und PENRT für Nichtwohngebäude (in dieser Studie Lagerhalle) gibt es gesonderte Bilanzierungsregeln. Diese Bilanzierungsregeln werden im Anhang 3.2.1.1 zur Anlage 3 des QNG-Handbuches erläutert (BMWSB 2023b):

Zusätzlich zu den verwendeten Baumaterialien wird eine Technikpauschale für die Kostengruppe 400 erfasst. Die Höhe der Pauschale wird dabei an das zu erreichende Anforderungsniveau des QNG-Siegels (PLUS oder PREMIUM) sowie an die LCA-Klasse nach Anlage 1 des QNG-Handbuches angepasst. In der vorliegenden Studie wird eine geschlossene Lagerhalle betrachtet, welche in Klasse K4 einzuordnen ist (BMWSB 2023d). Es wird angenommen, dass das Anforderungsniveau PREMIUM erreicht werden soll. Zusätzlich erfolgt eine Einzelerfassung ausgewählter Anlagenteile (z.B. Wärmeerzeuger, Lüftungsanlage), die in der Technikpauschale nicht

erfasst sind. Es werden auch Austauschzyklen angegeben, welche von den Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB abweichen. Des Weiteren wird für die Nutzungsphase der Nichtwohngebäude ein Mittelwert für den jährlichen Strombedarf der „zentralen Dienste“ angegeben. Dieser richtet sich dabei nach der Netto-Raumfläche (NRF) des Gebäudes. Der Nutzer- und Nutzungsbezogene Strombedarf wird gesondert erfasst. In der vorliegenden Studie wird dieser für die Lagerhalle mit  $0,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  angegeben (BMWSB 2023b).

## Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung der Ökobilanz im Rahmen dieser Studie wird zum einen der Indikator **Treibhausgaspotential** (Globales Erderwärmungspotenzial, GWP) verwendet. Dieser Indikator ist eine Maßzahl für den relativen Beitrag zum Treibhaus-

### Begriffserklärung

Als **Graue Energie** wird der kumulierte nicht erneuerbare Primärenergiebedarf für die Rohstoffgewinnung, Herstellung, Transport, Lagerung und Entsorgung eines Produktes bezeichnet. Die im Rahmen dieser Prozesse freiwerdenden Treibhausgasemissionen bezeichnet man als **Graue Emissionen**. Diese Begrifflichkeiten sind in Deutschland jedoch weder normativ noch anderweitig definiert.

effekt und somit zur Erderwärmung. Für die Kenngröße GWP wird jeder dieser Verbindungen eine Wirksamkeit im Vergleich zu Kohlendioxid zugewiesen, die in  $\text{CO}_2$ -Äquivalente ( $\text{kg CO}_2\text{-Äq.}$ ) angegeben wird. In Verbindung mit der funktionellen Einheit in dieser Studie wird das GWP in  $\text{kg CO}_2\text{-Äq. pro m}^2 \text{ Nutzfläche und Jahr } [\text{CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$  angegeben. Zum anderen wird die gesamte **nicht erneuerbare Primärenergie** bewertet (Primary Energy Non-Renewable Total, PENRT). Der Begriff der „Grauen Energie“ deckt den Anteil der Primärenergie aus nicht erneuerbaren Quellen. Der PENRT wird im

Rahmen dieser Studie in kWh angegeben. In Verbindung mit der funktionellen Einheit in dieser Studie wird der PENRT in  $\text{kWh pro m}^2 \text{ Nutzfläche und Jahr } [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$  angegeben.

## 4 Ergebnisse der Ökobilanz

Im Folgenden werden die ökologischen Ergebnisse für jedes untersuchte Gebäude in Abhängigkeit des energetischen Standards und verwendeten Dämmstoffs verglichen. Betrachtet werden das Treibhausgaspotential (GWP) und der nicht erneuerbare Primärenergieaufwand (PENRT). Diese werden anschließend mit den Grenzwerten nach Anlage 3 des QNG-Handbuch (BMWSB 2023e) verglichen.

### 4.1 Einfamilienhaus

#### 4.1.1 Treibhausgaspotential (GWP)

Abbildung 10 können die Ergebnisse zum **GWP optimiert nach  $H'_T$**  entnommen werden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Energieeffizienz- und Dämmstoffvarianten über den gesamten Lebenszyklus des Einfamilienhauses. Das GWP ist dabei in Materialgruppen gegliedert. Es ist zu erkennen, dass die Nutzungsphase über 50 Jahre (Nutzerstrom hellblau und Nutzung Anlagentechnik lila) den größten Anteil an den Emissionen aufweist, gefolgt von der tragenden Konstruktion (gelb), der Anlagentechnik (lachsfarben), den Fenstern (grün) und der Dämmung für die Gebäudehülle (grau).

Durch die Anpassung der Dämmstoffdicken ist bei den Ergebnissen eine Veränderung in den Kategorien „Dämmung Hülle“ (grau) und „Nutzung Anlagentechnik“ (lila). Der Nutzerstrom wird vom QNG-Handbuch als Pauschale vorgegeben.

##### Nutzungsphase B6

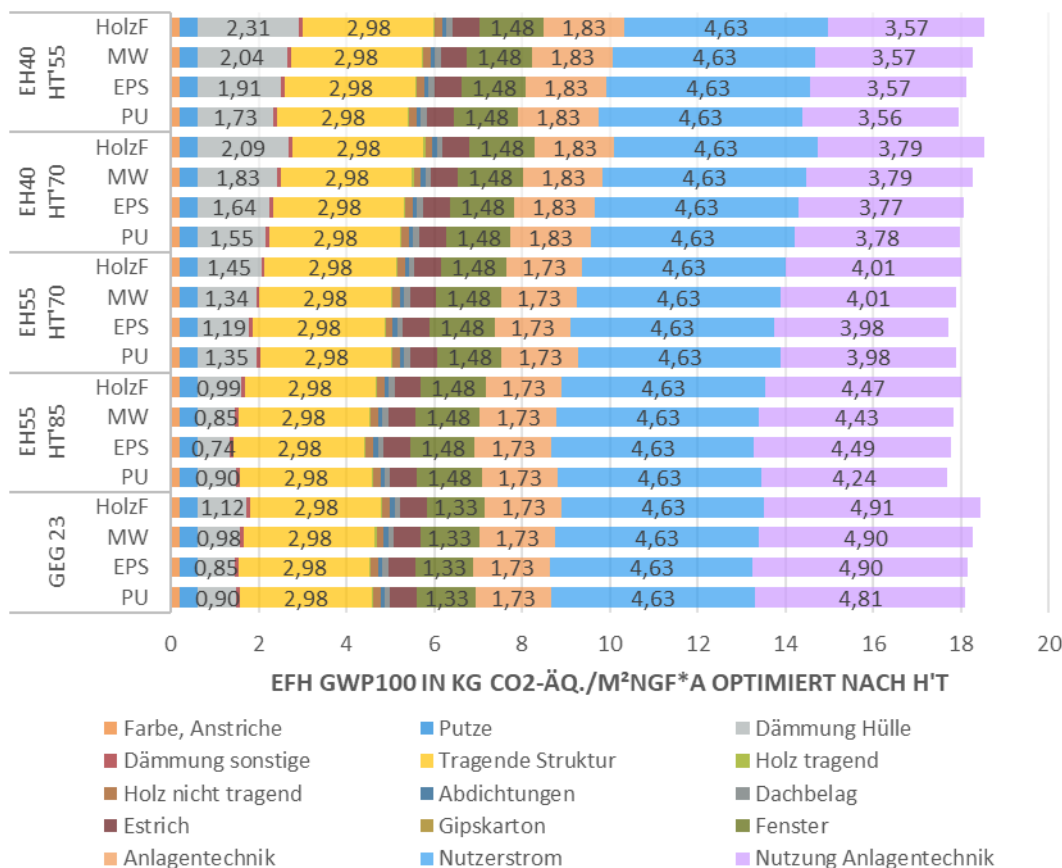
Die Angaben der Endenergie zum Betrieb der Anlagentechnik aus ZUB Helena bzw. die Angabe zum Pauschalbetrag des Nutzerstroms nach QNG-Handbuch sind in kWh pro **beheizte Fläche** und Jahr angegeben. Für die vorliegende Studie wurden alle Energiemengen auf eine kWh pro m<sup>2</sup> **Nutzfläche** NGF (inkl. unbeheiztem Keller) und Jahr umgerechnet.

Beim Energiestandard GEG 23 weist die Nutzungsphase einen Anteil von 52% auf. Durch den gestiegenen Energiestandard reduziert sich diese bis zur EH 40  $H'_T$  55-Variante auf 44% bis 46% des GWP. Im Gegensatz dazu steigt der Anteil des GWP bezogen auf die Herstellungsphase und den Austausch der Materialien während der Nutzungsphase mit zunehmendem Energiestandard. Bei der GEG 23-Variante beträgt der bauteilbezogene Anteil 38% bis 39% der Umweltwirkungen. Bei den EH 40  $H'_T$  55-Varianten weisen dieser bereits einen Anteil von 44% bis 46% auf. Die Bereitstellung der Anlagentechnik hat über die verschiedenen Energiestandards und Dämmstoffvariationen kontinuierlich einen Anteil von ca. 10% am GWP.

kontinuierlich einen Anteil von ca. 10% am GWP.

Allgemein ist zu erkennen, dass nur geringe Reduktionen des GWP mit steigendem Energiestandards auftreten. Die Reduktion des GWP während der Nutzungsphase werden nahezu von den gestiegenen Emissionen der Herstellungsphase (aufgrund der gestiegenen Dämmstoffdicken) aufgezehrt. So weist das EFH nach GEG 23

Standard mit PU-Dämmung Treibhausgasemissionen von 18,11 kg CO<sub>2</sub>-Äq./((m<sup>2</sup>\*a) auf, die EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante mit PU-Dämmung ein GWP von 17,49 kg CO<sub>2</sub>-Äq./((m<sup>2</sup>\*a).



**Abbildung 10:** Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das EFH optimiert nach H<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

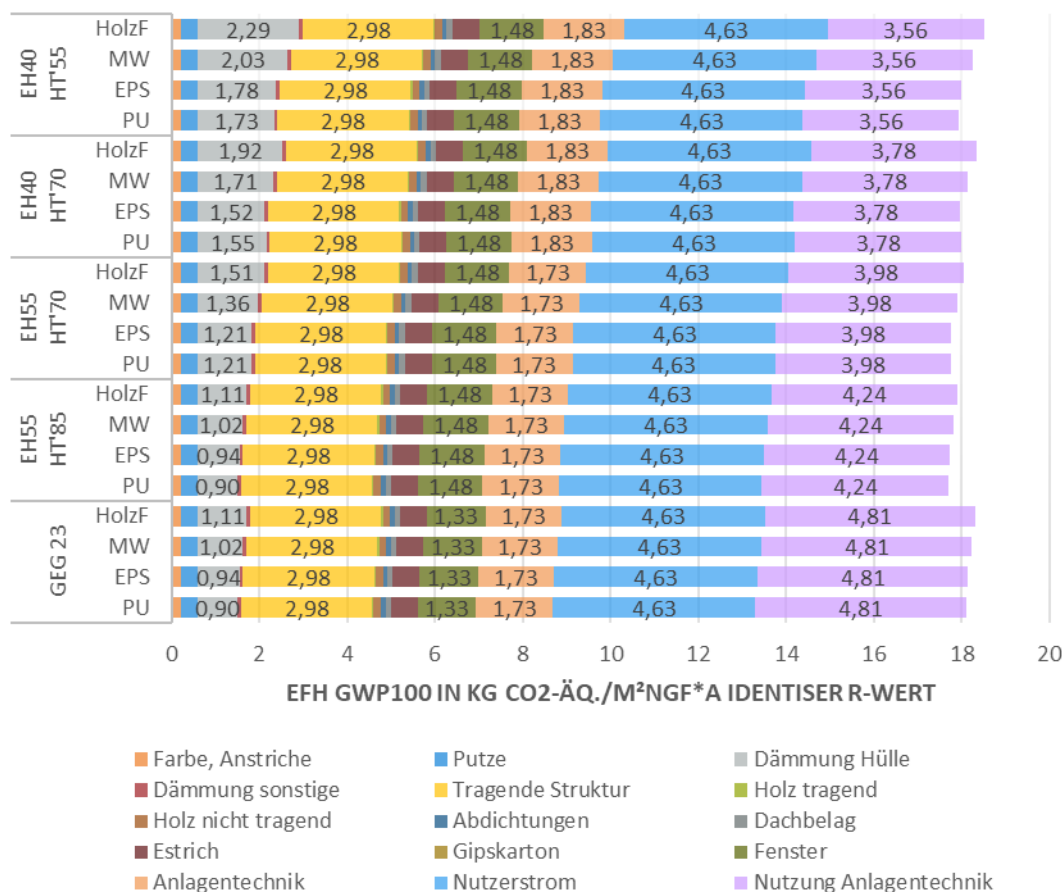
Als Datengrundlage für die Berechnungen des GWP für den Endenergieeinsatz wird ein zukunftsweisender Emissionswert für den deutschen Strommix von 0,35 kg/kWh CO<sub>2</sub>-Äq. angenommen (deutscher Strommix laut Ökobaudat: 0,55 kg/kWh CO<sub>2</sub>-Äq.). Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil an erneuerbaren Energieträgern in Zukunft zunimmt und sich das Treibhausgaspotential pro kWh Strom reduziert.

Beim GWP verbunden mit den Dämmstoffen sind Unterschiede bei den Dämmstoffalternativen zu erkennen. Im Vergleich zur PU-Dämmung (GEG 23-Variante) ergeben sich Abweichungen von -6% (EPS) bis +24% (HolzF). Bezogen auf das totale GWP über den gesamten Gebäudelebenszyklus relativieren sich diese Abweichungen auf +0,3% (EPS) bis +2% (HolzF). Beim Vergleich der EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante weisen die Dämmstoffalternativen zur PU-Dämmung Abweichungen von +10% (EPS) bis zu +34% (HolzF) auf. Bezogen auf das totale GWP über den gesamten Gebäudelebenszyklus relativieren sich diese Abweichungen auf +1% (EPS) bis +3% (HolzF). Um den Energiestandard EH 40 H<sub>T</sub> 55 zu erreichen, werden an der Außenwand 140 mm PU-

Dämmung benötigt (Die AW hat den größten Flächeneinfluss). Um die gleiche Dämmwirkung mit der Holzfaserdämmung realisieren zu können wird eine Dämmstärke von 340 mm benötigt (EPS und MW: 300 mm). Aufgrund des deutlich gestiegenen Materialeinsatzes ergibt sich ein höheres GWP.

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass beim ausschließlichen Vergleich der Dämmstoffe Änderungen zwischen den Dämmstoffalternativen zu erkennen sind. Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes im eingebauten Zustand relativieren sich diese.

Zu Vergleichszwecken wurden die Berechnung des **GWP** zusätzlich **mit identischen R-Werten** bezogen auf den Basisfall (PU-Dämmung) vorgenommen. Die Ergebnisse können Abbildung 11 entnommen werden.



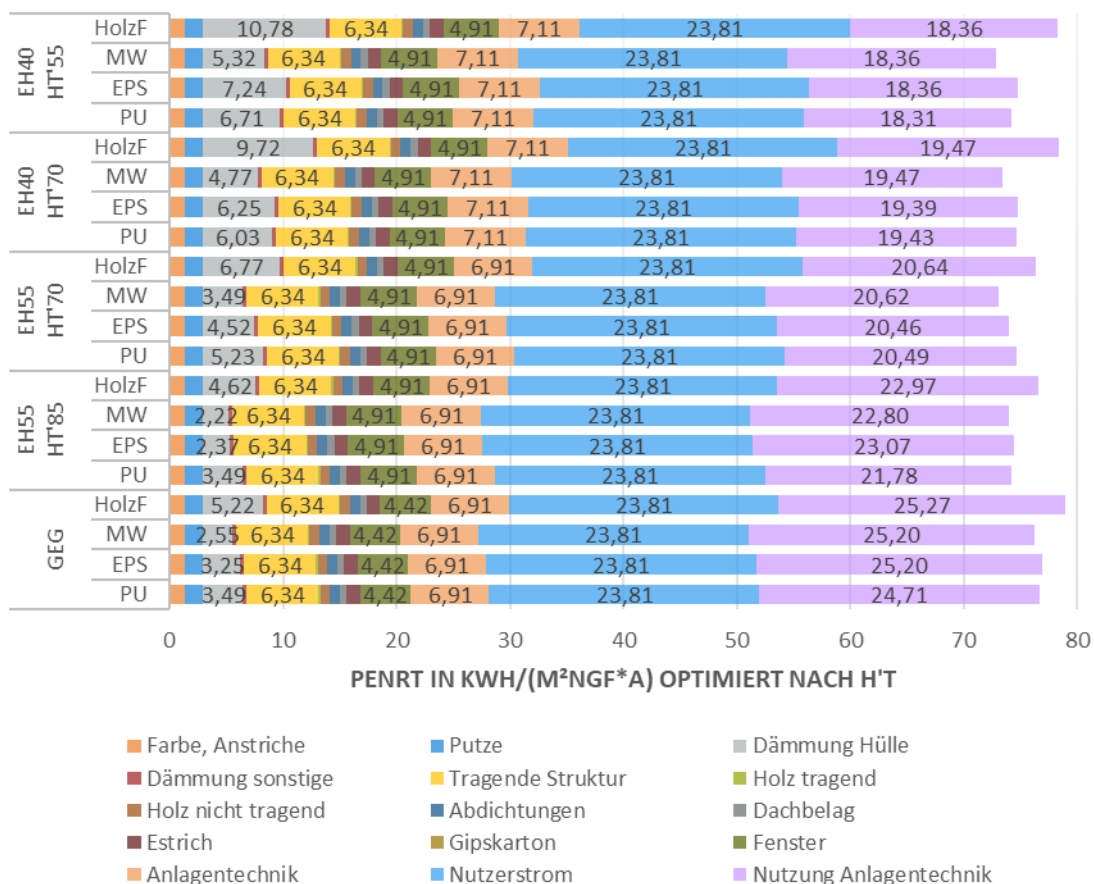
**Abbildung 11:** Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das EFH mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

Durch die identischen R-Werte der Dämmstoffalternativen ergeben sich identische U-Werte der Wand-, Dach- und Deckenkonstruktionen. Dies führt wiederum zu einem identischen Endenergiebedarf der Varianten während der Nutzungsphase der einzelnen Energiestandards. Aus diesem Grund sind in Abbildung 11 lediglich Veränderungen des GWP bei den Dämmstoffen zu erkennen (grau).

Die Ergebnisse in Abbildung 11 mit den identischen R-Werte weichen nur wenig von denen in Abbildung 10 (Rundung Dämmstoffdicken auf 20 mm Stufen) ab.

#### 4.1.2 Primärenergieaufwand, nicht erneuerbar (PENRT)

Die Ergebnisse aus der Berechnung zum **PENRT optimiert nach  $H'_T$**  aus nicht erneuerbaren Quellen können Abbildung 12 entnommen werden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Effizienzhaus-Varianten sowie die Untersuchung der verschiedenen Dämmstoffe über den gesamten Lebenszyklus des Einfamilienhauses. Der Energieaufwand ist dabei in Materialgruppen gegliedert. Es ist zu erkennen, dass der Primärenergieaufwand eine ähnliche Verteilung wie das Treibhausgaspotential aufweist: Die Nutzungsphase (hellblau und lila) weist den höchsten Anteil am Energieaufwand auf. Dieser reduziert sich mit steigendem Energiestandard von über 60% (GEG 23-Variante) auf ca. 55% bei der EH 40  $H'_T$  55-Variante.



**Abbildung 12:** Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar für das EFH optimiert nach  $H'_T$  anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

Allgemein ist zu erkennen, dass eine leichte Reduzierung des PENRT mit zunehmenden Energiestandards auftritt. Die GEG-Variante mit PU-Dämmung weist einen Primärenergieeinsatz nicht erneuerbar von 76,69 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) auf, die EH 40  $H'_T$  55-



Variante mit PU-Dämmung 74,19 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Dies entspricht einer Reduzierung von mehr als 3%.

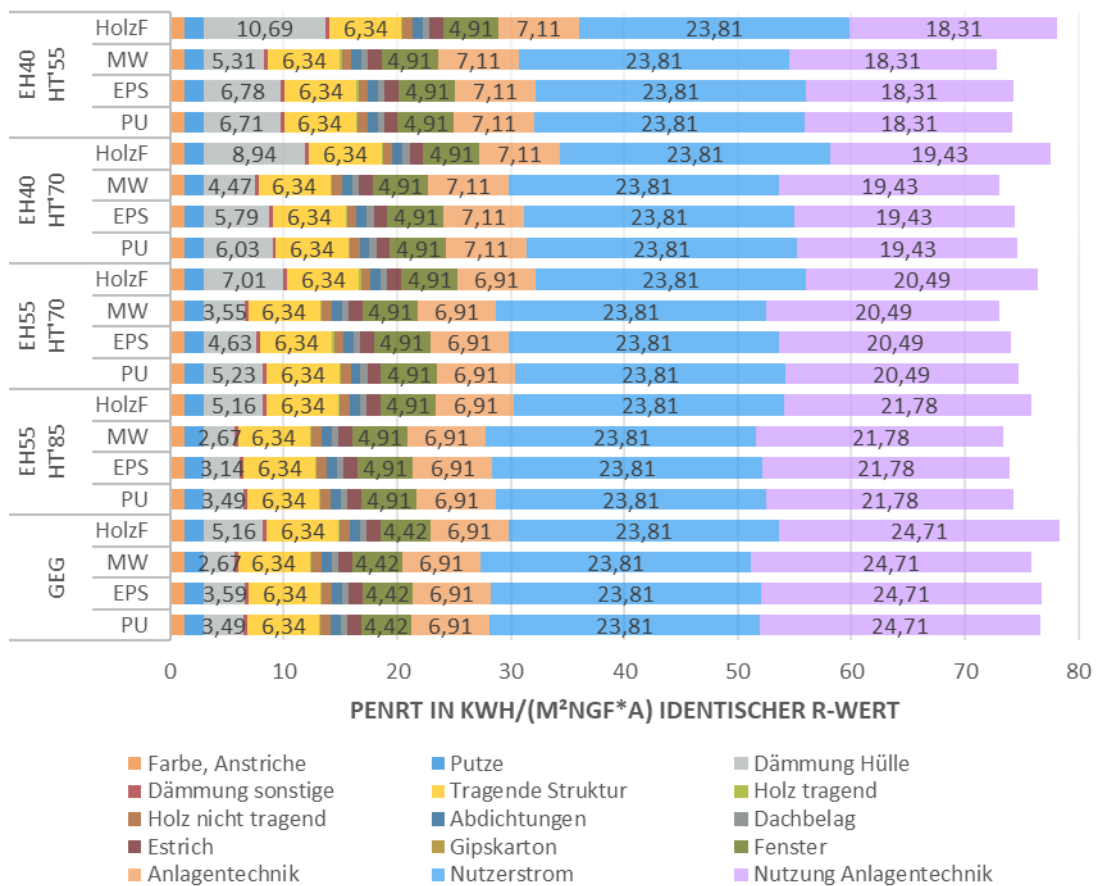
Die Dämmung (hellgrau) hat bei der GEG 23-Variante einen Anteil von 3% (MW) bis 7% (HolzF) am Primärenergieaufwand. Mit den steigenden Energiestandards erhöht sich dieser auf 7% (MW) und bis zu 14% (HolzF) bei der Variante EH 40 H'<sub>T</sub> 55-Variante.

Bei der gesonderten Betrachtung des PENRT der Dämmstoffe, sind Unterschiede zu erkennen. Im Vergleich zur PU-Dämmung (GEG 23-Variante) ergeben sich Abweichungen von -27% (MW) bis +50% (HolzF). Bezogen auf den gesamten Gebäudelebenszyklus relativieren sich diese Abweichungen auf -0,6% (MW) bis +3% (HolzF). Beim gesonderten Vergleich des GWP der Dämmstoffe der EH 40 H'<sub>T</sub> 55-Variante weisen die Dämmstoffalternativen im Vergleich zur PU-Dämmung Abweichungen von -21% (MW) bis zu +61% (HolzF) auf. Bezogen auf den gesamten Gebäudelebenszyklus relativieren sich diese Abweichungen auf -2% (MW) bis +6% (HolzF). Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus sind die Unterschiede zwischen den Dämmstoffen gering. Weder der betrachtete Holzfaserdämmstoff, noch die mineralischen oder synthetischen Dämmstoffe haben eindeutige Vorteile aufgrund ihrer Rohstoffbasis in Bezug auf PENRT.

Zu Vergleichszwecken wurden die Berechnung des **PENRT** zusätzlich **mit identischen R-Werten** bezogen auf den Basisfall (PU-Dämmung) vorgenommen. Die Ergebnisse können Abbildung 13 entnommen werden.

Durch die identischen R-Werte der Dämmstoffalternativen ergeben sich identische U-Werte der Wand-, Dach- und Deckenkonstruktionen. Dies führt wiederum zu einem identischen Endenergiebedarf. Aus diesem Grund sind in Abbildung 13 lediglich Veränderungen des PENRT bei den Dämmstoffen zu erkennen (grau).

Die Ergebnisse in Abbildung 13 mit den identischen R-Werten decken sich mit den Ergebnissen aus Abbildung 12 mit der Optimierung nach H'<sub>T</sub>.



**Abbildung 13:** Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar für das EFH mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

### 4.1.3 QNG-Grenzwerte

In der nachfolgenden Tabelle 13 werden die Ergebnisse für die verschiedenen Effizienzstandards und Dämmstoffvarianten mit den Grenzwerten für das GWP und den PENRT nach Anlage 3 des QNG-Handbuch (BMWSB 2023e) verglichen. Keine der Gebäudevarianten erfüllt die Anforderungen des QNG-Premiumlevels an PENRT. Allerdings wäre das auch der Fall, wenn die Dämmstoffe keinen Beitrag zur PENRT leisten würden. Folglich kann ein Einfamilienhaus mit der ausgewählten Baukonstruktion das Premiumniveau unabhängig von den gewählten Dämmstoffen nicht erreichen. Nach der derzeitigen Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG) reicht QNG-PLUS für die Förderfähigkeit aus, somit können die berechneten Gebäude von der Bundesförderung profitieren.

Tabelle 13: Übersicht zur Einhaltung der Grenzwerte der berechnen Varianten - EFH

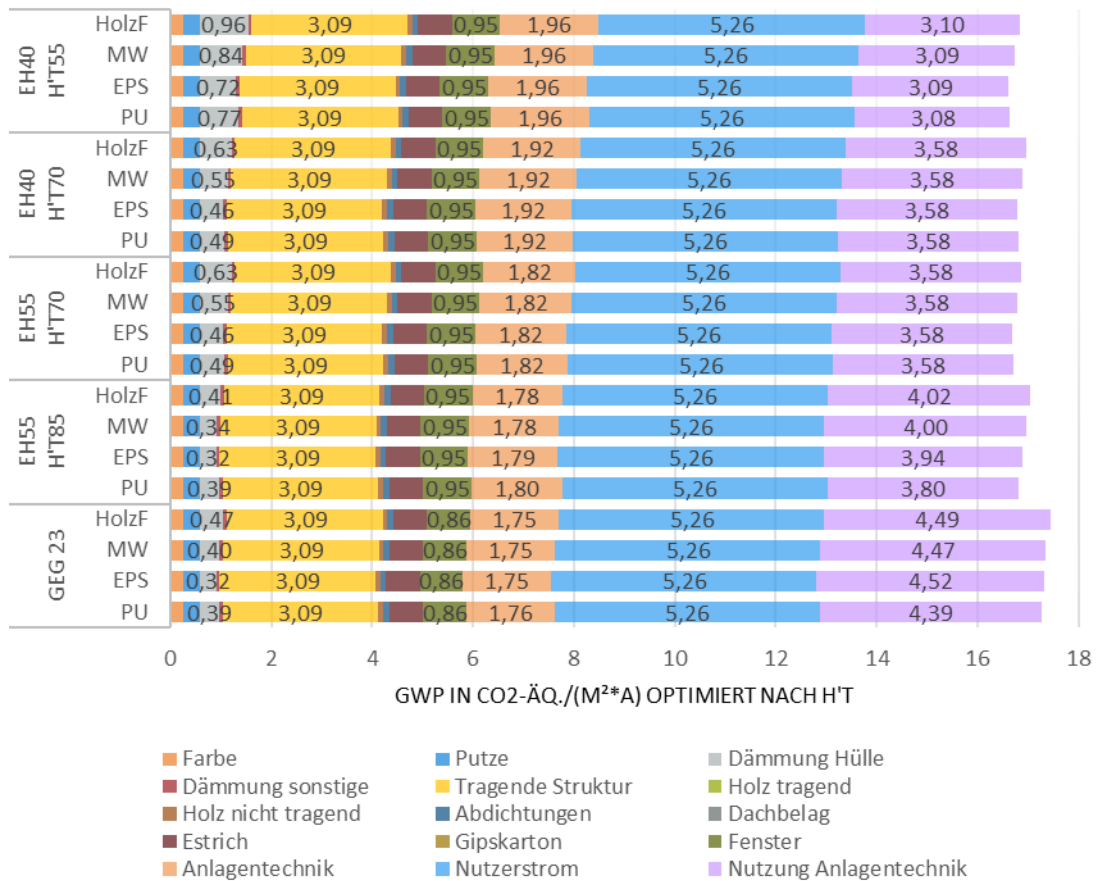
	QNG-PLUS		QNG-PREMIUM	
	GWP 24 kg CO <sub>2</sub> Äq./m <sup>2</sup> *a	PENRT 96 kWh/m <sup>2</sup> *a	GWP 20 kg CO <sub>2</sub> Äq./m <sup>2</sup> *a	PENRT 64 kWh/m <sup>2</sup> *a
<b>GEG 23</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗
<b>EH 55 H<sub>T</sub> 85</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗
<b>EH 55 H<sub>T</sub> 70</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗
<b>EH 40 H<sub>T</sub> 70</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗
<b>EH 40 H<sub>T</sub> 55</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗

## 4.2 Mehrfamilienhaus

### 4.2.1 Treibhausgaspotential (GWP)

Abbildung 14 können die Ergebnisse zum **GWP optimiert nach H<sub>T</sub>** entnommen werden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Effizienzhaus-Varianten sowie die Untersuchung der verschiedenen Dämmstoffe über den gesamten Lebenszyklus des MFH. Das GWP ist dabei in Materialgruppen gegliedert. Es ist zu erkennen, dass die Nutzungsphase über 50 Jahre (Nutzerstrom hellblau und Nutzung

Anlagentechnik (lila) den größten Anteil an den Emissionen aufweist, gefolgt von der tragenden Konstruktion (gelb), der Anlagentechnik (lachsfarben), den Fenstern (grün) und der Dämmung für die Gebäudehülle (grau).



**Abbildung 14:** Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das MFH optimiert nach H<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

Durch die Anpassung der Dämmstoffdicken ist bei den Ergebnissen eine Veränderung in den Kategorien „Dämmung Hülle“ (grau) und „Nutzung Anlagentechnik“ (lila). Der Nutzerstrom wird vom QNG-Handbuch als Pauschale vorgegeben.

Beim Energiestandard GEG 23 weist die Nutzungsphase einen Anteil von 56% auf. Durch den gehobenen Energiestandard reduziert sich diese bis zur EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante auf 50% des GWP. Im Gegensatz dazu steigt der Anteil des GWP bezogen auf die Herstellungsphase und den Austausch der Materialien während der Nutzungsphase mit zunehmendem Energiestandard. Bei der GEG 23-Variante weisen die Materialien einen Anteil von 34% der Umweltwirkungen auf. Bei der EH 40 H<sub>T</sub> 55-Varianten weisen die Herstellungsphase und der Austausch bereits einen Anteil von 38% bis 39% auf. Die Bereitstellung der Anlagentechnik hat über die verschiedenen Energiestandards und Dämmstoffvariationen einen Anteil von 10% bis 12% am GWP.

Allgemein ist zu erkennen, dass nur geringe Reduktionen des GWP mit zunehmenden Energiestandards auftritt. Die Reduktion des GWP während der Nutzungsphase wird fast vollständig durch die gestiegenen Umweltwirkungen während der

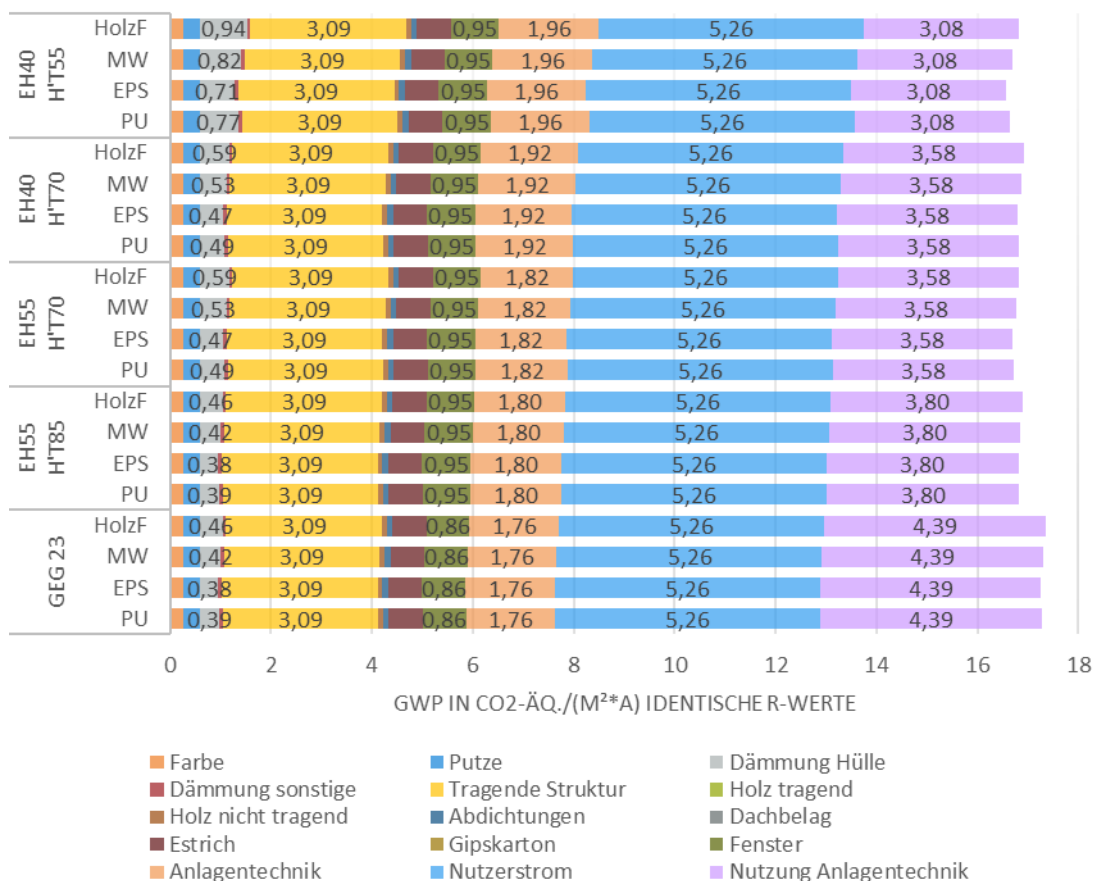
Herstellungsphase (gestiegene Dämmstoffdicken) ausgeglichen. So weist das MFH nach GEG 23 Standard mit PU-Dämmung Treibhausgasemissionen von 17,28 kg CO<sub>2</sub>-Äq./((m<sup>2</sup>\*a) auf, die EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante mit PU-Dämmung weist GWP-Emissionen von 16,65 kg CO<sub>2</sub>-Äq./((m<sup>2</sup>\*a) auf.

Als Datengrundlage für die Berechnungen des GWP für den Endenergieeinsatz wird ein zukunftsweisender Emissionswert für den deutschen Strommix von 0,35 kg/kWh CO<sub>2</sub>-Äq. angenommen (deutscher Strommix laut Ökobaudat: 0,55 kg/kWh CO<sub>2</sub>-Äq.). Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil an erneuerbaren Energieträgern in Zukunft zunimmt und sich das Treibhausgaspotential pro kWh Strom reduziert.

Beim GWP verbunden mit den Dämmstoffen sind Unterschiede bei den Dämmstoffalternativen zu erkennen. Im Vergleich zur PU-Dämmung (GEG 23-Variante) ergeben sich Abweichungen von -18% (EPS) bis +21% (HolzF). Bezogen auf das totale GWP über den gesamten Gebäudelebenszyklus relativieren sich diese Abweichungen auf +0,3% (EPS) bis +1% (HolzF). Beim Vergleich der EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante weisen die Dämmstoffalternativen zur PU-Dämmung Abweichungen von -7% (EPS) bis zu +25% (HolzF) auf. Bezogen auf das totale GWP über den gesamten Gebäudelebenszyklus relativieren sich diese Abweichungen auf -0,2% (EPS) bis +1% (HolzF). Um den Energiestandard EH 40 H<sub>T</sub> 55 zu erreichen, werden an der Außenwand 140 mm PU-Dämmung benötigt (Die AW hat den größten Flächeneinfluss). Um die gleiche Dämmwirkung mit der Holzfaserdämmung realisieren zu können wird eine Dämmstärke von 240 mm benötigt (EPS und MW: 220 mm). Aufgrund des deutlich gestiegenen Materialeinsatzes während der Herstellungsphase ergeben sich daher höhere GWP-Emissionen.

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass beim ausschließlichen Vergleich der Dämmstoffe Änderungen zwischen den Dämmstoffalternativen zu erkennen sind. Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes im eingebauten Zustand relativieren sich diese.

Zu Vergleichszwecken wurden die Berechnung des **GWP** zusätzlich **mit identischen R-Werten** bezogen auf den Basisfall (PU-Dämmung) vorgenommen. Die Ergebnisse können Abbildung 15 entnommen werden.



**Abbildung 15:** Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das MFH mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

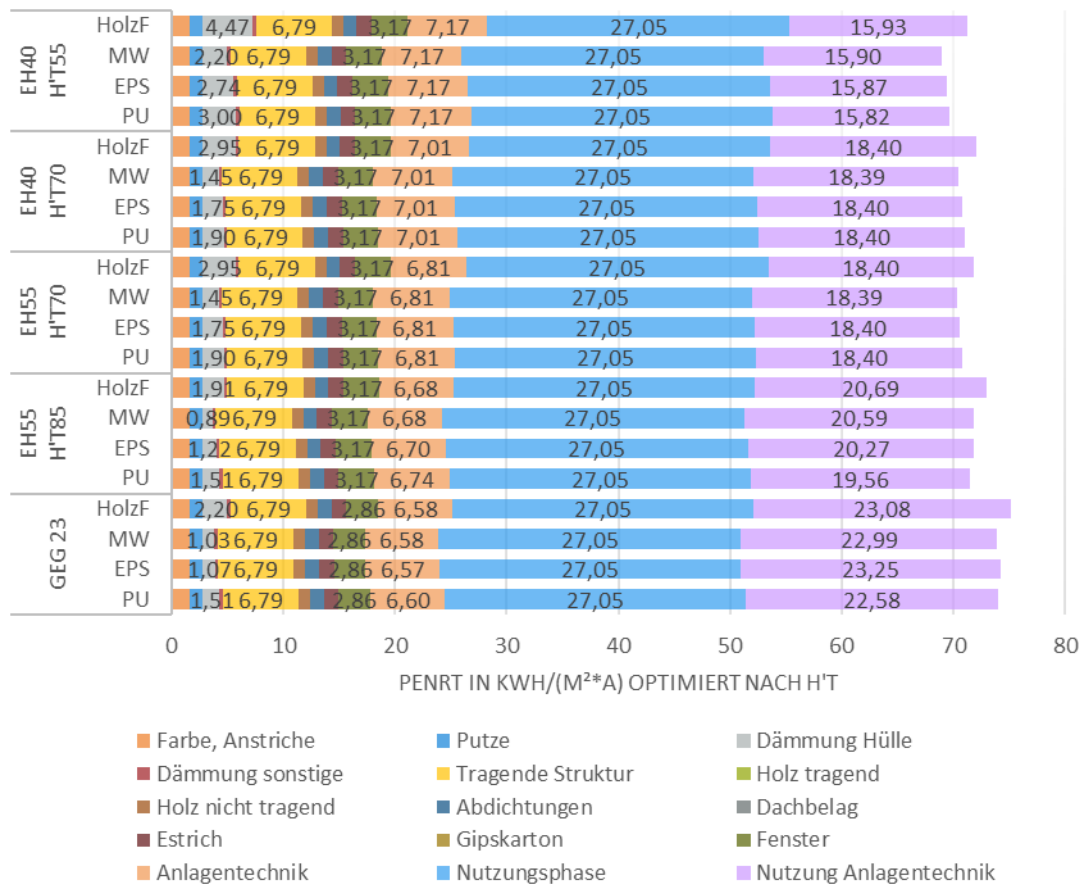
Durch die identischen R-Werte der Dämmstoffalternativen ergeben sich identische U-Werte der Wand-, Dach- und Deckenkonstruktionen. Dies führt wiederum zu einem identischen Endenergiebedarf der Varianten während der Nutzungsphase der einzelnen Energiestandards. Aus diesem Grund sind in Abbildung 15 lediglich Veränderungen des GWP bei den Dämmstoffen zu erkennen (grau).

Die Ergebnisse in Abbildung 15 mit den identischen R-Werten weichen nur wenig von denen in Abbildung 14 (Rundung Dämmstoffdicken auf 20 mm Stufen) ab.

#### 4.2.2 Primärenergieaufwand, nicht erneuerbar (PENRT)

Die Ergebnisse aus der Berechnung zum **PENRT optimiert nach H<sub>T</sub>** aus nicht erneuerbaren Quellen können Abbildung 16 entnommen werden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Effizienzhaus-Varianten sowie die Untersuchung der verschiedenen Dämmstoffe über den gesamten Lebenszyklus des EFH. Die Emissionen sind dabei in Materialgruppen gegliedert. Es ist zu erkennen, dass der Primärenergieaufwand eine ähnliche Verteilung wie das Treibhausgaspotential

aufweist: Die Nutzungsphase (hellblau und lila) weist den höchsten Anteil am Energieaufwand auf. Dieser reduziert sich mit steigenden Energiestandard von über 65% (GEG 23-Variante) auf ca. 60% bei der EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante.



**Abbildung 16:** Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar für das MFH optimiert nach H<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

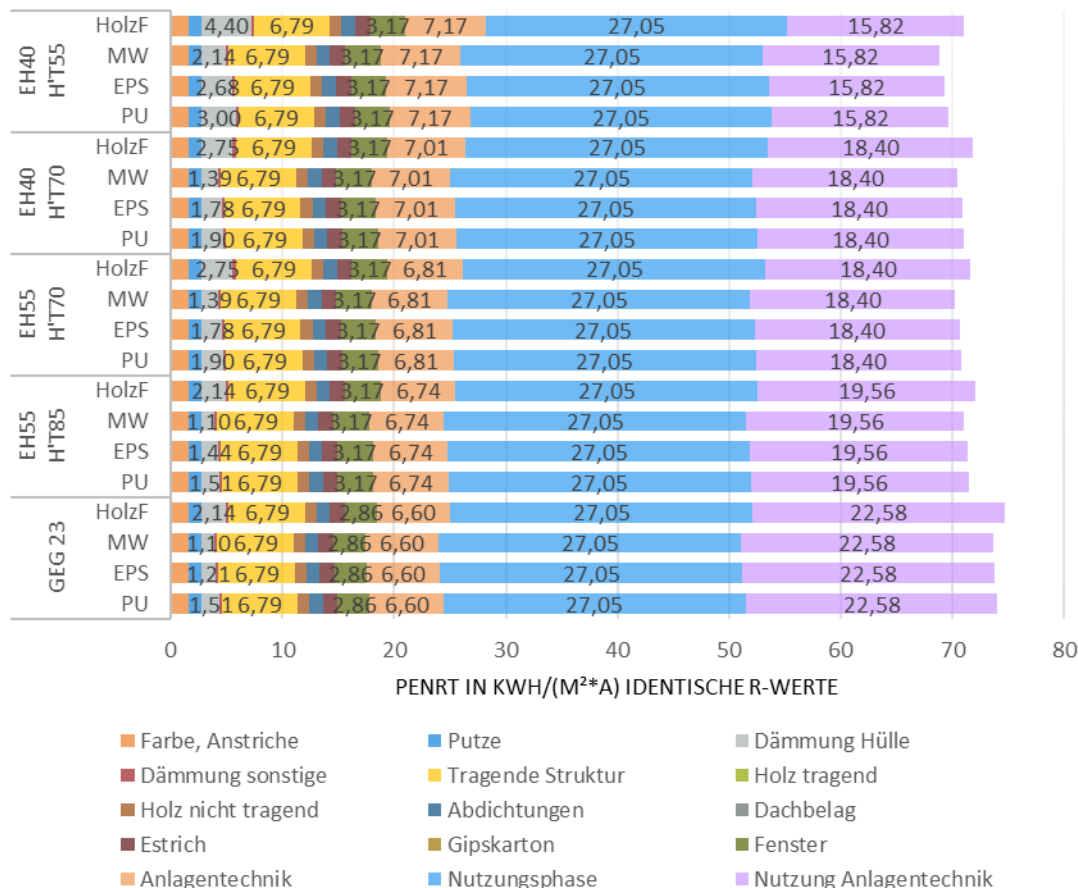
Allgemein ist zu erkennen, dass eine leichte Reduzierung des PENRT mit zunehmenden Energiestandards auftritt. Die GEG 23-Variante mit PU-Dämmung weist einen PENRT von 74,04 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) auf, die EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante mit PU-Dämmung 69,66 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Dies entspricht einer Reduzierung von 6%.

Die Dämmung (hellgrau) hat bei der GEG 23-Variante einen Anteil von 1% (EPS/MW) bis 3% (HolzF) am Primärenergieaufwand. Mit den steigenden Energiestandards erhöht sich dieser auf 3% (MW) und bis zu 6% (HolzF) bei der Variante EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante.

Bei der gesonderten Betrachtung des Primärenergiebedarf nicht erneuerbar verbunden mit den Dämmstoffen sind Unterschiede bei den Dämmstoffalternativen zu erkennen. Im Vergleich zur PU-Dämmung (GEG 23-Variante) ergeben sich Abweichungen von -32% (MW) bis +46% (HolzF). Bezogen auf den gesamten Gebäudelebenszyklus und inklusive der Emissionen während der Nutzungsphase relativieren sich diese Abweichungen auf -0,1% (MW) bis +2% (HolzF). Beim gesonderten Vergleich des GWP der Dämmstoffe der EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante weisen die

Dämmstoffalternativen im Vergleich zur PU-Dämmung Abweichungen von -27% (MW) bis zu +49% (HolzF) auf. Bezogen auf den gesamten Gebäudelebenszyklus und inklusive der Emissionen während der Nutzungsphase relativieren sich diese Abweichungen auf -1% (MW) bis +2% (HolzF). In Bezug auf die PENRT kann keine Empfehlung für oder gegen ein Dämmmaterial ausgesprochen werden.

Zu Vergleichszwecken wurden die Berechnung des **PENRT** zusätzlich **mit identischen R-Werten** bezogen auf den Basisfall (PU-Dämmung) vorgenommen. Die Ergebnisse können Abbildung 17 entnommen werden.



**Abbildung 17:** Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar für das MFH mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

Durch die identischen R-Werte der Dämmstoffalternativen ergeben sich identische U-Werte der Wand-, Dach- und Deckenkonstruktionen. Dies führt wiederum zu einem identischen Endenergiebedarf der Varianten während der Nutzungsphase der einzelnen Energiestandards. Aus diesem Grund sind in Abbildung 17 lediglich Veränderungen des PENRT bei den Dämmstoffen zu erkennen (grau).

Die Ergebnisse in Abbildung 17 mit den identischen R-Werten decken sich mit den Ergebnissen aus Abbildung 16 mit der Optimierung nach H<sub>T</sub>.



4.2.3 QNG-Grenzwerte

In der nachfolgenden Tabelle 14 werden die Ergebnisse für die verschiedenen Effizienzstandards und Dämmstoffvarianten mit den Grenzwerten für das GWP und den PENRT nach Anlage 3 des QNG-Handbuch (BMWSB 2023e) verglichen. Keine der Gebäudevarianten erfüllt die Anforderungen des QNG-Premiumlevels an PENRT. Allerdings wäre das auch der Fall, wenn die Dämmstoffe keinen Beitrag zur PENRT leisten würden. Folglich kann ein Einfamilienhaus mit der ausgewählten Baukonstruktion das Premiumniveau unabhängig von den gewählten Dämmstoffen nicht erreichen. Nach der derzeitigen Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG) reicht QNG-PLUS für die Förderfähigkeit aus, somit können die berechneten Gebäude von der Bundesförderung profitieren.

Tabelle 14: Übersicht zur Einhaltung der Grenzwerte der berechnen Varianten - MFH

	QNG-PLUS		QNG-PREMIUM	
	GWP 24 kg CO <sub>2</sub> Äq./m <sup>2</sup> *a	PENRT 96 kWh/m <sup>2</sup> *a	GWP 20 kg CO <sub>2</sub> Äq./m <sup>2</sup> *a	PENRT 64 kWh/m <sup>2</sup> *a
<b>GEG 23</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗
<b>EH 55 H<sub>T</sub> 85</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗
<b>EH 55 H<sub>T</sub> 70</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗
<b>EH 40 H<sub>T</sub> 70</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗
<b>EH 40 H<sub>T</sub> 55</b>				
PU	✓	✓	✓	✗
EPS	✓	✓	✓	✗
MW	✓	✓	✓	✗
HolzF	✓	✓	✓	✗

#### 4.2.4 Mehrfamilienhaus – Vergleich von Gebäuden mit PU- und Holzfaserdämmung bei gleichen Außenmaßen

In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss die für das Erreichen der Energieeffizienzstandards erforderliche Dicke der Außenwanddämmung auf die Nutzfläche des Gebäudes, GWP und PENRT bei festgelegten Außenmaßen hat.

Für diese Berechnungsvariante wird das Typengebäude und der Wandaufbau wie vorab beschrieben verwendet. Der Unterschied zu den vorangegangenen Berechnungen ist, dass die Außenmaße des Gebäudes fixiert sind. Dadurch verändert sich das netto Gebäudevolumen und die zur Verfügung stehenden Nutzflächen  $A_N$ . Die Veränderungen werden anhand eines Basisfalls vorgenommen. Der Basisfall wird durch die GEG 23-Variante des PU-Dämmstoffes mit einer Dämmstärke von 60 mm definiert. Bei allen Varianten, die eine höhere Dämmstoffstärke aufweisen, wird die Nutzfläche für die Berechnung anteilig verringert. Im Vergleich zur PU-Dämmung steht in dieser Variante die Holzfaserdämmung. Die abweichenden Nutzflächen für die Berechnungen können Tabelle 15 entnommen werden. Dabei ist eine Reduktion der Nutzfläche von 11 m<sup>2</sup> bis 27 m<sup>2</sup> zwischen den Dämmstoffvarianten PU und HolzF zu erkennen. Vom Grundsatz gilt: Je besser der Effizienzstandard des Gebäudes, desto dicker die Dämmschichten. Somit reduziert sich bei festgelegten Außenmaßen die nutzbare Grundfläche mit steigendem Effizienzstandard. Die Nutzflächenreduktion ist allerdings nicht bei allen Dämmvarianten gleich. Die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs spielt eine wichtige Rolle.

Die Anlagentechnik ist identisch zu den Angaben des Mehrfamilienhauses beschrieben im Kapitel 2.3.2. Es wird davon ausgegangen, dass der Endenergiebedarf pro m<sup>2</sup> und Jahr für alle Energiestandards gleich zu den vorangegangenen Berechnungen ist.

**Tabelle 15** Berechnete Nutzflächen für PU und HolzF bei fixierten Gebäude-Außenmaßen

Nutzflächen $A_N$ in m <sup>2</sup>	GEG 23	EH 55 H' <sub>T</sub> 85	EH 55 H' <sub>T</sub> 70	EH 40 H' <sub>T</sub> 70	EH 40 H' <sub>T</sub> 55
PU	1.162	1.162	1.156	1.156	1.140
HolzF	1.145	1.151	1.135	1.135	1.113
Differenz in m <sup>2</sup>	17	11	21	21	27

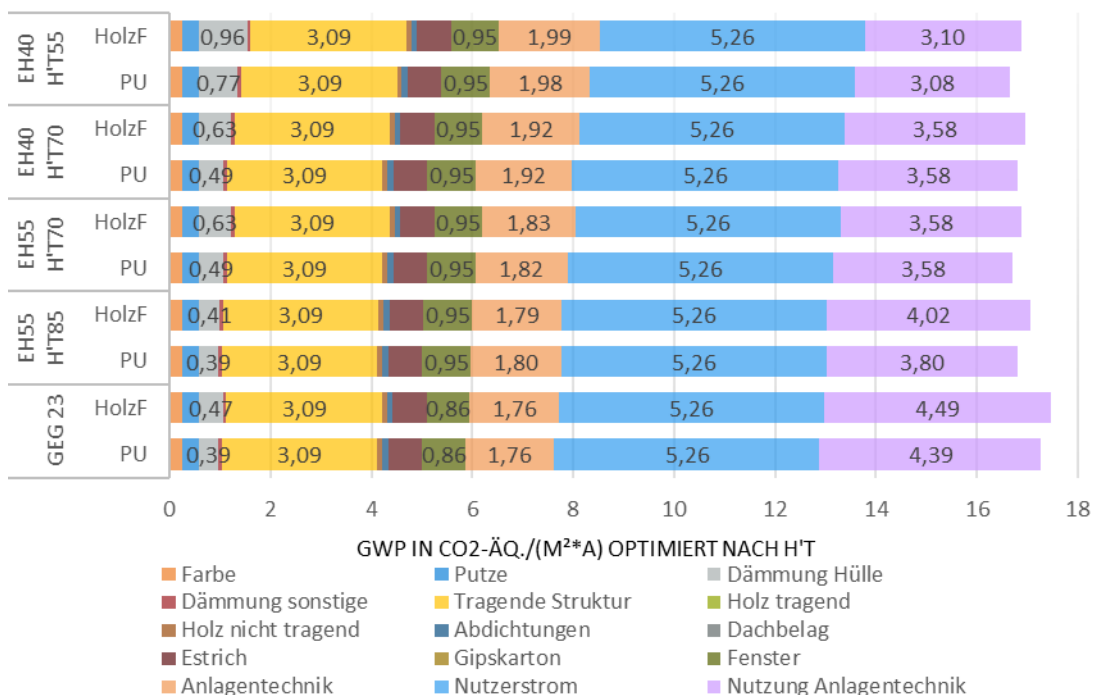
Die Dämmstoffstärken sind ebenfalls identisch zu den Eingabeparametern aus Tabelle 8 in Kapitel 2.3.2. Die Dämmstoffdicken werden dabei auf den Grenzwert  $H'_T$  des Gebäudes optimiert und entsprechen handelsüblichen Dicken (Rundung Dämmstoffdicken auf 20 mm Stufen).

#### Ergebnisse

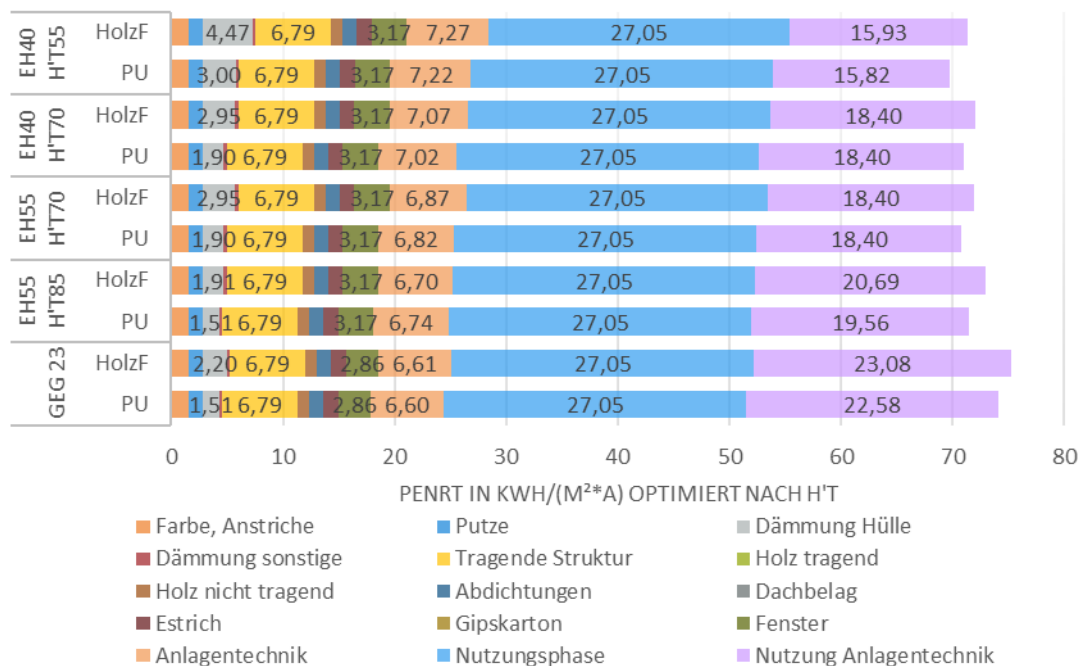
Die berechneten Ergebnisse des GWP und PENRT werden in der Einheit kg CO<sub>2</sub>-Äq./(m<sup>2</sup>·a) bzw. kWh/(m<sup>2</sup>·a) angegeben. Je größer die Nutzfläche bei ansonsten identischer Baukonstruktion, umso geringer die Umweltwirkungen pro m<sup>2</sup> Nutzfläche.

Neben der Nutzfläche beeinflusst auch die Nutzungsdauer des Gebäudes die Höhe der Umweltwirkungen. Diese ist in dieser Studie laut QNG-Handbuch auf 50 Jahre gesetzt. Dadurch verringert sich der Einfluss durch die Nutzfläche.

Nachfolgend sind die GWP-Ergebnisse für das Gebäude mit identischen Außenmaßen abgebildet (Abbildung 18). Das GWP verbunden mit der PU- und Holzfaserdämmung des Gebäudes ist in diesem Fall identisch zu den Ergebnissen aus Abbildung 14 (MFH mit gleicher Nutzfläche) in Kapitel 4.1.1. Bezogen auf den gesamten Gebäude-Lebenszyklus sind bei Abbildung 18 Abweichungen von <0,1% bis 0,2% zu erkennen. Hinsichtlich der Umweltwirkungen sind die Änderungen vernachlässigbar. Die Ergebnisse des PENRT in Abbildung 19 zeigen ein identisches Bild zum GWP.



**Abbildung 18** Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP), für das MFH mit identischen Gebäude-Außenmaßen und optimiert nach H<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, HolzF = Holzfaser



**Abbildung 19** Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar (PENRT), für das MFH mit identischen Gebäude-Außenmaßen und optimiert nach  $H_T$  anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, HolzF = Holzfaser

#### 4.2.5 Vergleich der Umweltwirkungen über den Lebenszyklus: Altbaustandard WSchV82, GEG 23 und EFH40 H'T55 am Beispiel Mehrfamilienhaus

In diesem Abschnitt soll analysiert werden, wie sich die Umweltwirkungen des Gebäudes durch eine bessere Dämmung über den Gebäude-Lebenszyklus verändern. Gebäude, die energetisch der WSchV82 entsprechen, machen einen großen Teil des Gebäudestandards aus. Gemäß des GEG sind Gebäude ab diesem Effizienzstandard bei einer Modernisierung von der Verpflichtung ausgenommen, die Wärmedämmung der thermischen Außenhülle zu ertüchtigen.

Für den Vergleich mit dem Altbaustandard wird die GEG 23-Variante und EH 40 H'T55-Variante der PU-Dämmung mit den Wärmeschutzanforderungen der WSchV82 verglichen. Die Wand-, Dach und Fußbodenaufbauten werden vom Typengebäude MFH aus Kapitel 2.3.2 übernommen. Dies ist ein vereinfachter Ansatz da zum Zeitpunkt der Planung des Altbaubestandes ggf. geringere statische oder brandschutztechnische Anforderungen an die Gebäude gestellt wurden. Für den Vergleich werden die Dämmstoffdicken für die GEG 23-Variante und EH 40 H'T55-Variante übernommen. In der WSchV82 (Deutscher Bundestag (BT) 1982) gab es noch keine Grenzwerte für den Primärenergieeinsatz und den spezifischen Transmissionswärmeverlust  $H_T$ , sondern für den mittleren Wärmedurchgangskoeffizient für die thermische Hülle des Gebäudes. Der Grenzwert für den maximalen mittleren Wärmedurchgangskoeffizient wird in der WSchV82 durch das A/V-Verhältnis des Gebäudes festgelegt. Das MFH weist eine A/V-Verhältnis von 0,42 auf, daher ergibt sich ein Grenzwert von 0,86 W/(m<sup>2</sup>·K). Zudem gibt es Grenzwerte für einzelne Bauteile oder

Bauteilkombinationen. Die für den Altbaustandard berechneten U-Werte und Grenzwerte nach WSchV82 können Tabelle 16 entnommen werden. Der Wärmebrücken-zuschlag für die Berechnung des Endenergiebedarf nach DIN V 18599 wird auf 0,1 W/(m<sup>2</sup>·K) gesetzt.

**Tabelle 16 Darstellung der U-Werte des Altbaustandards nach WSchV82**

Bauteil	U-Wert W/(m <sup>2</sup> ·K)	Grenzwert nach WSchV82 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Fenster 2-Scheiben-Isolierverglasung	2,7	3,1
Außenwand Keine Dämmung	0,74	
Kombination von Außenwand und Fenster	1,04	1,5
Dach 80 mm PU-Dämmung	0,267	0,30
Kellerdecke 40 mm PU-Dämmung	0,33	0,55
Maximaler mittlerer Wärme- durchgangskoeffizient	0,86	0,86

Die Anlagentechnik bleibt aus Vergleichszwecken identisch zur beschriebenen Anlagentechnik aus Kapitel 2.3.2 Mehrfamilienhaus. Die Wärmeerzeugung erfolgt mittels einer Wärmepumpe, auf dem Flachdach wird eine PV-Anlage zur teilweisen Deckung des eigenen Strombedarf installiert. Somit entspricht der Altbau einem Gebäude, bei dem nur die Gebäudetechnik auf den heutigen bzw. zukünftigen Stand gebracht, die Gebäudehülle aber nicht energetische ertüchtigt wurde. Der Endenergiebedarf und die Eigendeckung mit PV-Strom können Tabelle 17 entnommen werden.

**Tabelle 17 Eingabedaten des Altbaustandards nach WSchV82 für die Berechnungen der Ökobilanz**

Altbaustandard WSchV82	Eingabedaten
Endenergiebedarf Q <sub>E</sub>	38,08 kWh/(m <sup>2</sup> ·K)
PV-Eigendeckung	21,0%

## Ergebnisse

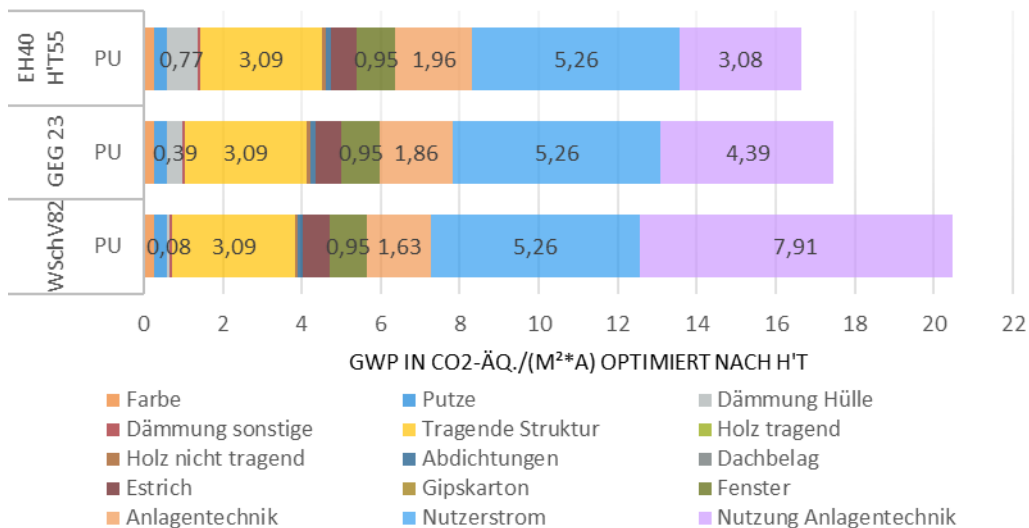
Die Ergebnisse des Vergleichs Altbaustandard mit GEG 23 und EH 40 h<sup>-1</sup>·55 können Abbildung 20 entnommen werden. Die mit der Dämmung verbundenen Treibhausgasemissionen sind beim GEG23-Standard im Vergleich mit dem Altbau um 0,31 kg CO<sub>2</sub>-Äq./((m<sup>2</sup>·a), beim EH40 H<sup>-1</sup>T55-Standard sogar um 0,69 kg CO<sub>2</sub>-Äq./((m<sup>2</sup>·a) höher. Bezogen auf den gesamten Gebäude-Lebenszyklus spielen die Änderungen von 2% bzw. 3% eine untergeordnete Rolle.

Aufgrund des geringeren Energiestandards durch weniger Dämmung weist die WSchV82-Variante einen höheren Endenergieverbrauch während der Nutzungsphase auf. Bei der WSchV82-Variante weist das GWP einen Anstieg gegenüber der GEG23-Variante um 3,52 kg CO<sub>2</sub>-Äq./((m<sup>2</sup>·a) auf, im Vergleich zur EH 40 h<sup>-1</sup>T55-

Variante sogar um 4,83 kg CO<sub>2</sub>-Äq./((m<sup>2</sup>\*a). Bezogen auf den gesamten Gebäude-Lebenszyklus sind dies Abweichungen von 17% und 24%.

Durch geringere Eigennutzung des PV-Stroms reduziert sich der Anteil der Anlagentechnik bei der WSchV82-Variante, da die PV-Anlage nur Anteilig zum selbst genutzten Strom dem Gebäude zugerechnet wird.

Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass es aus umwelttechnischer Sicht sinnvoll ist die thermische Hülle von Gebäuden zu ertüchtigen, die nach WSchV82 errichtet wurden. Durch die bessere Dämmung kann sechs bis zehn Mal mehr GWP während der Nutzungsphase eingespart werden, als bei Herstellung, Einbau und Entsorgung der Dämmstoffe entstehen. Bemerkenswert ist, dass diese Zahlen für Gebäude gelten, die mit moderner Anlagentechnik (Wärmepumpe, Photovoltaik, mechanische Lüftung) ausgestattet sind. Beim GWP während der Nutzungsphase wurde der weitere Ausbau der Erneuerbaren für die Stromerzeugung bereits berücksichtigt.



**Abbildung 20** Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das MFH, Vergleich des Altbaustandard (WSchV82) mit dem GEG 23 und dem EH 40 H'T55 Standard gegliedert nach Material-gruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr

Die Ergebnisse des PENRT können Abbildung 21 entnommen werden. Analog zum GWP weist die WSchV82-Variante einen geringeren PENRT für die Herstellung der Dämmung auf. Die Nutzung der Anlagentechnik zeigt eine Verdopplung des PENRT im Vergleich zu den GEG 23 und EH 40 h<sub>1</sub>55-Varianten.

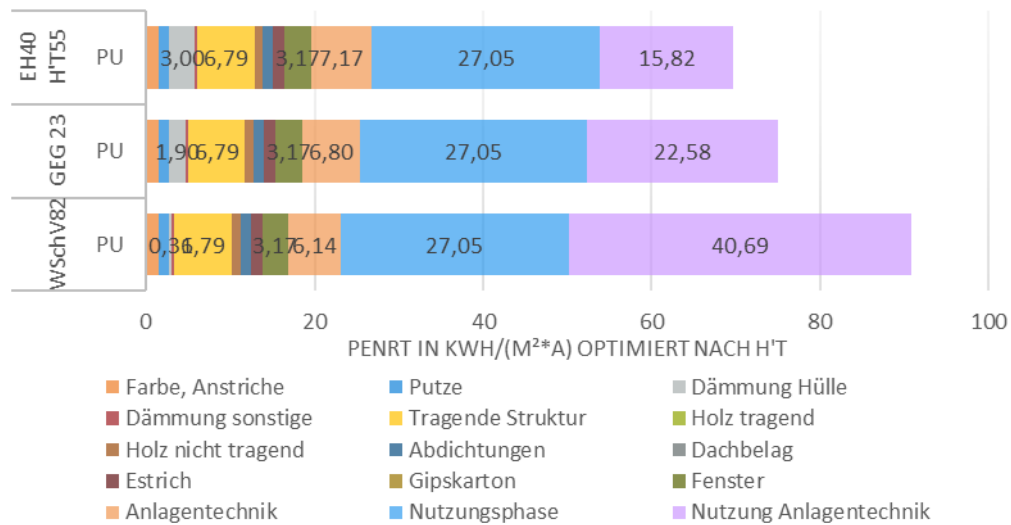


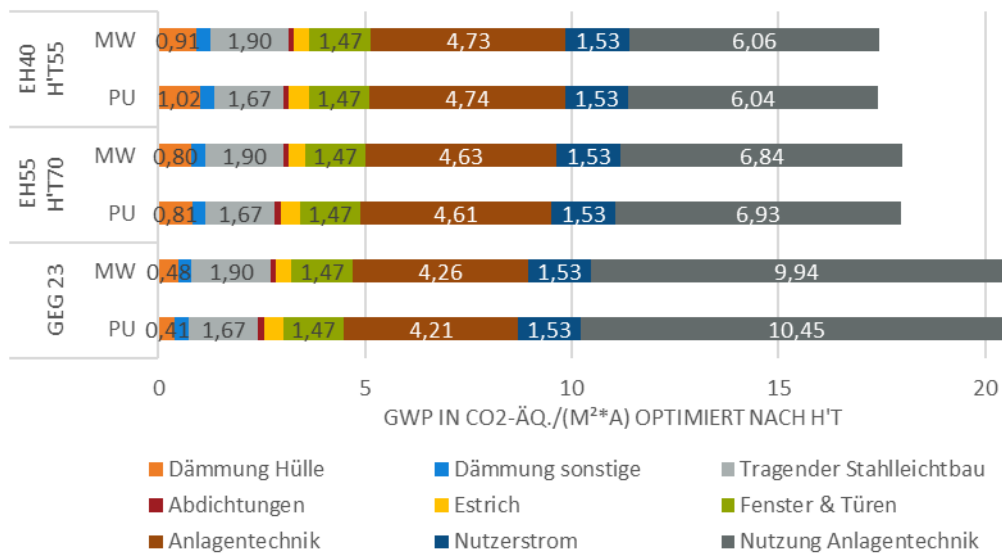
Abbildung 21 Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar (PENRT) für das MFH, Vergleich des Altbaustandard (WSchV82) mit dem GEG 23 und dem EH 40 H'T55 Standard gegliedert nach Material-gruppen, angegeben in kWh pro m² NGF und Jahr

### 4.3 Lagerhalle

#### 4.3.1 Treibhausgaspotential (GWP)

Abbildung 22 können die Ergebnisse zum **GWP optimiert nach H<sub>T</sub>** entnommen werden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Energieeffizienz- und Dämmstoffvarianten über den gesamten Lebenszyklus des Einfamilienhauses. Das GWP ist dabei in Materialgruppen gegliedert. Es ist zu erkennen, dass die Nutzungsphase über 50 Jahre (Nutzerstrom hellblau und Nutzung Anlagentechnik lila) den größten Anteil an den Emissionen aufweist, gefolgt von der Anlagentechnik (braun), der tragenden Konstruktion (hellgrau), den Fenstern (grün) und der Dämmung für die Gebäudehülle (orange).

Beim Energiestandard GEG 23 weist die Nutzungsphase einen Anteil von ca. 58% auf. Durch den gehobenen Energiestandard reduziert sich dieser bis zur EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante auf 43%. Im Gegensatz dazu steigt der Anteil des GWP bezogen auf die Herstellungsphase und den Austausch der Materialien während der Nutzungsphase mit zunehmendem Energiestandard. Bei der GEG 23-Variante weisen die Materialien einen Anteil von 22% an den Umweltwirkungen auf. Bei den EH 40 H<sub>T</sub> 55-Varianten weisen die Bereitstellung der Materialien einen Anteil von 29% auf. Die Bereitstellung der Anlagentechnik hat über die verschiedenen Energiestandards und Dämmstoffvariationen einen Anteil von 20% bis 27% am GWP.



**Abbildung 22 Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das Lagerhalle optimiert nach  $H'_T$  anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, MW = Steinwolle**

Mit steigendem Dämmstoffdicken durch die höheren Anforderungen an den Energiestandard ist eine minimale Erhöhung des GWP während der Herstellung (orange) zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist eine deutliche Reduktion des GWP während der Nutzungsphase (Nutzung Anlagentechnik dunkelgrau) zu erkennen. Von den totalen Werten ist eine Reduktion des GWP von 16% (von GEG 23-Variante zur EH 40  $H'_T$  55-Variante für die PU-Dämmung) festzustellen.

Als Datengrundlage für die Berechnungen des GWP für den Endenergieeinsatz wird ein zukunftsweisender Emissionswert für den deutschen Strommix von 0,35 kg/kWh CO<sub>2</sub>-Äq. angenommen (deutscher Strommix laut Ökobaudat: 0,55 kg/kWh CO<sub>2</sub>-Äq.). Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil an erneuerbaren Energieträgern in Zukunft zunimmt und somit das Treibhausgaspotential pro kWh Strom reduziert wird. Unter Verwendung des Strommixes nach Ökobaudat könnte eine höhere Reduktion erzielt werden.

Beim GWP verbunden mit den Dämmstoffen sind Unterschiede zur Dämmstoffalternative zu erkennen. Im Vergleich zur PU-Dämmung (GEG 23-Variante) ergibt sich eine Abweichung von +17% für die Mineralwolle. Bezogen auf das totale GWP über den gesamten Gebäudelebenszyklus ergibt sich für die Mineralwolle eine Reduktion von -0,3%. Beim Vergleich der EH 40  $H'_T$  55-Variante weisen die Dämmstoffalternativen zur PU-Dämmung eine Abweichung von -11% für die MW auf. Bezogen auf den gesamten Gebäudelebenszyklus relativieren sich diese Abweichungen auf +0,6%.

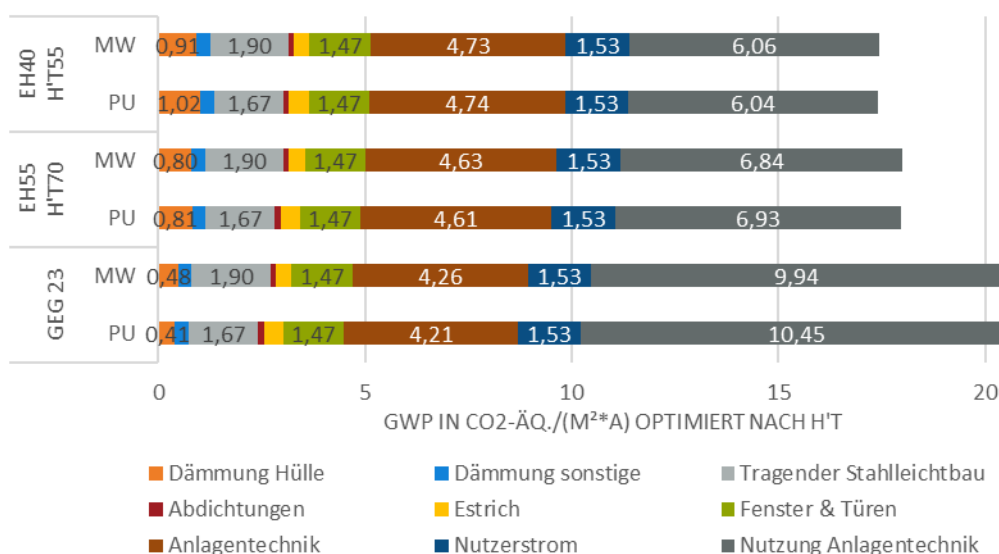
Zusammenfassend ist zu erkennen, dass beim ausschließlichen Vergleich der Dämmstoffe Änderungen zwischen den Dämmstoffalternativen zu erkennen sind. Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes im eingebauten Zustand relativieren sich diese.



### 4.3.2 Primärenergieaufwand, nicht erneuerbar (PENRT)

Die Ergebnisse aus der Berechnung zum **PENRT optimiert nach  $H'_T$**  aus nicht erneuerbaren Quellen können Abbildung 23 entnommen werden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Effizienzhaus-Varianten sowie die Untersuchung der verschiedenen Dämmstoffe über den gesamten Lebenszyklus des Einfamilienhauses. Die Emissionen sind dabei in Materialgruppen gegliedert. Es ist zu erkennen, dass der Primärenergieaufwand eine ähnliche Verteilung wie das Treibhausgaspotential aufweist: Die Nutzungsphase (Nutzerstrom dunkelblau und Nutzung Anlagentechnik dunkelgrau) weist den höchsten Anteil am Energieaufwand auf. Dieser reduziert sich mit steigendem Energiestandard von 69% (GEG 23-Variante) auf ca. 57% bei der EH 40  $H'_T$  55-Variante.

Der PENRT reduziert sich mit zunehmenden Anforderungen an den Energiestandard. Die GEG-Variante mit PU-Dämmung weist einen Primärenergieeinsatz nicht erneuerbar von 88,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) auf, die EH 40  $H'_T$  55-Variante mit PU-Dämmung 70,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Dies entspricht einer Reduzierung von über 20%.



**Abbildung 23** Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das Lagerhalle mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, MW = Steinwolle

Die Dämmung (orange) hat bei der GEG 23-Variante einen Anteil von 2% (PU und MW) am totalen Primärenergieaufwand. Mit den steigenden Energiestandards erhöht sich dieser auf 5% (PU) und 4% (MW) bei der Variante EH 40  $H'_T$  55-Variante.

Wird das PENRT verursacht durch die Dämmstoffe direkt miteinander Verglichen ergeben sich bei der GEG 23-Variante keine Abweichungen. Bei der EH 40  $H'_T$  55-Variante ergeben sich Abweichungen von -32% für die MW zur PU-Dämmung. Bezogen auf den gesamten Gebäude-Lebenszyklus entspricht dies einer Reduktion von -1,8%. Die Unterschiede zwischen den Dämmstoffalternativen sind daher zu vernachlässigen.

### 4.3.3 QNG-Grenzwerte

Für die QNG-Grenzwerte bei Nicht-Wohngebäude werden keine fixen Werte zur Einhaltung der Anforderungen gegeben, sondern projektspezifische Anforderungswerte nach Anlage 3 Anhang 3.2.1.2 gestellt. Die projektspezifischen Anforderungswerte ergeben sich aus einem Gebäudebezogenen Anteil und betriebs- und nutzungsbedingten Anteilen. Bei der Berechnung projektspezifischen Anforderungen wird meistens auch zwischen dem angestrebten Anforderungsniveau (PLUS oder PREMIUM) unterschieden (BMWSB 2023c). Daher muss im Vorgang geklärt sein, welches Anforderungsniveau angestrebt wird.

In der vorliegenden Studie wird das Anforderungsniveau PREMIUM angestrebt. Aus den Berechnungen ergeben sich die in Tabelle 18 gegebenen Grenzwerte. Der grüne Haken signalisiert, ob die berechneten Umweltwirkungen die Grenzwerte unterschreiten.

Beide Gebäudevarianten erfüllen die Anforderungen des QNG-Premiumlevels. Allerdings haben die Dämmstoffe keinen großen Einfluss, auf das Erfüllungslevel. Bei Veränderung der Baukonstruktion können sich andere Werte für PENRT und GWP ergeben.

**Tabelle 18** QNG-Grenzwerte für Nicht-Wohngebäude berechnet nach Anhang 3.2.1.2 zur Anlage 3; mit Einschätzung, ob die Grenzwerte eingehalten werden können

	GWP in kg CO <sub>2</sub> -Äq./ (m <sup>2</sup> a)			PENRT in kWh/(m <sup>2</sup> a)		
	GEG23	EH55 H <sub>T</sub> 70	EH40 H <sub>T</sub> 55	GEG23	EH55 H <sub>T</sub> 70	EH40 H <sub>T</sub> 55
PU	24,83 ✓	22,95 ✓	22,43 ✓	99,70 ✓	90,04 ✓	87,39 ✓
MW	24,57 ✓	22,90 ✓	22,44 ✓	98,37 ✓	89,79 ✓	87,43 ✓

## 5 Diskussion und kritische Betrachtung

### 5.1 Diskussion der Ergebnisse

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die Nutzungsphase (B6) den größten Einfluss auf das Treibhausgaspotential (GWP) und den Primärenergiebedarf nicht erneuerbar (PENRT) über den gesamten Lebenszyklus aller drei Typengebäude aufweist. Das trifft auf alle untersuchten energetischen Standards zu, auch auf die beiden sehr ambitionierten Standards EH 40.

Mit steigendem Energiestandard steigt auch der Anteil der Herstellungsphase und Erneuerung der Dämmstoffe am Gesamt-GWP und PENRT der untersuchten Gebäude. Dem stehen andererseits aber auch Einsparungen während der Nutzungsphase gegenüber. Aufgrund der immer kleiner werdenden Dämmwirkung jedes zusätzlichen Zentimeters werden diese Einsparungen im Betrieb jedoch zum größten Teil durch die gestiegenen Aufwendungen während der Herstellung/Erneuerung aufgeessen. Dabei sollte beachtet werden, dass hier eine Verbesserung von einem guten Wärmedämmniveau auf ein sehr gutes Niveau untersucht wurde. Die zusätzliche Einsparung durch die besseren Energiestandards fällt daher nur klein aus. Die Einsparung bei der Endenergie ist bei der Sanierung eines „schlechten“ Bestandsgebäudes deutlich stärker ausgeprägt (vgl. Kapitel 4.2.5 MFH - Vergleich mit Altbaustandard nach WSchV82).

Auch wenn der Anteil der Herstellung im Vergleich zum Betrieb mit zunehmendem energetischem Standard größer wird, kann aus der Untersuchung abgeleitet werden, dass der Nutzen von Dämmung bei den untersuchten Standards immer gegeben ist. Daher sollte es weiterhin das Ziel sein, möglichst energiesparend zu bauen und hohe Wärmeschutzstandards für die Hülle zu realisieren. Dabei spielt die Art der Dämmung nur eine untergeordnete Rolle. Im Vergleich zur Gesamtbilanz ist der aus den verschiedenen Dämmstoffen resultierende Unterschied gering.

Aufgrund der insgesamt geringeren Dämmdicken ist auch der Unterschied der energetischen Standards bei der **Lagerhalle** in der Nutzungsphase stärker ausgeprägt. Hier überwiegt der geringere Endenergiebedarf von einem untersuchten Standard zum nächstbesseren Standard den Aufwand für die Herstellung und die Erneuerung der Dämmstoffe, da insgesamt weniger Dämmstoff eingebaut wird. Der anhand der Lagerhalle festgestellte Zusammenhang kann analog auch auf andere Nichtwohngebäude übertragen werden, auch wenn andere Geometrien und Nutzungen natürlich eine Verschiebung der Anteile zwischen Herstellung und Nutzung erwarten lassen. Trotzdem ist es damit auch bei Nichtwohngebäuden empfehlenswert einen gehobenen Energiestandard zu verfolgen.

Die **Nutzungsphase** teilt sich dabei in den Nutzerstrom, der als Pauschale vom QNG-Handbuch angegeben wird und in den Betrieb der Anlagentechnik. Daher hat die Wahl der Anlagentechnik nicht nur einen Einfluss bei der Bereitstellung der Anlage, sondern auch auf Umweltwirkungen während des Betriebs. Beim **EFH und MFH** wurde eine Wärmepumpe (WP) als Wärmebereitstellung gewählt. Für den Betrieb der WP wird ausschließlich Strom eingesetzt. Dadurch beeinflussen die Emissionen des

verwendeten Strommixes den Betrieb maßgeblich. In der vorliegenden Studie wird mit einem zukunftsweisenden Strommix gerechnet, der Emissionen von 350 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh und einen Primärenergiefaktor von 1,8 aufweist (Pehnt et al. 2022). Es wird angenommen, dass in Zukunft der Anteil an erneuerbaren Energieträgern zunimmt und somit die pro kWh verursachten Emissionen abnehmen. Der aktuell in der Ökobaudat hinterlegte Strommix weist GWP-Emissionen von 540 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh und einen Primärenergiefaktor von 1,8 auf (thinkstep 2018). Beim MFH wird zusätzlich noch eine PV-Anlage montiert, der daraus resultierende, eigengenutzte Strom darf mit einem Emissionswert und Primärenergiefaktor von 0,0 angenommen werden. Die eingespeiste Energie darf als Gutschrift dem Modul D zugeschrieben werden.

Die Dämmstoffe haben trotz ihrer geringen Masse einen nennenswerten Anteil an den gesamten Emissionen der Gebäude in der Herstellung und Erneuerung. Beim EFH liegt der Anteil je nach Energiestandard bei 5%-11%, beim MFH ist dieser mit 2%-6% etwas geringer. Bezogen auf die Nutzungsphase (EFH: 44%-52%; MFH: 50%-56%) sind die Anteile geringer, aber aufgrund der Inhaltsstoffe nicht vernachlässigbar.

Neben der Nutzungsphase und des Dämmstoffeinsatzes entfällt ein großer Teil des GWP und der PENRT auf die **Tragkonstruktionen**. Das gilt sowohl für das **EFH** als auch für das **MFH**. Dabei wurden für diese Studie zu Beginn die Konstruktionsweisen und Wandaufbauten festgelegt, welche überwiegend aus mineralischen Materialien bestehen, um die gängige Praxis abzubilden. Hier hätten andere Bau- und Konstruktionsweisen (z.B. der Holzbau) andere Ergebnisse zur Folge, welche auch auf die Einhaltung der QNG-Kriterien einen Einfluss haben können. Im Vergleich zum EFH und dem MFH hat bei der **Lagerhalle** das Tragwerk in Stahl-Leichtbauweise nur einen geringen Anteil am GWP und PENRT.

Die **Herstellung der Anlagentechnik** (A1-A3) weist beim EFH und MFH einen konstanten Anteil über die verschiedenen Energiestandards auf. Am gesamten Lebenszyklus hat die Anlagentechnik bei den Typengebäuden eine tendenziell untergeordnete Rolle, obwohl die Erneuerungszyklen gegenüber den Bauteilen sehr kurz sind. Aufgrund der höheren Nennleistung der Wärmepumpe und des zusätzlichen Technikbedarfs ist der Anteil am GWP und PENRT bei der Lagerhalle (GWP: ca. 4,6 kg CO<sub>2</sub>-Äq./(m<sup>2</sup>·a)) höher als bei den Wohngebäuden (EFH und MFH GWP: ca. 1,7 kg CO<sub>2</sub>-Äq./(m<sup>2</sup>·a)).

Bei der Dämmstoffauswahl stehen technische Anforderungen wie Wärmeleitfähigkeit, Druckfestigkeit und Feuchteresistenz im Vordergrund. Die technischen Eigenschaften entscheiden, ob ein Dämmstoff für eine bestimmte Dämmanwendung (z.B. WDVS, Flachdach, Boden) eingesetzt werden kann. Für die Grauen Emissionen ist die Rohdichte ein wichtiger Faktor, die Rohstoffbasis (nachwachsend, mineralisch, synthetisch) spielt hingegen eine untergeordnete Rolle. Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus sind die Unterschiede zwischen den Dämmstoffen eher gering.

Daraus lässt sich schließen, dass im Einzelfall geprüft werden muss, welche Bauweise, Anlagentechnik, Energiestandard und welches Dämmmaterial für den geplanten Neubau und dessen Anwendung geeignet ist.

## 5.2 Einschränkungen in der Betrachtung

Als Datengrundlage wurde die Ökobaudat 2021\_II verwendet. Die Hintergrunddaten dieser Datenbank werden oft durch branchen- oder herstellerübergreifende Daten abgebildet. Dadurch werden mehrere Produkte oder Herstellungsprozesse zusammengefasst und/oder Durchschnittsdatensätze erzeugt. Für die detaillierte Untersuchung von verschiedenen Dämmstoffen mit charakteristischen Eigenschaften wären produktspezifische Datensätze notwendig, um Unterschiede bei der Herstellung (effiziente Anlage, Nutzung von Grünstrom, usw.) oder der Ausgangsmaterialien (Rezyklate, Recyclingprodukte, usw.) aufzeigen zu können.

Laut QNG-Handbuch wurde bis zum 28.02.2023 die Ökobaudat 2020\_II als verpflichtende Datengrundlage verwiesen. Seit dem 01.03.2023 wird auf die interne Datenbank „Ökobilanzierung – Rechenwerte“ verwiesen. Bei einer Reproduktion dieser Studie mit der vom QNG-Handbuch vorgegebenen Datengrundlage können sich Abweichungen bei den berechneten Ergebnissen ergeben.

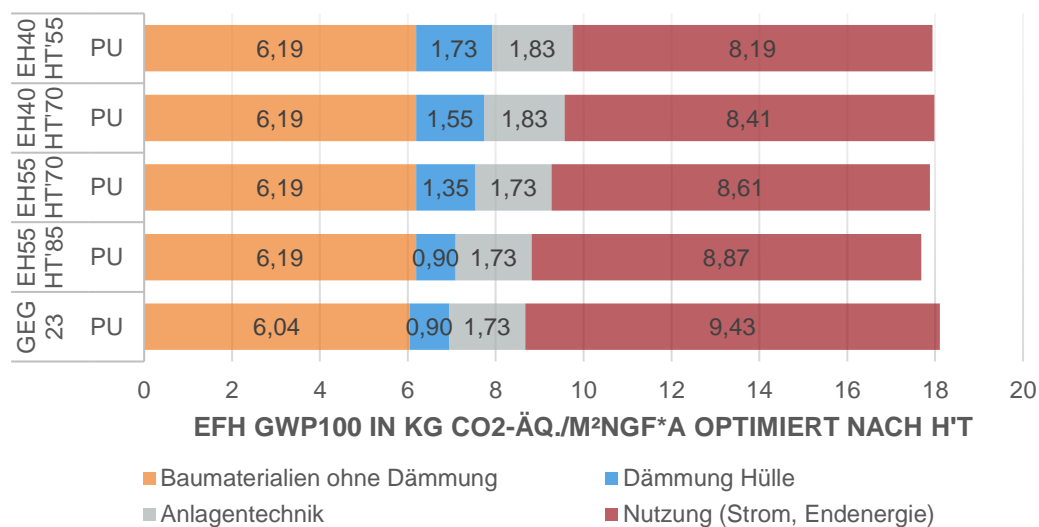
Eine Einschränkung der Studie ist die Wahl des Untersuchungsrahmens. Ziel war es den Anteil dämmstoffbezogener Umweltwirkungen am Gebäude aufzuzeigen und zu untersuchen, wie sich dieser Anteil durch unterschiedliche Dämmmaterialien verändert. Weitergehende technische Anforderungen an die Gebäude z.B. aus dem baulichen Brandschutz oder hinsichtlich Schallschutzanforderungen werden bei der Studie nicht berücksichtigt, wären aber bei einem konkreten Gebäude zu berücksichtigen, was die Wahlfreiheit für bestimmte Dämmstoffe und Bauweisen einschränken kann. Zudem wurde keine ökonomische und wirtschaftliche Betrachtung der energetischen Standards mit den jeweils eingesetzten Dämmstoffen in der Untersuchung vorgenommen. Diese könnten den Einfluss einer reduzierten Nutzfläche auf die Ergebnisse stärker verdeutlichen (vgl. Kapitel 4.2.4 MFH – Gebäude mit fixierten Außenmaßen).

Der Fokus der ökologischen Betrachtung wurde auf die Umweltwirkungskategorien GWP und PENRT beschränkt. Durch die Betrachtung von zusätzlichen Kategorien wie z.B. des Versauerungspotentials oder der Frischwassereutrophierung könnten sich andere Schlussfolgerungen oder Schwerpunkte für die Bewertung ergeben.

## 6 Kurzfassung und Fazit

Ziel der Studie ist es, exemplarischen den Einfluss der Wärmedämmung auf das Treibhausgaspotential (GWP) und den Primärenergieaufwand nicht-erneuerbar (PENRT) über den gesamten Lebenszyklus von drei unterschiedlichen Gebäude-Typen zu untersuchen. Dabei soll zum einen die Abhängigkeit der Ergebnisse vom Energieeffizienzstandard, zum anderen von der Art des Dämmstoffs betrachtet werden. Die Ergebnisse sollen mit den Anforderungen des Qualitätssiegels Nachhaltige Gebäude (QNG) hinsichtlich GWP und PENRT verglichen werden. Es wird dargestellt, welche der untersuchten Gebäudevarianten die Qualitätsstufen „QNG Plus“ und/oder „QNG Premium“ erfüllen.

Die Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen beispielhaft die Ergebnisse für das Treibhausgaspotential (GWP) der unterschiedlichen Effizienzhaus-Varianten sowie die Untersuchung der verschiedenen Dämmstoffe über den gesamten Lebenszyklus des Einfamilienhauses. Das GWP ist dabei nach der Nutzung (Nutzerstrom Nutzung Anlagentechnik rot; 45%-52%), der Baumaterialien ohne Dämmung (orange; ca. 34%), der Anlagentechnik (grau, ca. 10%) und der Dämmung für die Gebäudehülle (blau; 5%-10%) untergliedert.



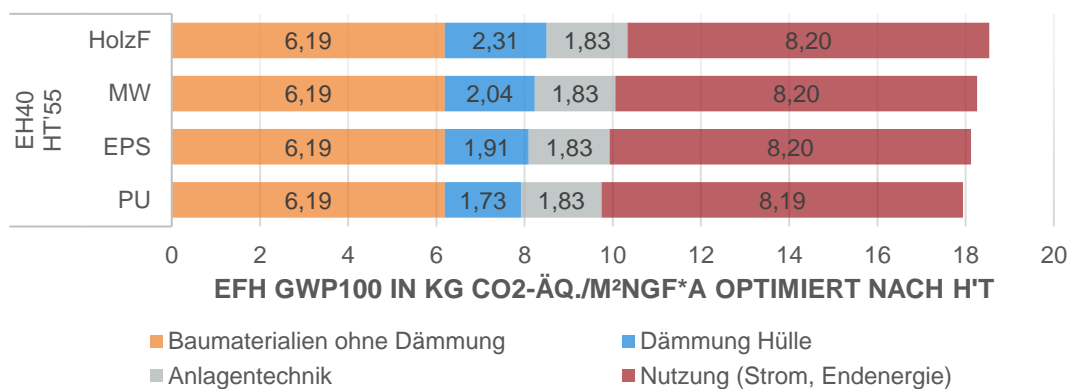
**Abbildung 24:** Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das EFH optimiert nach H<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards für Polyurethan-Dämmung; gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr

Über den gesamten Gebäude-Lebenszyklus hat die Nutzungsphase den größten Einfluss auf das GWP und PENRT. Das GWP verbunden mit der Nutzung teilt sich in den Nutzerstrom und in den Endenergiebedarf der für den Betrieb der Anlagentechnik erforderlich ist (abzüglich des PV-Stroms durch Eigennutzung). Der Nutzerstrom ist als Pauschalwert pro Quadratmeter Nutzfläche in den Rechenregeln für die Berechnung des GWP nach QNG-Anlage 3 vorgegeben und wird demzufolge in der Betrachtung nicht verändert. Das GWP das sich aus dem Endenergiebedarf für die Anlagentechnik ergibt, verringert sich mit steigenden Anforderungen an den Energiestandard der Gebäude (EH-Standard). Die gestiegenen Anforderungen an den Energiestandard werden wiederum durch einen höheren Dämmstoffeinsatz beeinflusst. Zusammenfassend ist zu erkennen, dass eine besser gedämmte thermische Hülle einen

direkten Einfluss auf die Reduzierung des Endenergieverbrauch während der Nutzungsphase hat.

Der Anteil des GWP verbunden mit den Dämmstoffen der Gebäudehülle nimmt mit den steigenden Anforderungen an den Energiestandard der Gebäude zu. Dadurch entsteht eine Gegenposition zum Rückgang des GWP während der Nutzungsphase. Die Reduzierung des GWP während der Nutzungsphase gleicht jedoch Erhöhung des GWP für den gestiegenen Dämmstoffeinsatz aus. Zudem ist eine gut gedämmte Gebäudehülle eine wichtige Voraussetzung für die geplante Wärmewende. Nur so kann z.B. eine hohe Arbeitszahl bei der Nutzung einer Wärmepumpe als Wärmeerzeuger realisiert werden.

Zusammenfassend ist der Abbildung 24 zu entnehmen, dass das GWP mit den steigenden EH-Standards abnimmt. Der Tiefstand des GWP liegt bei der EH 55 H<sub>T</sub> 85-Variante vor. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass ein zukunftsweisender Strommix als Datengrundlage für die Berechnung des GWP für den Strombedarf verwendet wurde. Nichtsdestotrotz, sollte nach wie vor das Ziel verfolgt werden, den Energiebedarf während der Nutzungsphase zu reduzieren. Daher ist auch jeder Nutzer dazu angehalten seinen Energiebedarf weiterhin zu reduzieren.



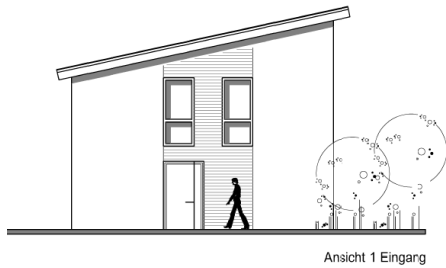
**Abbildung 25:** Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das EFH optimiert nach H<sub>T</sub> für den Energiestandard EH40 sowie für die Dämmstoffalternativen; gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

In Abbildung 25 ist der Vergleich der unterschiedlichen Dämmstoffe für die EH 40 H<sub>T</sub> 55-Variante dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich das GWP der Dämmstoffalternativen nur geringfügig verändert. Bezogen auf den gesamten Gebäude-Lebenszyklus sind Abweichungen von ca. 1% bis 3% zu erkennen. Aus umwelttechnischer Sicht keine Aussagen darüber getroffen werden, welcher Dämmstoff „besser“ oder „schlechter“ ist. Demzufolge muss für jeden Einzelfall geprüft werden, welcher Dämmstoff für die geforderte Anwendung und Anforderung geeignet ist.

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die Nutzungsphase den größten Einfluss auf das GWP hat, gefolgt von der tragenden Struktur des Gebäudes. Die Dämmstoffe haben nur einen geringen Anteil am GWP über den Gebäude-Lebenszyklus. Daraus lässt sich schließen, dass die Dämmstoffe keinen Einfluss auf die Einhaltung der Grenzwerte für QNG-Plus oder QNG-Premium haben.

## 7 Anhang: Detaillierte Ergebnisse & weiterführende Informationen

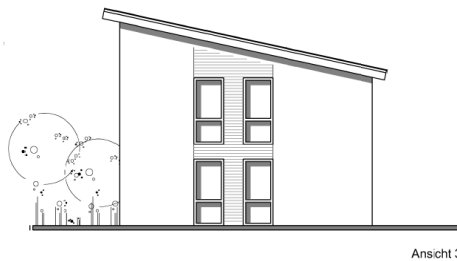
### 7.1 Typengebäude EFH



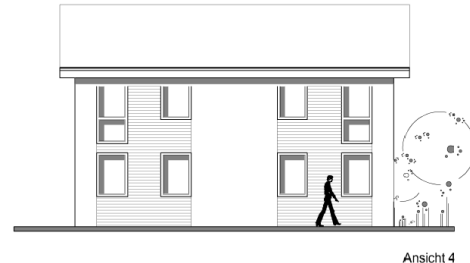
Ansicht 1 Eingang



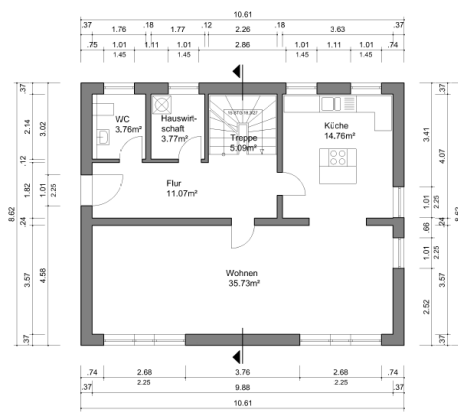
Ansicht 2 Garten



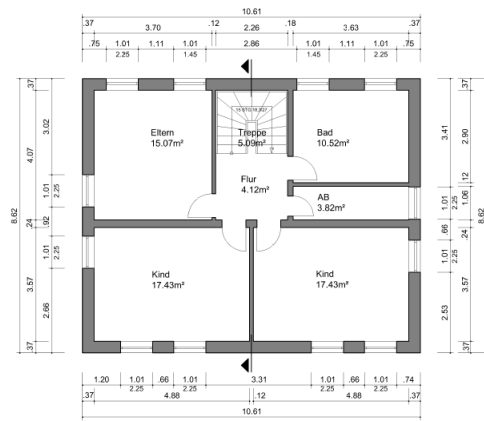
Ansicht 3



Ansicht 4



GR Erdgeschoss

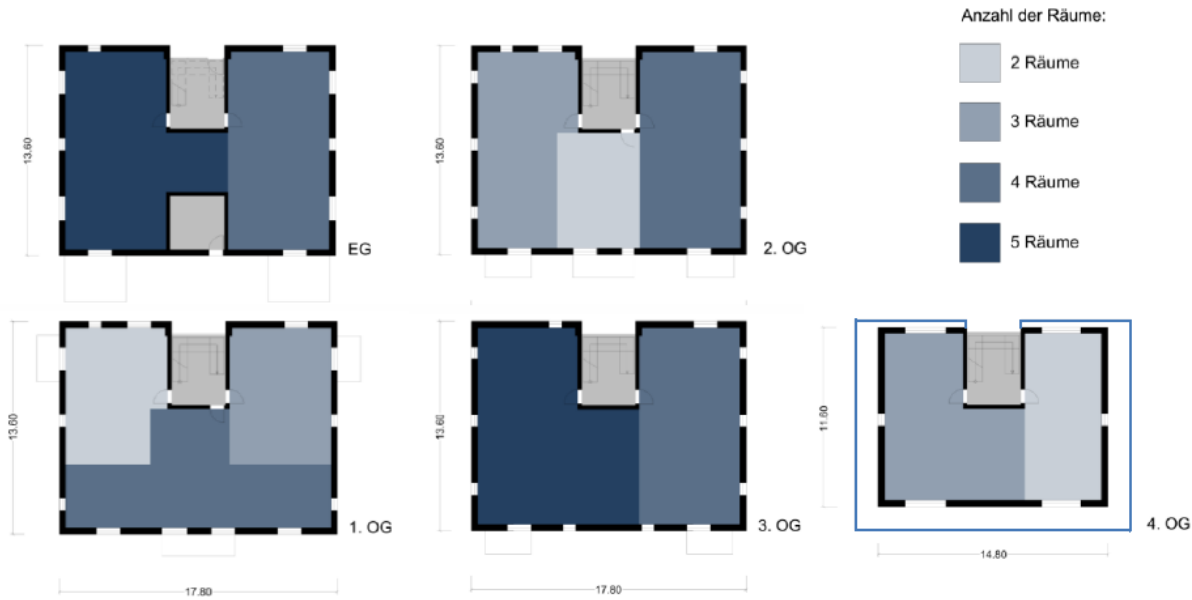
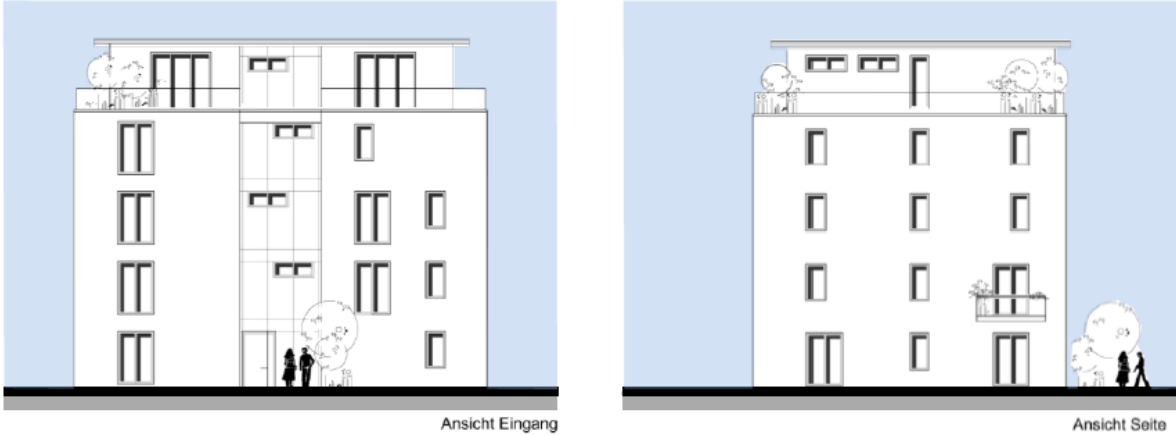


GR Dachgeschoss

(Walberg et al. 2015)



7.2 Typengebäude MFH



(Walberg et al. 2015)

7.3 Ergebnisse EFH, gegliedert nach Materialien – absolute Werte

Treibhausgaspotential (GWP) in CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>\*a

Variante: H<sub>T</sub>-Werte und Q<sub>P</sub> wurden bei jeder Berechnungsvariante an die vorgegebenen Grenzwerte angenähert und optimiert

Werte	GEG 23				EH55 HT'85				EH55 HT'70				EH40 HT'70				EH40 HT'55			
	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF
Farbe, Anstriche	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Putze	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Dämmung Hülle	0,90	0,85	0,98	1,12	0,90	0,74	0,85	0,99	1,35	1,19	1,34	1,45	1,55	1,64	1,83	2,09	1,73	1,91	2,04	2,31
Dämmung sonstige	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Tragende Struktur	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
Holz tragend	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Holz nicht tragend	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Abdichtungen	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Dachbelag	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Estrich	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenster	1,33	1,33	1,33	1,33	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
Anlagentechnik	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83
Nutzerstrom	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63
Nutzung Anlagentechni	4,81	4,90	4,90	4,91	4,24	4,49	4,43	4,47	3,98	3,98	4,01	4,01	3,78	3,77	3,79	3,79	3,56	3,57	3,57	3,57
<b>Summe</b>	<b>18,11</b>	<b>18,16</b>	<b>18,28</b>	<b>18,44</b>	<b>17,68</b>	<b>17,78</b>	<b>17,83</b>	<b>18,01</b>	<b>17,88</b>	<b>17,72</b>	<b>17,90</b>	<b>18,02</b>	<b>17,98</b>	<b>18,06</b>	<b>18,27</b>	<b>18,52</b>	<b>17,94</b>	<b>18,12</b>	<b>18,26</b>	<b>18,53</b>

**Treibhausgaspotential (GWP) in CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>\*a**

Variante: R-Werte der Dämmstoff-Alternativen sind identisch zu den PU-Dämmstoffen, die als Referenzwert dienen

Werte	GEG 23				EH55 HT'85				EH55 HT'70				EH40 HT'70				EH40 HT'55			
	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF
Farbe, Anstriche	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Putze	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Dämmung Hülle	0,90	0,94	1,02	1,11	0,90	0,94	1,02	1,11	1,35	1,21	1,36	1,51	1,55	1,52	1,71	1,92	1,73	1,78	2,03	2,29
Dämmung sonstige	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Tragende Struktur	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
Holz tragend	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Holz nicht tragend	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Abdichtungen	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Dachbelag	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Estrich	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenster	1,33	1,33	1,33	1,33	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
Anlagentechnik	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83
Nutzerstrom	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63
Nutzung Anlagentechnik	4,81	4,81	4,81	4,81	4,24	4,24	4,24	4,24	3,98	3,98	3,98	3,98	3,78	3,78	3,78	3,78	3,56	3,56	3,56	3,56
<b>Summe</b>	<b>18,11</b>	<b>18,15</b>	<b>18,23</b>	<b>18,32</b>	<b>17,68</b>	<b>17,73</b>	<b>17,81</b>	<b>17,89</b>	<b>17,88</b>	<b>17,75</b>	<b>17,90</b>	<b>18,04</b>	<b>17,98</b>	<b>17,95</b>	<b>18,14</b>	<b>18,35</b>	<b>17,94</b>	<b>17,99</b>	<b>18,24</b>	<b>18,50</b>

**Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar (PENRT) in kWh/m<sup>2</sup>\*a**

Variante: H<sub>T</sub>-Werte und Q<sub>P</sub> wurden bei jeder Berechnungsvariante an die vorgegebenen Grenzwerte angenähert und optimiert

Werte	GEG				EH55 HT'85				EH55 HT'70				EH40 HT'70				EH40 HT'55			
	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF
Farbe, Anstriche	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
Putze	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
Dämmung Hülle	3,49	3,25	2,55	5,22	3,49	2,37	2,22	4,62	5,23	4,52	3,49	6,77	6,03	6,25	4,77	9,72	6,71	7,24	5,32	10,78
Dämmung sonstige	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Tragende Struktur	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34
Holz tragend	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Holz nicht tragend	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Abdichtungen	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Dachbelag	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Estrich	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenster	4,42	4,42	4,42	4,42	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91
Anlagentechnik	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11
Nutzerstrom	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81
Nutzung Anlagentechnik	24,71	25,20	25,20	25,27	21,78	23,07	22,80	22,97	20,49	20,46	20,62	20,64	19,43	19,39	19,47	19,47	18,31	18,36	18,36	18,36
<b>Summe</b>	<b>76,69</b>	<b>76,93</b>	<b>76,23</b>	<b>78,97</b>	<b>74,25</b>	<b>74,42</b>	<b>73,99</b>	<b>76,57</b>	<b>74,69</b>	<b>73,96</b>	<b>73,08</b>	<b>76,39</b>	<b>74,63</b>	<b>74,82</b>	<b>73,42</b>	<b>78,37</b>	<b>74,19</b>	<b>74,78</b>	<b>72,86</b>	<b>78,31</b>

**Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar (PENRT) in kWh/m<sup>2</sup>\*a**

Variante: R-Werte der Dämmstoff-Alternativen sind identisch zu den PU-Dämmstoffen, die als Referenzwert dienen

Werte	GEG				EH55 HT'85				EH55 HT'70				EH40 HT'70				EH40 HT'55			
	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF
Farbe, Anstriche	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
Putze	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
Dämmung Hülle	3,49	3,59	2,67	5,16	3,49	3,14	2,67	5,16	5,23	4,63	3,55	7,01	6,03	5,79	4,47	8,94	6,71	6,78	5,31	10,69
Dämmung sonstige	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Tragende Struktur	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34
Holz tragend	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Holz nicht tragend	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Abdichtungen	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Dachbelag	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Estrich	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenster	4,42	4,42	4,42	4,42	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91
Anlagentechnik	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	6,91	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11	7,11
Nutzerstrom	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81	23,81
Nutzung Anlagentechnik	24,71	24,71	24,71	24,71	21,78	21,78	21,78	21,78	20,49	20,49	20,49	20,49	19,43	19,43	19,43	19,43	18,31	18,31	18,31	18,31
<b>Summe</b>	<b>76,69</b>	<b>76,79</b>	<b>75,87</b>	<b>78,35</b>	<b>74,25</b>	<b>73,90</b>	<b>73,43</b>	<b>75,92</b>	<b>74,69</b>	<b>74,09</b>	<b>73,02</b>	<b>76,48</b>	<b>74,63</b>	<b>74,39</b>	<b>73,07</b>	<b>77,55</b>	<b>74,19</b>	<b>74,26</b>	<b>72,79</b>	<b>78,17</b>

7.4 Ergebnisse MFH, gegliedert nach Materialien – absolute Werte

Treibhausgaspotential (GWP) in CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>\*a

Variante: H<sub>T</sub>-Werte und Q<sub>P</sub> wurden bei jeder Berechnungsvariante an die vorgegebenen Grenzwerte angenähert und optimiert

Werte	GEG 23				EH55				EH55				EH40				EH40			
	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF
Farbe	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Putze	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Dämmung Hülle	0,39	0,32	0,40	0,47	0,39	0,32	0,34	0,41	0,49	0,46	0,55	0,63	0,49	0,46	0,55	0,63	0,77	0,72	0,84	0,96
Dämmung sonstige	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Tragende Struktur	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09
Holz tragend	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holz nicht tragend	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Abdichtungen	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Dachbelag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Estrich	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenster	0,86	0,86	0,86	0,86	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Anlagentechnik	1,76	1,75	1,75	1,75	1,80	1,79	1,78	1,78	1,82	1,82	1,82	1,82	1,92	1,92	1,92	1,92	1,96	1,96	1,96	1,96
Nutzerstrom	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
Nutzung Anlagentechn	4,39	4,52	4,47	4,49	3,80	3,94	4,00	4,02	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,08	3,09	3,09	3,10
<b>Summe</b>	<b>17,28</b>	<b>17,33</b>	<b>17,36</b>	<b>17,45</b>	<b>16,82</b>	<b>16,89</b>	<b>16,96</b>	<b>17,05</b>	<b>16,72</b>	<b>16,69</b>	<b>16,78</b>	<b>16,86</b>	<b>16,82</b>	<b>16,79</b>	<b>16,88</b>	<b>16,96</b>	<b>16,65</b>	<b>16,61</b>	<b>16,73</b>	<b>16,85</b>

**Treibhausgaspotential (GWP) in CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>\*a**

Variante: R-Werte der Dämmstoff-Alternativen sind identisch zu den PU-Dämmstoffen, die als Referenzwert dienen

Werte	GEG 23				EH55				EH55				EH40				EH40			
	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF
Farbe	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Putze	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Dämmung Hülle	0,39	0,38	0,42	0,46	0,39	0,38	0,42	0,46	0,49	0,47	0,53	0,59	0,49	0,47	0,53	0,59	0,77	0,71	0,82	0,94
Dämmung sonstige	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Tragende Struktur	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09
Holz tragend	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holz nicht tragend	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Abdichtungen	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Dachbelag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Estrich	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenster	0,86	0,86	0,86	0,86	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Anlagentechnik	1,76	1,76	1,76	1,76	1,80	1,80	1,80	1,80	1,82	1,82	1,82	1,82	1,92	1,92	1,92	1,92	1,96	1,96	1,96	1,96
Nutzerstrom	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
Nutzung Anlagentechn	4,39	4,39	4,39	4,39	3,80	3,80	3,80	3,80	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,08	3,08	3,08	3,08
<b>Summe</b>	<b>17,28</b>	<b>17,27</b>	<b>17,31</b>	<b>17,35</b>	<b>16,82</b>	<b>16,81</b>	<b>16,86</b>	<b>16,90</b>	<b>16,72</b>	<b>16,70</b>	<b>16,76</b>	<b>16,82</b>	<b>16,82</b>	<b>16,80</b>	<b>16,86</b>	<b>16,92</b>	<b>16,65</b>	<b>16,58</b>	<b>16,69</b>	<b>16,82</b>

**Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar (PENRT) in kWh/m<sup>2</sup>\*a**

Variante: H<sub>T</sub>-Werte und Q<sub>P</sub> wurden bei jeder Berechnungsvariante an die vorgegebenen Grenzwerte angenähert und optimiert

Werte	GEG 23				EH55				EH55				EH40				EH40			
	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF
Farbe, Anstriche	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58
Putze	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Dämmung Hülle	1,51	1,07	1,03	2,20	1,51	1,22	0,89	1,91	1,90	1,75	1,45	2,95	1,90	1,75	1,45	2,95	3,00	2,74	2,20	4,47
Dämmung sonstige	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Tragende Struktur	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79
Holz tragend	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holz nicht tragend	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Abdichtungen	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Dachbelag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Estrich	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenster	2,86	2,86	2,86	2,86	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17
Anlagentechnik	6,60	6,57	6,58	6,58	6,74	6,70	6,68	6,68	6,81	6,81	6,81	6,81	7,01	7,01	7,01	7,01	7,17	7,17	7,17	7,17
Nutzungsphase	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05
Nutzung Anlagentechn	22,58	23,25	22,99	23,08	19,56	20,27	20,59	20,69	18,40	18,40	18,39	18,40	18,40	18,40	18,39	18,40	15,82	15,87	15,90	15,93
<b>Summe</b>	<b>74,04</b>	<b>74,24</b>	<b>73,96</b>	<b>75,21</b>	<b>71,48</b>	<b>71,87</b>	<b>71,84</b>	<b>72,95</b>	<b>70,78</b>	<b>70,63</b>	<b>70,31</b>	<b>71,82</b>	<b>70,98</b>	<b>70,83</b>	<b>70,51</b>	<b>72,02</b>	<b>69,66</b>	<b>69,45</b>	<b>68,94</b>	<b>71,23</b>



**Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar (PENRT) in kWh/m<sup>2</sup>\*a**

Variante: R-Werte der Dämmstoff-Alternativen sind identisch zu den PU-Dämmstoffen, die als Referenzwert dienen

Werte	GEG 23				EH55				EH55				EH40				EH40			
	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF	PU	EPS	MW	HolzF
Farbe, Anstriche	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58
Putze	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Dämmung Hülle	1,51	1,21	1,10	2,14	1,51	1,44	1,10	2,14	1,90	1,78	1,39	2,75	1,90	1,78	1,39	2,75	3,00	2,68	2,14	4,40
Dämmung sonstige	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Tragende Struktur	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79
Holz tragend	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holz nicht tragend	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Abdichtungen	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Dachbelag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Estrich	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fenster	2,86	2,86	2,86	2,86	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17	3,17
Anlagentechnik	6,60	6,60	6,60	6,60	6,74	6,74	6,74	6,74	6,81	6,81	6,81	6,81	7,01	7,01	7,01	7,01	7,17	7,17	7,17	7,17
Nutzungsphase	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05	27,05
Nutzung Anlagentechn	22,58	22,58	22,58	22,58	19,56	19,56	19,56	19,56	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	15,82	15,82	15,82	15,82
<b>Summe</b>	<b>74,04</b>	<b>73,74</b>	<b>73,63</b>	<b>74,67</b>	<b>71,48</b>	<b>71,41</b>	<b>71,07</b>	<b>72,11</b>	<b>70,78</b>	<b>70,66</b>	<b>70,27</b>	<b>71,63</b>	<b>70,98</b>	<b>70,86</b>	<b>70,47</b>	<b>71,83</b>	<b>69,66</b>	<b>69,34</b>	<b>68,80</b>	<b>71,06</b>

## 7.5 Ergebnisse Lagerhalle, gegliedert nach Materialien – absolute Werte

### Treibhausgaspotential (GWP) in CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>\*a

Variante: H<sub>T</sub>-Werte und Q<sub>P</sub> wurden bei jeder Berechnungsvariante an die vorgegebenen Grenzwerte angenähert und optimiert

Werte	GEG 23		EH55		EH40	
	PU	MW	PU	MW	PU	MW
Dämmung Hülle	0,41	0,48	0,81	0,80	1,02	0,91
Dämmung sonstige	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Tragender Stahlleichtb	1,67	1,90	1,67	1,90	1,67	1,90
Abdichtungen	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Estrich	0,48	0,38	0,48	0,38	0,48	0,38
Fenster & Türen	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47
Anlagentechnik	4,21	4,26	4,61	4,63	4,74	4,73
Nutzerstrom	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Nutzung Anlagentechn	10,45	9,94	6,93	6,84	6,04	6,06
Summe	20,67	20,42	17,97	18,01	17,41	17,44

### Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar (PENRT) in kWh/m<sup>2</sup>\*a

Variante: H<sub>T</sub>-Werte und Q<sub>P</sub> wurden bei jeder Berechnungsvariante an die vorgegebenen Grenzwerte angenähert und optimiert

Werte	GEG 23		EH55		EH40	
	PU	MW	PU	MW	PU	MW
Dämmung Hülle	1,53	1,53	3,06	2,48	3,83	2,59
Dämmung sonstige	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
Tragender Stahlleichtb	2,92	3,34	2,92	2,57	2,92	2,57
Abdichtungen	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Estrich	0,95	0,76	0,95	0,76	0,95	0,76
Fenster & Türen	5,27	5,27	5,27	5,27	5,27	5,27
Anlagentechnik	14,58	14,77	16,05	16,09	16,50	16,47
Nutzerstrom	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86
Nutzung Anlagentechn	53,73	51,12	35,64	35,18	31,04	31,14
Summe	88,72	86,53	73,63	72,10	70,24	68,55

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auflistung der in der Studie betrachteten Energiestandards, die Angaben des Primärenergiebedarfs sowie des Transmissionswärmeverlustes beziehen sich auf das im GEG definierte Referenzgebäude	6
Tabelle 2:	Gebäudekennwerte Typengebäude EFH	10
Tabelle 3:	Darstellung des Endenergiebedarfs in kWh pro Quadratmeter beheizter Fläche gegliedert nach dem GEG bzw. den Effizienzhausstandards sowie Dämmvariante für das EFH	13
Tabelle 4:	Gegenüberstellung der Eingabeparameter EFH: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards	14
Tabelle 5:	Gegenüberstellung der Eingabeparameter EFH: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards; gerundet auf ganze Millimeter, identische $H'_T$ -Werte, Referenz PU)	15
Tabelle 6:	Gebäudekennwerte Typengebäude MFH	16
Tabelle 7:	Darstellung des Endenergiebedarf und des PV-Deckungsgrad in Abhängigkeit vom Energieeffizienzstandard. Der PV-Deckungsgrad ergibt sich aus den jeweiligen $H'_T$ -Werten der Dämmstoff-Varianten und Effizienzhausstandard für das MFH	18
Tabelle 8:	Gegenüberstellung der Eingabeparameter MFH: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards	19
Tabelle 9:	Gegenüberstellung der Eingabeparameter MFH: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards; gerundet auf ganze Millimeter, identische $H'_T$ -Werte, Referenz PU)	20
Tabelle 10:	Gebäudekennwerte Typengebäude Lagerhalle	21
Tabelle 11:	Darstellung des Endenergiebedarf und des PV-Deckungsgrad in Abhängigkeit vom Energieeffizienzstandard. Der PV-Deckungsgrad ergibt sich aus den jeweiligen $H'_T$ -Werten der Dämmstoff-Varianten und Effizienzhausstandard für die Lagerhalle	24
Tabelle 12:	Gegenüberstellung der Eingabeparameter Lagerhalle: Eingabeparameter für die Dämmstärken der betrachtenden Dämmstoffarten für die GEG-Anforderungen bzw. die unterschiedlichen Energiestandards	24
Tabelle 13:	Übersicht zur Einhaltung der Grenzwerte der berechnen Varianten - EFH	35
Tabelle 14:	Übersicht zur Einhaltung der Grenzwerte der berechnen Varianten - MFH	41
		67

Tabelle 15	Berechnete Nutzflächen für PU und HolzF bei fixierten Gebäude-Außenmaßen	42
Tabelle 16	Darstellung der U-Werte des Altbaustandards nach WSchV82	45
Tabelle 17	Eingabedaten des Altbaustandards nach WSchV82 für die Berechnungen der Ökobilanz	45
Tabelle 18	QNG-Grenzwerte für Nicht-Wohngebäude berechnet nach Anhang 3.2.1.2 zur Anlage 3; mit Einschätzung, ob die Grenzwerte eingehalten werden können	50

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schichtenaufbau Außenwand EFH mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) von innen (rechts) nach außen (links) (IVPU 2023d)	11
Abbildung 2: Schichtenaufbau Pultdach EFH mit Aufsparrendämmung von außen nach innen (IVPU 2023c)	11
Abbildung 3: Schichtenaufbau Kellerdecke EFH als thermischer Gebäudeabschluss nach unten mit Schichtenfolge von innen nach außen (IVPU 2023a)	12
Abbildung 4: Schichtenaufbau Flachdach MFH mit Stahlbeton-Tragkonstruktion von außen nach innen (IVPU 2023b)	16
Abbildung 5: Typenhalle mit gewählten Abmessungen (Kuhnhenne et al. 2010)	21
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Außenwandaufbaus der Lagerhalle mit Sandwichelementen (ZUB Systems GmbH 2019)	22
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Dachaufbaus des Trapezblechdaches Lagerhalle; von Raumseite zu Außenseite (ZUB Systems GmbH 2019)	22
Abbildung 8 Schematische Darstellung des Fußbodenaufbaus der Bodenplatte Lagerhalle (ZUB Systems GmbH 2019)	23
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Untersuchungsrahmens anhand der Phasen des Gebäude-Lebenszyklus nach (DIN EN 15804:2020-03)	26
Abbildung 10: Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das EFH optimiert nach $H'_T$ anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO <sub>2</sub> -Äq. pro m <sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser	30
Abbildung 11: Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das EFH mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO <sub>2</sub> -Äq. pro m <sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser	31
Abbildung 12: Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar für das EFH optimiert nach $H'_T$ anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO <sub>2</sub> -Äq. pro m <sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser	32
Abbildung 13: Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar für das EFH mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO <sub>2</sub> -Äq. pro m <sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser	34
Abbildung 14: Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das MFH optimiert nach $H'_T$ anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der	

Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser 36

Abbildung 15: Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das MFH mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser 38

Abbildung 16: Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar für das MFH optimiert nach H'<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser 39

Abbildung 17: Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar für das MFH mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser 40

Abbildung 18 Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP), für das MFH mit identischen Gebäude-Außenmaßen und optimiert nach H'<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, HolzF = Holzfaser 43

Abbildung 19 Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar (PENRT), für das MFH mit identischen Gebäude-Außenmaßen und optimiert nach H'<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, HolzF = Holzfaser 44

Abbildung 20 Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das MFH, Vergleich des Altbaustandard (WSchV82) mit dem GEG 23 und dem EH 40 H'T55 Standard gegliedert nach Material-gruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr 46

Abbildung 21 Darstellung des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar (PENRT) für das MFH, Vergleich des Altbaustandard (WSchV82) mit dem GEG 23 und dem EH 40 H'T55 Standard gegliedert nach Material-gruppen, angegeben in kWh pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr 47

Abbildung 22 Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das Lagerhalle optimiert nach H'<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, MW = Steinwolle 48

Abbildung 23 Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das Lagerhalle mit identischen R-Werten anhand der unterschiedlichen Energiestandards sowie der Dämmstoffarten gegliedert nach Materialgruppen, angegeben

in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, MW = Steinwolle

49

Abbildung 24: Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das EFH optimiert nach H<sub>T</sub> anhand der unterschiedlichen Energiestandards für Polyurethan-Dämmung; gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr

54

Abbildung 25: Darstellung des Treibhausgaspotential (GWP) für das EFH optimiert nach H<sub>T</sub> für den Energiestandard EH40 sowie für die Dämmstoffalternativen; gegliedert nach Materialgruppen, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr; PU = Polyurethan, EPS = expandiertes Polystyrol, MW = Steinwolle, HolzF = Holzfaser

55

## 10 Literaturverzeichnis

- Bundesministerium für Bauwesen und Raumordnung (BBSR) (Hg.) (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB).
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (Hg.) (2023a): Anhang 3.1.1 zur ANLAGE 3. Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude. 1.2. Aufl.
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (Hg.) (2023b): Anhang 3.2.1.1 zur ANLAGE 3. Bilanzierungsregeln des QNG für Nichtwohngebäude. 1.3. Aufl.
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (Hg.) (2023c): Anhang 3.2.1.2 zur ANLAGE 3. Regeln zur Bestimmung des Anforderungswertes für QNG Nichtwohngebäude. 1.3. Aufl.
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (Hg.) (2023d): Anlage 1. Siegelvarianten. Verzeichnis der Gebäude- und Nutzungsarten. 1.3. Aufl.
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (Hg.) (2023e): Anlage 3. Gebäudeanforderungen. Besondere Anforderungen im öffentlichen Interesse an den Beitrag von Gebäuden zur Nachhaltigen Entwicklung. 1.3. Aufl.
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (Hg.) (2023f): Handbuch. Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude. 1.2. Aufl. Berlin.
- DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG (ROCKWOOL) (2018a): ROCKWOOL Steinwolle-Dämmstoff im hohen Rohdichtebereich. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). ÖKOBAUDAT. Dataset.
- DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG (ROCKWOOL) (2018b): ROCKWOOL Steinwolle-Dämmstoff im mittleren Rohdichtebereich. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). ÖKOBAUDAT. Dataset.
- Deutscher Bundestag (BT) (1982): Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden - Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzV), WärmeschutzV, vom 24.02.1982. In: Bundesgesetzblatt Teil I (BGBl. I).
- Deutscher Bundestag (BT) (2022): Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728), das durch Artikel 18a des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist. GEG.
- DIN EN ISO 14040:2021-02, 2021: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006 + A1:2020).
- DIN EN ISO 14044:2021-02, 2021: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020).
- Industrieverband Hartschaum e.V. (IVH) (2022a): EPS-Hartschaum - grau mit niedriger Rohdichte vorzugsweise für WDVS und Innendämmung. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). UMWELT-PRODUKTDEKLARATION.



- Industrieverband Hartschaum e.V. (IVH) (2022b): EPS-Hartschaum - weiß mit hoher Rohdichte vorzugsweise für Perimeter und Sockeldämmung, sehr hohe Druckbelastbarkeit. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). UMWELT-PRODUKTDEKLARATION.
- Industrieverband Polyurethan-Hartschaum (IVPU) (2016): PU-Dämmplatten aus Blockschaumstoff. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). ÖKOBAUDAT. Dataset.
- Industrieverband Polyurethan-Hartschaum (IVPU) (2021a): PU-Dämmplatten mit 50 µm Aluminium-Deckschicht. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). ÖKOBAUDAT. Dataset.
- Industrieverband Polyurethan-Hartschaum (IVPU) (2021b): PU-Dämmplatten mit Aluminium-Mehrlagen-Deckschicht. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). ÖKOBAUDAT. Dataset.
- Industrieverband Polyurethan-Hartschaum (IVPU) (Hg.) (2023a): Dachboden, Fußboden und Kellerdecke. PU-Fußbodendämmung unter schwimmenden Estrich. Online verfügbar unter <https://daemmt-besser.de/daemmlösungen/dachboden-fussboden-und-kellerdecke>, zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- Industrieverband Polyurethan-Hartschaum (IVPU) (Hg.) (2023b): Flachdach. Flachdachneubau in massiver Konstruktion. Online verfügbar unter <https://daemmt-besser.de/daemmlösungen/flachdach>, zuletzt geprüft am 16.01.2023.
- Industrieverband Polyurethan-Hartschaum (IVPU) (Hg.) (2023c): Steildach. PU-Steildachdämmsysteme für den Neubau. Online verfügbar unter <https://daemmt-besser.de/daemmlösungen/steildach>, zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- Industrieverband Polyurethan-Hartschaum (IVPU) (Hg.) (2023d): Wand. PU im Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS). Online verfügbar unter <https://daemmt-besser.de/daemmlösungen/wand>, zuletzt geprüft am 11,01.2023.
- KfW (Hg.) (2023): Die Effizienzhaus-Stufen für bestehende Immobilien und Baudenkmale. Online verfügbar unter <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestehende-Immobilie/Energieeffizient-sanieren/Das-Effizienzhaus/>, zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- Kocker, Roland; Müller, R. (2016): Typenhallen aus Stahl - Musterstatik. überarbeitete Ausgabe Nr. B 501. Hg. v. Bauforumstahl e.V. Düsseldorf.
- Kuhnhenne, Markus; Döring, Bernd; Pyschny, Dominik (2010): Ökobilanzierung von Typenhallen. Aachen.
- DIN EN 15978:2012-10, 2012-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode (EN 15978:2011).
- DIN EN 15804:2020-03, 2020: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklaration - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte (EN 15804:2012 + A2:2019).
- Pehnt, Martin; Lempik, Julia; Mellwig, Peter; Maas, Anton; Schlitzberger, Stephan; Höttges, Kirsten et al. (2022): Kurzgutachten zur Überarbeitung von Anforderungssystemen und Standards im Gebäudeenergiegesetz für Neubauten sowie Bestandsgebäude einschl. der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für Neubauten und Bestandsgebäude. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi). Heidelberg, Berlin, Dresden.

PPA-Europe (2018a): Double skin steel faced sandwich panels with a core made of mineral wool. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). ÖKOBAUDAT. Dataset.

PPA-Europe (2018b): Double skin steel faced sandwich panels with a core made of polyurethane. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). ÖKOBAUDAT. Dataset.

STEICO SE (2020): STEICO Holzfaserdämmplatten aus dem Trockenverfahren. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). ÖKOBAUDAT. Dataset.

thinkstep (2018): Strom Mix 2015 (de). Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). ÖKOBAUDAT. Dataset.

Walberg, Dietmar; Brosius, Oliver; Schulze, Thorsten; Cramer, Antje (2015): Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden. Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE eV). Kiel.

ZUB Systems GmbH (2019): ZUB Helena. Online verfügbar unter <https://www.zub-systems.de/de/produkte/helena>, zuletzt geprüft am 11.01.2023.

Im Auftrag von:

IVPU- Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V.  
Heilbronner Straße 154,  
70919 Stuttgart



**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](mailto:info@fiw-muenchen.de) | [www.fiw-muenchen.de](http://www.fiw-muenchen.de)  
Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm