

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/
Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Tech-
nischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.

<http://www.ub.tuwien.ac.at>



The approved original version of this diploma or
master thesis is available at the main library of the
Vienna University of Technology.

<http://www.ub.tuwien.ac.at/eng>

DIplomARBEIT Master Thesis

Vergleichende Energiebilanz dreier Außenwandaufbauten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

(Betreuer) Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Helmut Rechberger

E226

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement
und Abfallwirtschaft

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

(Verfasser) Hanno Töll

0626046

Angerweg 14

39042 Brixen

Wien, am 26.06.2013

eigenhändige Unterschrift

KURZFASSUNG

Gegenstand dieser Arbeit ist die energetische Bilanzierung von je 1 m² Außenwand unterschiedlicher Konstruktionsart. So wird eine Energiebilanz erstellt, die den Primärenergieverbrauch im Laufe des Lebenszyklus von Betonbauweise (kerngedämmte Doppelwand), Holzbauweise (Holzrahmenbau) sowie Ziegelbauweise (Mauerwerk aus Hochlochziegeln) über eine Lebensdauer von 50 Jahren ermittelt. Dabei werden die Herstellung inklusive der erforderlichen Vorketten, Transport, sowie die Entsorgungsphase mit einem etwaigen Abbruch und anschließender Verwertung berücksichtigt. Die Eingangsdaten werden in Zusammenarbeit mit Herstellern erhalten bzw. durch Literaturrecherchen ergänzt, sodass unter Zuhilfenahme von geeigneten Datenbanken die energetische Bilanzierung, aufgeschlüsselt in erneuerbare und nicht erneuerbare Anteile, erfolgen kann.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen auf, dass die Betonbauweise in Summe den geringsten Energiebedarf aufweist aber die Holzbauweise den höchsten Anteil an erneuerbarer Primärenergie enthält. Herstellungsbedingt wird der größte Teil der Primärenergie bei allen drei Bauweisen während der Produktionsphase benötigt, wobei sich zementgebundene Ausgangsstoffe als besonders energieintensiv erweisen. Der Anteil aus Transporten hingegen ist gering.

ABSTRACT

This Master's thesis compares the energy balance of 1 m² of exterior walls constructed out of three different materials. Based on a 50-year life cycle, the primary energy consumption of a concrete structure (insulated double wall), a wooden structure (light-frame construction) and a brick stone wall (construction of vertical coring bricks) is, respectively, determined. The thesis analyzes the cradle-to-grave life cycle focusing on supply, processing, transport and the end-of-life phase including demolition and recovery if possible. The input data is collected in collaboration with construction companies and complemented with a literature research. Using appropriate databases a primary energy balance considering renewable and non-renewable energy is elaborated.

The results show that the concrete structure exhibits the lowest overall energy consumption, while the wooden structure displays the highest level of renewable energy. For all three structures the largest part of primary energy is consumed during the material processing phase, especially if exterior wall constructions contain cementitious base materials. The energy level consumed during transport, on the other hand, is quite low for all types.

INHALT

KURZFASSUNG	2
ABSTRACT	3
INHALT	4
VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN	7
1. EINLEITUNG	8
<hr/>	
1.1. MOTIVATION	8
1.2. AUFBAU UND ZIELSETZUNG	9
1.3. LEBENSZYKLUSANALYSE UND ENERGIEBILANZ	10
1.3.1. BEGRIFFSDEFINITION LCA	10
1.3.2. HISTORISCHE ENTSTEHUNG LCA	11
1.3.3. LCA IM BAUGEWERBE	11
1.3.4. ENERGIEBILANZ	12
2. WANDAUFBAUTEN	14
<hr/>	
2.1. AUSWAHL DER WANDAUFBAUTEN	14
2.2. BETONBAUWEISE IN PROGRESS THERMOWAND®	15
2.3. HOLZBAUWEISE ALS HOLZRAHMENBAU	17
2.4. ZIEGELMAUERWERK	19
2.5. FUNKTIONELLE EIGENSCHAFTEN	21
2.6. BAUPHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN	22
2.6.1. ERMITTLUNG DER WÄRMEDÄMMLEISTUNG	22
2.6.2. BERECHNUNG DER SPEICHERWIRKSAMEN MASSE	23
2.6.3. BERECHNUNG DES BAUSCHALLDÄMMMAßES R'_w	25
2.7. STATISCHE UND KONSTRUKTIVE KENNGRÖßEN	26
2.7.1. WANDSTÄRKEN	26
2.7.2. ERMITTLUNG DER TRAGFÄHIGKEIT	26
2.7.3. ERMITTLUNG DES FEUERWIDERSTANDES	27
2.8. ANDERE BAUSPEZIFISCHE ANGABEN	28
2.8.1. UNTERHALTUNGSaufWAND	28
2.8.2. ÜBERPRÜFUNG DER NUTZUNGSDAUER	28
2.8.3. ÜBERPRÜFUNG DER OPTISCHEN EIGENSCHAFTEN	29
2.8.4. KOSTEN	29
2.9. ZUSAMMENFASSUNG BAUTEILEIGENSCHAFTEN	30
3. SACHBILANZ	31
<hr/>	
3.1. SYSTEMGRENZEN	31
3.2. DAUER DES LEBENSZYKLUS	32
3.2.1. LEBENSDAUER VON BAUWERKEN UND BAULICHEN ANLAGEN	32
3.2.2. NUTZUNGSDAUER DER EINZELNEN BAUTEILSCHICHTEN	33

3.3. PROGRESS THERMOWAND®	34
3.3.1. MATERIALINPUT	34
3.3.2. OUTPUT	40
3.3.3. VERNACHLÄSSIGTE FLÜSSE	40
3.4. HOLZRAHMENBAU	41
3.4.1. MATERIALINPUT	41
3.4.2. OUTPUT	45
3.4.3. VERNACHLÄSSIGTE FLÜSSE	45
3.5. ZIEGELMAUERWERK	46
3.5.1. MATERIALINPUT	46
3.5.2. OUTPUT	48
3.5.3. VERNACHLÄSSIGTE FLÜSSE	48
4. ENERGIEBILANZ	49
<hr/>	
4.1. BEGRIFFSDEFINITIONEN	49
4.1.1. GENERISCHE DATEN	49
4.1.2. KEV UND KEA	49
4.1.3. PEI	50
4.2. ABGRENZUNG DER VERWENDETEN GENERISCHEN DATEN	50
4.2.1. INHALTLICHE KONSISTENZ	50
4.2.2. RÄUMLICHE KONSISTENZ	51
4.2.3. ZEITLICHE KONSISTENZ (ALTER DES DATENMATERIALS)	51
4.2.4. ÜBEREINSTIMMUNG DES RECYCLINGANTEILS	51
4.3. VERWENDETE DATENBANKEN	51
4.3.1. GRAUE ENERGIE VON BAUSTOFFEN [I]	51
4.3.2. BATH INVENTORY OF CARBON AND ENERGY (ICE) [II]	52
4.3.3. ÖKOBAU.DAT [III]	52
4.3.4. PROBAS –PROZESSORIENTIERTE BASISDATEN FÜR UMWELTMANAGEMENT-INSTRUMENTE [IV]	53
4.3.5. HOMEPAGE BAUUMWELT.DE [V]	53
4.3.6. BILAN PRODUIT [VI]	53
4.3.7. HOMEPAGE DATAHOLZ.COM [VII]	54
4.3.8. BAUBOOK [VIII]	54
4.4. METHODISCHE VORGANGSWEISE	54
4.5. EXKURS ZUR VERWENDUNG VON GENERISCHEN DATEN	55
5. ERGEBNISSE	57
<hr/>	
5.1. BEGRIFFSDEFINITIONEN	57
5.1.1. M.P.N.E	57
5.1.2. M.P.E	57
5.1.3. M.P.N.E+ M.P.E	57
5.2. AUSWERTUNG PRODUKTIONSSTADIUM	58
5.3. AUSWERTUNG ENTSORGUNGSSTADIUM	61
5.4. AUSWERTUNG GESAMTER LEBENSZYKLUS	64

5.5. AUSWERTUNG NACH MATERIALIEN	68
5.5.1. PROGRESS THERMOWAND®	68
5.5.2. HOLZRAHMENBAU	70
5.5.3. ZIEGELMAUERWERK	71
6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	72
6.1. PLAUSIBILITÄTSBETRACHTUNGEN ZU DEN ANNAHMEN	72
6.1.1. TRANSPORTE	72
6.1.2. NUTZUNGSDAUER	72
6.1.3. ENTSORGUNG	73
6.1.4. NIEDRIGER GESAMTENERGIEBEDARF ODER HOHER ANTEIL AN ERNEUERBARER ENERGIE?	73
6.2. ZUSAMMENFASSUNG	74
6.3. AUSBLICK	76
7. QUELLVERZEICHNIS	77
8. VERZEICHNIS DER VERWENDETEN DATENBANKEN	79
9. ABBILDUNGSERZEICHNIS	80
10. LIEFERANTENVERZEICHNIS	81
11. ANHANG	83
Ü. STOFFFLUSSDIAGRAMME	83
T. TABELLEN PROGRESS THERMOWAND®	83
H. TABELLEN HOLZRAHMENBAUWEISE	83
Z. TABELLEN ZIEGELMAUERWERK	83

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

A.	Andere Energie (Anteil der nicht erneuerbaren Energie), s. Anhang T., H. und Z.
A.E.	Abweichung zum Mittelwert der erneuerbaren Primärenergie, s. Anhang T., H. und Z.
A.N.E.	Abweichung zum Mittelwert der nicht erneuerbaren Primärenergie, s. Anhang T., H. und Z.
A.T.	Abweichung zum Mittelwert des gesamten Primärenergie, s. Anhang T.,H. und Z.
BE	Bezugseinheit, s. Anhang T., H. und Z.
BHKW	Blockheizkraftwerk
E.	Erneuerbar, s. Anhang T., H. und Z.
EPD	Environmental Product Declaration
EPS	Expandiertes Polystyrol (Dämmmaterial)
HR	Holzrahmenbau, s. Seite 17
KEA	Kumulierter Energieaufwand, s. Seite 49
KEV	Kumulierter Energieverbrauch, s. Seite 49
LCA	Lebenszyklusanalyse bzw. Ökobilanz, s. Seite 10
M.P.E	Mittelwert Produkt erneuerbar, s. Seite 57
M.P.N.E	Mittelwert Produkt nicht erneuerbar, s. Seite 57
M.P.N.E+ M.P.E	Mittelwert des gesamten Energiegehalts, s. Seite 57
M.	Mittelwert, s. Anhang T., H. und Z.
N.E.	Nicht erneuerbar, s. Anhang T., H. und Z.
P.	Produkt, s. Anhang T., H. und Z.
PCR	Product Category Rule (Produktgruppenregeln) s. Seite 34
PEI	Primärenergieinhalt, s. Seite 50
PTW	PROGRESS Thermowand®, s. Seite 15
PUR	Polyurethan (Dämmmaterial)
S.	Sekundärenergie (Anteil der nicht erneuerbaren Energie), s. Anhang T., H. und Z.
T.	Total (Summe aus nicht erneuerbarer und erneuerbarer Energie), s. Anhang T., H. und Z.
ZM	Ziegelmauerwerk, s. Seite 19

1. EINLEITUNG

1.1. Motivation

Ein erheblicher Teil aller heute weltweit auftretenden Umweltbelastungen ist mit dem Thema Energie verknüpft, vergleiche dazu auch den Umweltforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [1]. Die Gründe hierfür liegen einerseits darin, dass die derzeitige Energienutzung hauptsächlich auf fossilen Energieträgern beruht, aber auch im nicht nachhaltigen weil wenig sparsamen Umgang mit Energie in all seine Formen.

Um die Umweltbelastungen zu reduzieren will auch die Europäische Union den nachhaltigen Umgang fördern. Darum hat die EU bereits im Jahr 2007 eine Vereinbarung über wichtige Energiezielsetzungen getroffen. Die Kernziele – besser bekannt als 20-20-20-Ziele, umfassen laut europäischer Union [2] die Senkung der Treibhausgasemissionen um 20% mit Basis zum Jahr 1990, die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch auf 20% und schließlich die Senkung des Energieverbrauchs um 20% aller Mitgliedsstaaten (im Vergleich zu den Prognosen für 2020). Im Hinblick auf die ersten beiden Ziele kommt die EU laut eigenen Aussagen *„gut voran, mit den Energieeinsparungen tut sie sich aber noch schwer. Daher will die Kommission die Anstrengungen verstärken.“*[1]

Diesbezüglich kann behauptet werden, dass der steigende Energiebedarf – allen voran der Verbrauch von viel nicht erneuerbarer Primärenergie – einen erheblichen Einfluss auf die Zielsetzungen der EU hat.

Ein Großteil dieses Energiebedarfs wird für die Herstellung von Produkten aufgewendet. Allein der Anteil des Sektors Industrie am Gesamtenergieverbrauch lag im Jahr 2011 laut Eurostat [3] bei 26%. Ganz speziell dem Bauwesen kommt dabei ein besonderer Stellenwert zu, weil beginnend mit der Ressourcenentnahme zur Herstellung von Baumaterialien über die Errichtung von Bauwerken bis zur Nutzungsphase und weiter bis zum Abbruch allein schon 70% aller in Deutschland auftretenden Stoffflussströme entstehen, wie Graubner und Hüske in [4] ausführen. Demzufolge ist im Bereich Bauwesen ein entsprechend großes Einsparungspotential vorhanden, was auch die Europäische Union als Ansatz aufgegriffen hat. In der ab 1. Juli 2013 gültigen Bauproduktenverordnung (CPR), die die bisher gültige Bauproduktenrichtlinie (CPD) ablöst, wird erstmals das siebte Kriterium *„sustainable use of natural resources“* aufgenommen. Dieses Kriterium fordert, dass *„das Bauwerk derart entworfen, errichtet und abgerissen werden muss, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden und insbesondere Folgendes gewährleistet ist:*

- *Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können*
- *das Bauwerk muss dauerhaft sein*

- *für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden.“[6]*

Damit wird die Nachhaltigkeit von Bauprodukten neben einem Wettbewerbsfähigkeitsfaktor erstmals auch zu einer grundsätzlichen gesetzlich verankerten Anforderung. Diese Basisanforderung soll helfen, weitere Handelshemmnisse innerhalb der Europäischen Union durch Vereinheitlichung der Grundvoraussetzungen abzubauen, was zwangsläufig die Notwendigkeit von einheitlichen Nachweisen zur Nachhaltigkeitsbewertung erforderlich macht.

1.2. Aufbau und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, drei Außenwandaufbauten hinsichtlich eines wesentlichen Aspekts der Nachhaltigkeit zu untersuchen. Weil das Thema Nachhaltigkeit unauflöslich mit dem Thema Energie verknüpft ist – vgl. dazu auch [7], Seite 1 – stellt die Betrachtung des Energiebedarfs im Laufe des Lebenszyklus der Außenwandaufbauten ein wichtiges Kriterium dar.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit soll eine kerngedämmte Doppelwand in Betonbauweise sein. Durch eine Zusammenarbeit mit dem Unternehmen PROGRESS¹ ergab sich das Interesse, diesen speziellen Wandaufbau zu untersuchen. Als Vergleich dazu wird auch eine Außenwand im Holzrahmenbau sowie eine Außenwand aus Ziegelmauerwerk untersucht.

Die drei Außenwände werden in ihre Ausgangsbaustoffe zerlegt, sodass für jedes einzelne dieser Materialien der Energiebedarf ermittelt werden kann, der zur Herstellung, zum Transport und in der Entsorgungsphase anfällt. Der methodische Hintergrund dieser Arbeit ist eine Energiebilanz, die analog zu einer Ökobilanz, auch Lebenszyklusanalyse genannt, durchgeführt wird.

Vorerst erfolgt die energetische Betrachtung im Abschnitt der Produktionsphase. Anschließend erfolgt eine Erweiterung der Energiebilanz durch Miteinbeziehung der Einflüsse, die in der Entsorgungsphase entstehen. Dazu wird die Nutzungsdauer der Wandkonstruktionen ermittelt und die Summe des aufgewendeten Energiebedarfs bestimmt, der sich im Lebenszyklus ergibt. Unter der Voraussetzung, dass die drei Außenwände dieselben Anforderungen hinsichtlich Instandhaltungsaufwand und Wärmedämmleistung erfüllen, können Nutzungs- bzw. Instandhaltungsphase vernachlässigt werden.

Abschließend erfolgen die Darstellung der Ergebnisse sowie eine Auswertung der Energiebilanzen der drei Bauteile.

¹ PROGRESS AG, Bauen mit System, ist ein Hersteller von Betonfertigteilen aus Brixen /Südtirol

1.3. Lebenszyklusanalyse und Energiebilanz

Ein weit verbreitetes Instrument zur Erstellung von Nachhaltigkeitsbewertungen ist die Lebenszyklusanalyse, die sich laut Ausführung von Baumast und Pape [8] seit den 70er Jahren zu einem der wichtigsten Ökocontrolling-Instrumente entwickelt hat. Im Folgenden sollen einige grundlegende Informationen zu diesem Bewertungstool gegeben werden.

1.3.1. Begriffsdefinition LCA

Eine Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz, im Englischen Life Cycle Assessment, im folgenden auch als LCA bezeichnet, ist ein Instrument, mit Hilfe dessen die Auswirkungen eines Produktes, Verfahrens oder einer Tätigkeit auf die Umwelt bestimmt werden können.

Gemäß Definition der Referenznorm EN ISO 14040 ist die Ökobilanz „Eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte...im Verlauf des Lebensweges.“[9] Dafür werden sämtliche auftretenden produktbezogenen Eingangs- und Ausgangsflüsse über einen bestimmten Zeitrahmen erfasst.

Gemäß Ausführungen in den Normen der Reihe EN ISO 14040ff werden die Auswirkungen des Produktes auf die Umwelt in sogenannten „Wirkungskategorien“ angegeben. Darin werden verschiedene absolute Kenngrößen wie Energie- oder Ressourcenverbrauch, aber auch die Relevanz verschiedener Emissionen für Kategorien wie für die Zerstörung der Ozonschicht angegeben.

Eine Einteilung der Lebenszyklusanalysen erfolgt häufig nach ihrem Betrachtungsrahmen. Dieser kann im Wesentlichen drei Formen entsprechen:

- Cradle to grave

Viele LCA's umfassen den Lebensweg eines Produkts. Dieser setzt sich aus dem gesamten Lebenszyklus zusammen, von der Gewinnung der Eingangsmaterialien über die Produktherstellung, den Transport, die Nutzungsphase weiter bis zur Wiederverwendung, zum Rückbau oder zur Entsorgung des Produkts, also von der Wiege bis zur Bahre („Cradle to grave“).

- Cradle to gate

Eine eingeschränkte LCA umfasst nur den Zyklus von der Materialgewinnung (Wiege) bis zum ab Werk verkaufsfertigen Produkt (Werkstor). Dies kann dann sinnvoll sein, wenn unterschiedliche Güter mit den entsprechenden Vorketten verglichen werden sollen, die aber dieselbe Leistung bringen.

- Gate to gate

Andere LCA's wiederum setzen ihre Grenzen noch enger. Vor allem für Unternehmen kann es sinnvoll sein, die LCA auf den eigentlichen Kernprozess zu beschränken, der in der Produktion eines bestimmten Produkts liegt. Solche LCA's dienen hauptsächlich dem Vergleich von einem Produkt zu einem anderen mit ähnlichen Eigenschaften.

1.3.2. Historische Entstehung LCA

Die ersten Studien hinsichtlich der Lebenszyklusanalyse wurden im Zeitraum von 1968 bis 1972 durchgeführt und setzten ihren Schwerpunkt auf Energieeffizienz, Primärenergiebedarf und die Verwertung von Abfällen. Beispielsweise wurde laut Schebek [18] vom Unternehmen Coca-Cola diese Idee aufgegriffen und für Getränkeverpackungen eine der ersten Lebenszyklusanalysen veranlasst.² Seitdem wurden immer wieder Lebenszyklusanalysen erstellt, wobei sich auch die Schwerpunkte der Studien veränderten. So wurde beispielsweise während der Ölkrise in den 70er Jahren das Hauptaugenmerk auf den Energieverbrauch gelegt. Mit vorübergehen der Ölkrise trat der Energieverbrauch aber wieder in den Hintergrund und die LCA verlor generell an Bedeutung. Erst ab den späten 80er Jahren stieg das Interesse an Lebenszyklusanalysen wieder an, wie laut Ausführungen der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. [37], Seite 2, durch das Erscheinen der ersten international standardisierten Methode³ zur Erstellung einer LCA im Jahr 1993 untermauert wird. Bis zum heutigen Zeitpunkt befindet sich die Lebenszyklusanalyse noch in einem Entwicklungszustand, der vor allem mit der Komplexität der anzuwendenden Methodik und der Prozesse begründet wird. Ein weiteres erschwerendes Hindernis sind die oft langen Zeiträume der Lebenszyklen, über die noch kaum Datenmaterial vorhanden ist, aber auch das Problem der Notwendigkeit, Gewichtungen im Laufe der Analyse vorzunehmen.

Heute werden Lebenszyklusanalysen oft mit unterstützender Software durchgeführt. Die diesbezüglich international gültige Vorgehensweise ist ebenfalls in der EN ISO Norm 14040 geregelt, sodass die LCA heute den Stand eines wissenschaftlich verankerten Instruments zur Analyse von Umweltauswirkungen erreicht hat.

1.3.3. LCA im Baugewerbe

Nach dem Büro für Umweltchemie [14] hat man sich schon in den frühen 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts bei der Umsetzung energiepolitischer Zielsetzungen die Frage gestellt, ob die Reduktion der Betriebsenergie von Gebäuden nicht durch den Mehraufwand an Energie im Herstellungsprozess der Baustoffe aufgewogen wird.

Hochgedämmte Bauwerke, wie sie heute gesetzlicher Standard sind, erfordern Bauteile mit geringem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert), siehe dazu auch OIB-Richtlinie 6 [16]. Die statische Notwendigkeit, tragende Bauteile im Bauwerk zu errichten ermöglicht es aber nicht, auf Baustoffe mit hohem U-Wert zu verzichten. Um den Wärmeschutz dennoch zu gewährleisten, müssen daher oft wärmedämmende Baustoffe zusätzlich verwendet werden, sodass die moderne

² Die erwähnte Studie von Coca-Cola wurde nie veröffentlicht, ist jedoch in zahlreichen Publikationen als erstes Beispiel einer Lebenszyklusanalyse zitiert (siehe z. B. Baumann, Tillmann [19])

³ Die Publikation von SETAC [21] wird oft als „Mutter“ aller standardisierten Ökobilanzmethoden angesehen.

Bauweise vielfach Bauteile erfordert, die sich aus stofflich verschiedenen Materialien zusammensetzen.

Auch das Baugewerbe hat erkannt, dass die stoffliche Zusammensetzung ausschlaggebend ist für die Umwelteinflüsse der einzelnen Bauteile, sodass vermehrt Interesse zur Bewertung von Nachhaltigkeit besteht.

Insbesondere das Baugewerbe ist hinsichtlich des großen Anteils an Ressourcen- und Energieverbrauch maßgebend, wenn eine nachhaltige Entwicklung angestrebt werden soll. Laut der Abteilung Energiebilanz und Energieeffizienz [26] hat der Gebäudebereich den größten Anteil am Energieverbrauch in der EU mit 40%.

Mit diesem Hintergrund werden zunehmend mehr Gebäude auf Veranlassung der Planer und der Investoren mit einem Nachhaltigkeitssiegel wie z.B. LEED, BREEAM oder DGNB zertifiziert. Für die Erstellung solcher Gütesiegel ist es unerlässlich, auch Deklarationen über die eingebauten Bauproduktgruppen zu kennen. Diese Informationen werden von Lebenszyklusanalysen geliefert und beeinflussen das Ergebnis der Zertifizierungen maßgeblich.

Aber auch für Produzenten von Bauteilen kann es hilfreich sein, eine LCA durchzuführen. Durch Vergleiche mit Konkurrenzprodukten können so Aussagen über die Effizienz im Produktionsprozess erhalten werden. Beispielsweise lässt sich bei einem Vergleich des Energiebedarfs von einem definierten Produkt mit einem Konkurrenzprodukt möglicherweise ein Einsparungspotential erkennen und dadurch gegebenenfalls der Herstellungsprozess optimieren. Die LCA hilft in diesem Fall also als Planungstool zur Entscheidungsfindung.

Im produzierenden Gewerbe ganz allgemein und auch in der Bauindustrie hat sich dabei aufgezeigt, dass Lebenszyklusanalysen sehr häufig nur bis zum verkaufsfertigen Produkt durchgeführt wurden („Cradle to gate“). Dies entspricht in etwa dem Lebensweg, der auch das unternehmensseitig betriebene Marketing für das Produkt umfasst.

1.3.4. Energiebilanz

Laut Max Planck wird unter Energie die Fähigkeit eines Systems verstanden, äußere Wirkungen hervorzubringen. Diese Äußeren Wirkungen können eine Arbeit bewirken, aber auch Umweltauswirkungen hervorrufen. Inhalt dieser Arbeit ist nicht eine vollständige Lebenszyklusanalyse, sondern lediglich die Untersuchung von den energetisch bedeutsamen Parametern, die für die Umwelt relevant sind. Während eine LCA in der Regel mehrere Wirkungskategorien analysiert, soll in dieser Arbeit nur die Wirkungskategorie „Energiebedarf“ ermittelt werden, folglich eine Energiebilanz erstellt werden.

Diese Einschränkung liegt einerseits im günstigen Verhältnis von Aufwand und Aussagekraft der Energiebilanz und andererseits in den unzuverlässigen Aussagen der Lebenszyklusanalyse begründet. Weil sich der Energiebedarf in der physikalischen Einheit Joule angeben lässt und keinen spezifischen

Bewertungsproblemen unterliegt, ist der Energiebedarf eine anschauliche Größe, die einfach auf ihre Plausibilität überprüft werden kann.

Die Erstellung der Energiebilanz sieht eine Aufschlüsselung in den erneuerbaren- sowie nichterneuerbaren Energiebedarf vor. Gemäß der Definition von Kaltschmitt, Hartmann, und Hofbauer in [14] umfassen erneuerbare Energien *„alle Primärenergien, die laufend aus Energiequellen geschöpft werden können, die – in menschlichen Dimensionen – als unerschöpflich bzw. unbegrenzt angesehen werden.“* Dazu zählen die Sonnenenergie (mit weiteren davon hervorgerufenen erneuerbaren Energieformen wie Windenergie, Wasserkraft und Biomasse), aber auch Gezeitenenergie und Erdwärme. Unter nicht erneuerbaren Energien hingegen werden alle aus anderen Energiequellen wie z.B. aus fossilen Stoffen gewonnene Energien verstanden.

Die Abgrenzung zwischen regenerativer und nicht regenerativer Energie erfolgt in dieser Arbeit in Anlehnung an obige Definition.

2. WANDAUFBAUTEN

In diesem Kapitel werden drei Wandkonstruktionen im Hochbau ausgewählt und deren Aufbauten erläutert. Mit dem Ziel, Wände mit denselben Eigenschaften zu untersuchen, werden wesentliche Anforderungen an Außenwände ermittelt, die sich beispielsweise hinsichtlich Bauphysik und Konstruktion ergeben. Im Anschluss wird überprüft, ob die jeweiligen Anforderungen von allen drei Wandaufbauten erfüllt werden können und einer funktionellen Einheit entsprechen.

2.1. Auswahl der Wandaufbauten

Es werden nun drei Außenwandaufbauten gewählt, die im Hochbau anzutreffen und auf dem Markt weit verbreitet sind bzw. im Wohnbau häufig verwendet werden. Betrachtet man die marktüblichen Bauvorhaben in Österreich, ist die Ziegelbauweise laut Verband der österreichischen Ziegelwerke [25] die mit Abstand häufigste Bauweise – so bestehen rund 70% aller Einfamilienhäuser zumindest teilweise aus Ziegelmauerwerk.

Immer bedeutender wurde in den letzten Jahren die Holzbauweise. Im Jahr 2008 lag der Anteil aller Bauvorhaben in Holz bei 39%, davon wiederum wurden rund 94% in Tafel- bzw. Elementbauweise errichtet [27].

Zudem wird aufgrund der in Abschnitt 1.2 angesprochenen Zusammenarbeit mit dem Unternehmen PROGRESS ein Außenwandaufbau in Betonbauweise herangezogen. Gewählt wird dabei die sogenannte PROGRESS Thermowand®. Es handelt sich dabei um ein werksmäßig hergestelltes Fertigteil, das aufgrund seines Charakters in den letzten Jahren stets weitere Verbreitung gefunden hat und in Südtirol konstant jährliche Zuwächse in der verkauften Menge von 100% über die letzten Jahre aufwies [28]. Daher werden die drei Außenwandaufbauten gemäß unten stehender *Abb. 1* ausgewählt und im folgenden Abschnitt im Detail erläutert.

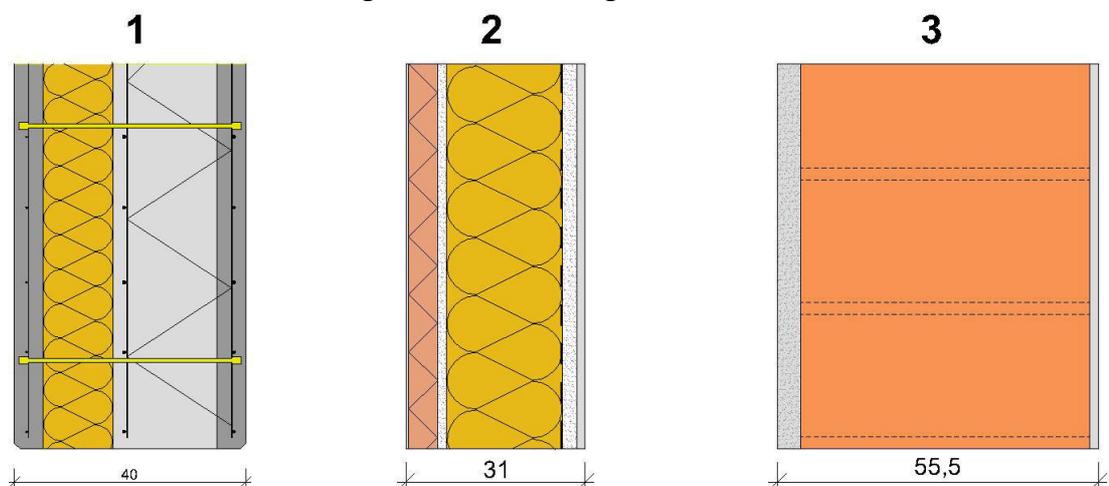


Abb. 1: Übersicht der gewählten Wandaufbauten: 1) Betonbauweise in PROGRESS Thermowand®, 2) Holzbauweise als Holzrahmenbau, 3) Ziegelbauweise aus Mauerwerk in Hochlochziegeln (6)

2.2. Betonbauweise in PROGRESS Thermowand®

Beim Produkt handelt es sich um tragende Doppelwände mit innenliegender Wärmedämmung. Diese werden unter dem Begriff PROGRESS Thermowand® vermarktet.

Diese Wandbauteile können werkseitig bis zu einer maximalen Größe von 1130 x 330 cm ausgeführt werden. Die Dicke der außenliegenden Außenscheibe beträgt standardmäßig 5 cm, gleich wie die Schichtstärke der innenliegenden Innenscheibe. Diese Schichtstärken können bei besonderen Anforderungen auf bis zu 7 cm erhöht werden. Die innenliegende Wärmedämmung wird in den Schichtstärken 8-10-12 cm geliefert, wobei standardmäßig 12 cm eingebaut werden (siehe Abb. 3). Im Folgenden beziehen sich alle weiteren Ausführungen auf die 40 cm starke Ausführung mit 5 cm starken Scheiben und 12 cm Wärmedämmung.

Das Produkt PROGRESS Thermowand® ist ein Halbfertigteil, das auf die Baustelle geliefert wird und dort entsprechend ausgerichtet wird. Der Einbau erfordert neben der Montage der Wände auf dem erforderlichen Fundament oder auf der hergestellten Decke mit den vorbereiteten Anschlusseisen die Verfüllung mit Ortbeton sowie eine Versiegelung der Fugen an den Elementstößen.

Die PROGRESS Thermowand® ist direkt streich- bzw. tapezierfähig und kann nach entsprechender Oberflächenbehandlung auch auf Sicht belassen werden.



Abb. 2: PROGRESS Thermowand®

Der Wandaufbau mit den einzelnen Bauteilschichten ist in untenstehender Abb. 3 dargestellt.

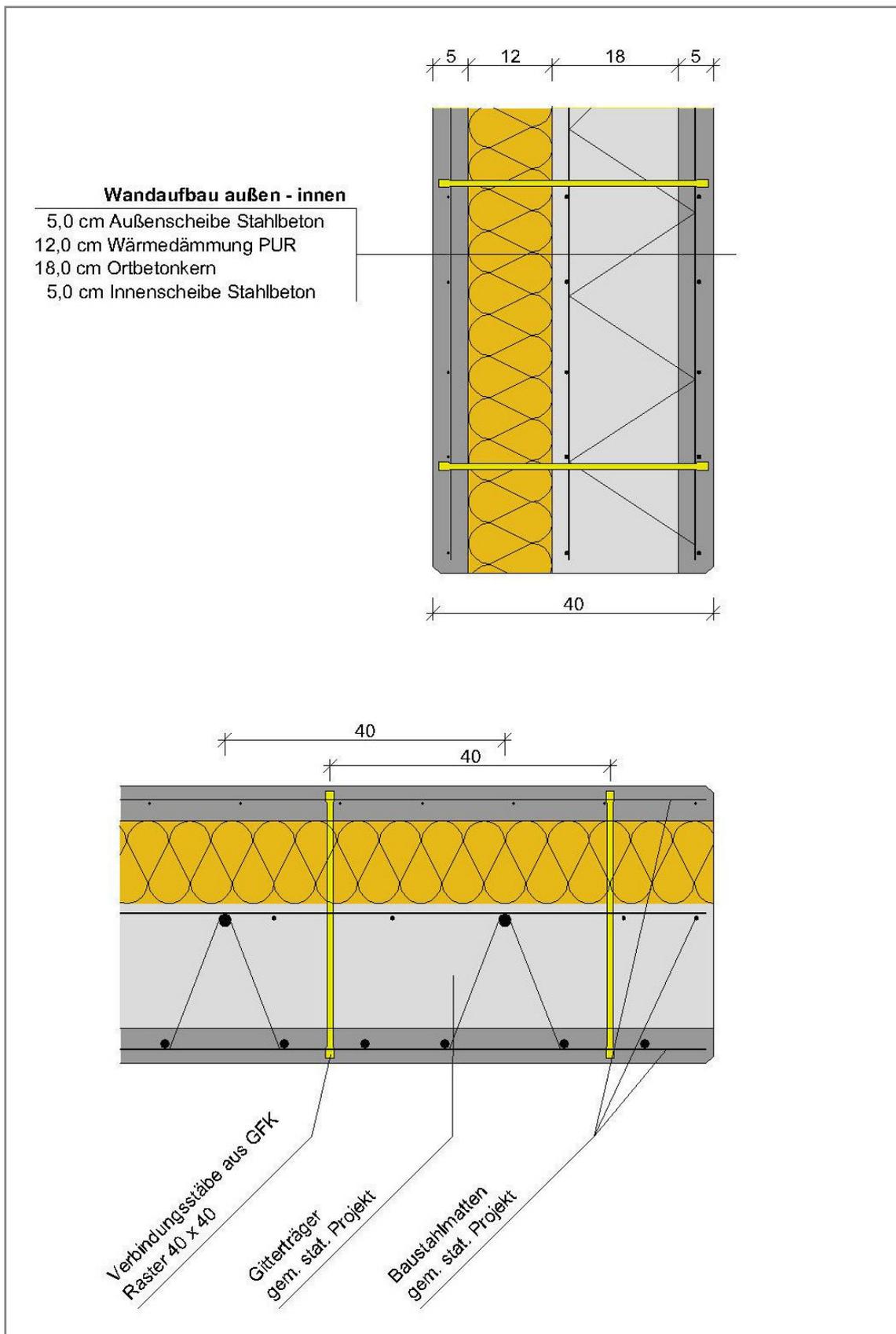


Abb. 3: Wandaufbau PROGRESS Thermowand®

2.3. Holzbauweise als Holzrahmenbau

Der Holzrahmenbau (umgangssprachlich auch Holzständerbauweise, Holzriegelbau etc.) stellt, wie eingangs dargelegt, eine der wichtigsten Holzbauweisen der Gegenwart dar.

Der gewählte Wandaufbau ist eine nicht hinterlüftete Holz- Riegelkonstruktion aus mehreren Schichten, wie sie standardmäßig oft im Fertighausbau vorkommt. Bei dieser Bauweise bestehen die Wände aus einem statisch tragfähigen Holzgerippe aus Stehern im Achsabstand 625 mm zueinander. Der dazwischenliegende Hohlraum wird mit einem Dämmstoff aus Glaswolle ausgefüllt. Die Funktion der Aussteifung übernimmt die beidseitige Beplankung aus Gipskartonplatten. Außenliegend wird eine zusätzliche Dämmschicht angeordnet, um die Kältebrücke im Bereich des Stehers zu unterbinden bzw. auszugleichen. Hier wird eine Holzwolleleichtbauplatte verwendet. Darüber liegend wird eine Putzschicht aufgetragen, die aus mehreren Schichten besteht und das außenliegende Wärmedämmverbundsystem (WDVS) vervollständigt. Zudem erfordert diese Holzbauweise aufgrund der Diffusionsoffenheit der verwendeten Baustoffe den Einbau einer umschließenden Dichtebene, weshalb auf der in den Raum zugewandten Seite eine Dampfbremse eingebaut werden muss. Auch an der Innenseite wird ein Putz aufgetragen.

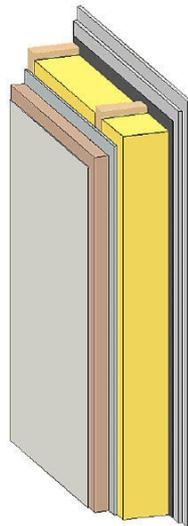


Abb. 4: Holzrahmenbau (4)

Der genaue Wandaufbau kann den beiden Bauteilschnitten in untenstehender Abb. 5 entnommen werden.

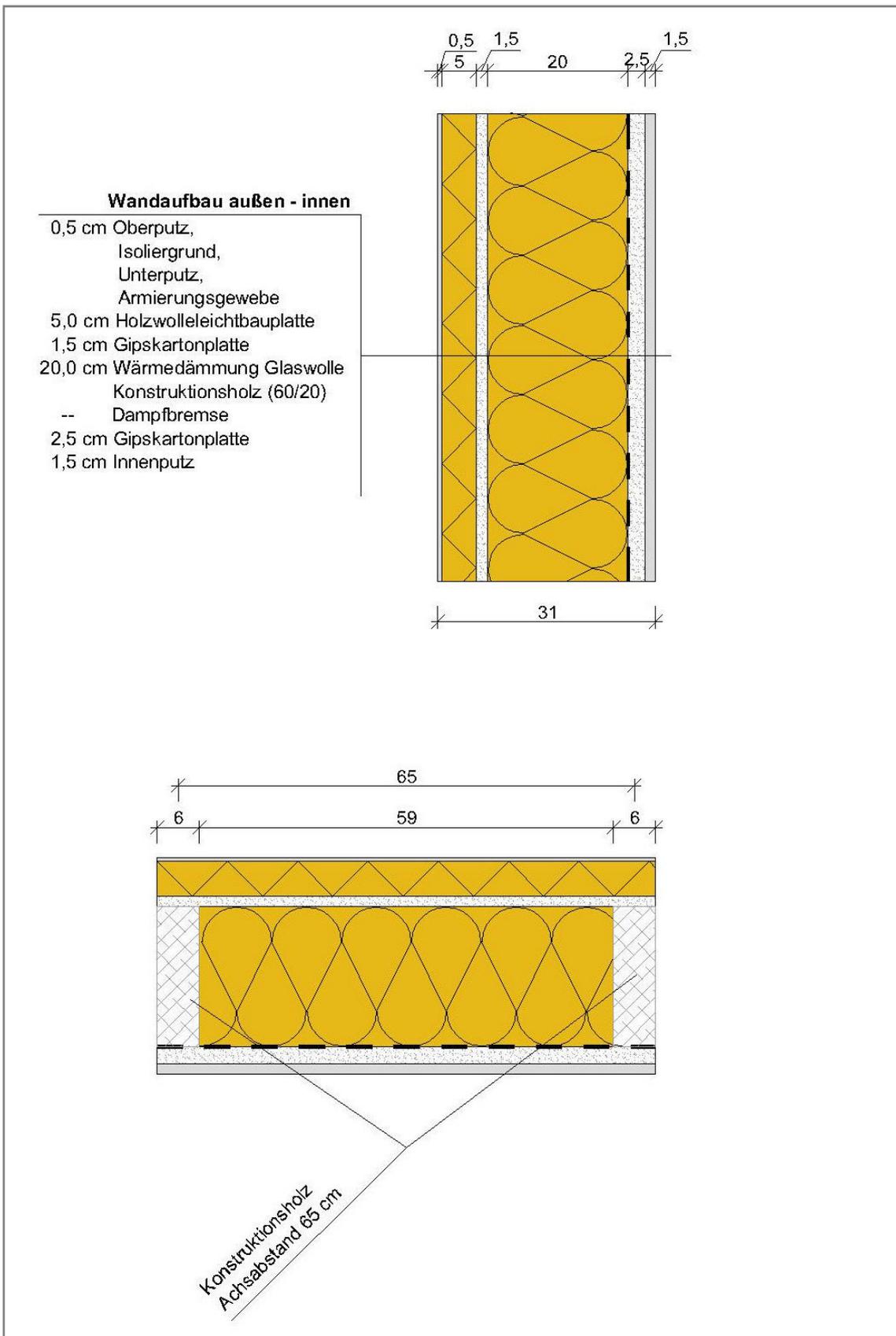


Abb. 5: Wandaufbau Holzrahmenbau

2.4. Ziegelmauerwerk

Der gewählte Wandaufbau besteht aus einschaligen keramischen Hochlochziegeln in einer Stärke von 50 cm. Dieser Ziegel ist ungefüllt und ermöglicht aufgrund seines niedrigen Lambda-Wertes die Errichtung von monolithischen Außenwänden ohne zusätzliche Wärmedämmung, wenn in entsprechender Mauerstärke ausgeführt. Da es sich um Planziegel handelt, können diese mit Dünnbettmörtel versetzt werden. Nach erfolgter Errichtung des Mauerwerkes auf der Baustelle wird dieses beidseitig verputzt. Während an der Innenseite ein konventioneller Putz aufgebracht wird, wird auf der Außenseite ein Wärmedämmputz angebracht.

Dieser Außenwandbau zeichnet sich durch einfachen Wandaufbau und schnelle Herstellung aus, ermöglicht im Vergleich zu den beiden vorherigen Außenwänden aber keine Vorfertigung im Sinne eines Fertigteils.

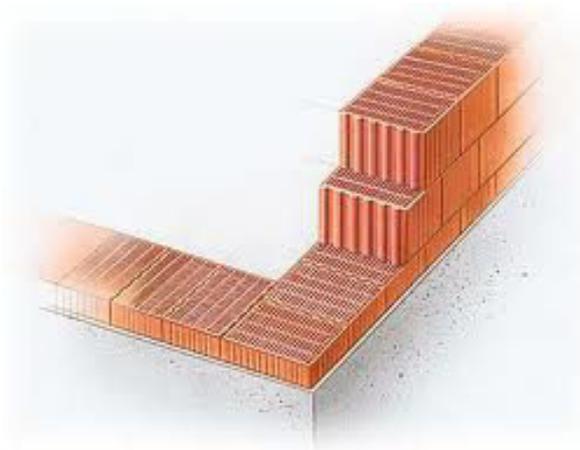


Abb. 6 Ziegelmauerwerk verputzt (5)

Der Wandaufbau des Ziegelmauerwerks ist im Detail in untenstehender Abb. 7 abgebildet.

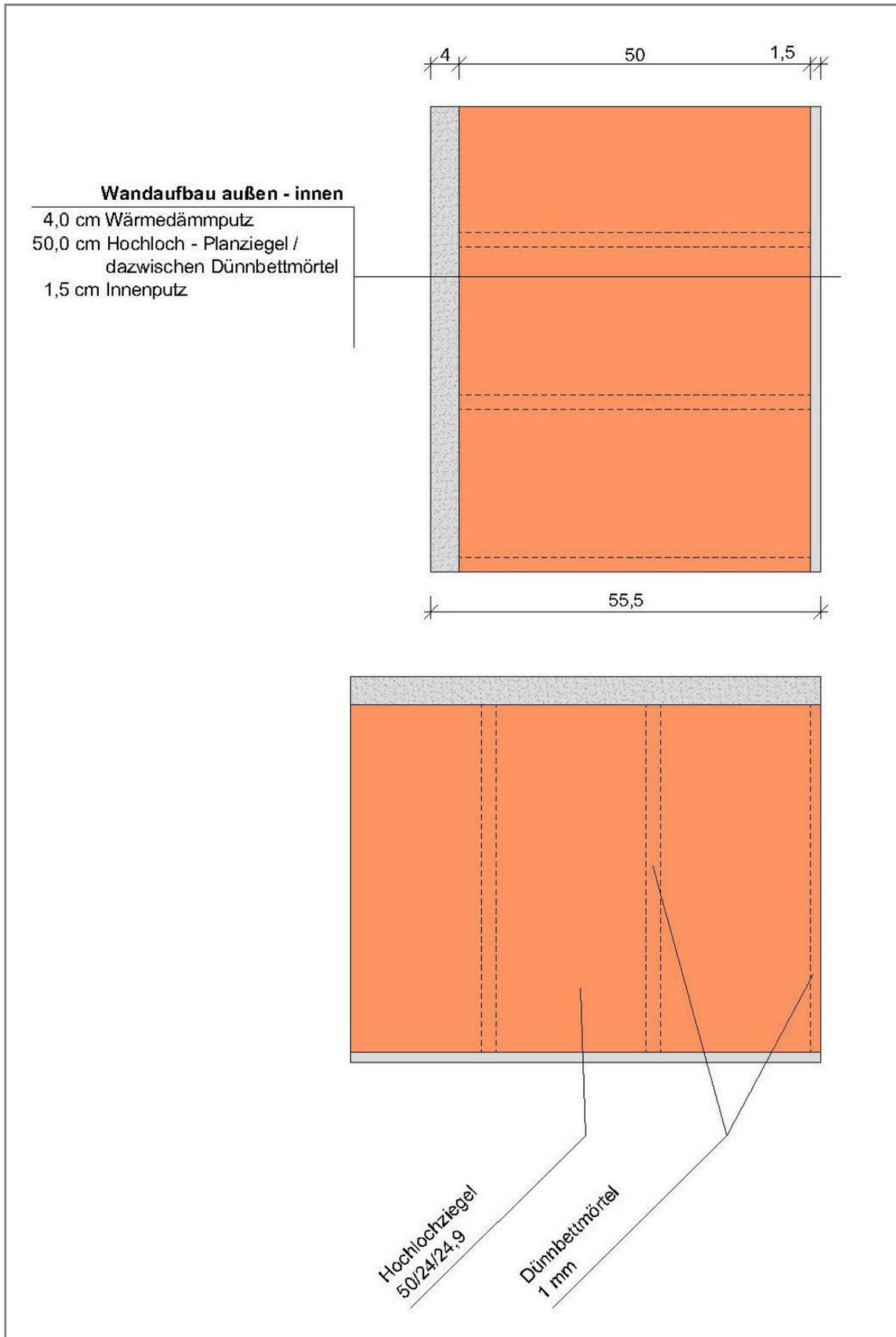


Abb. 7: Wandaufbau Ziegelmauerwerk

2.5. Funktionelle Eigenschaften

Für diese Arbeit gilt das Prinzip, dass alle Außenwandaufbauten möglichst dieselben gleichwertigen Eigenschaften aufweisen sollen und damit dieselbe Funktionelle Einheit darstellen. Nur so kann eine Vergleichbarkeit unter den drei Konstruktionen ermöglicht werden.

In erster Linie soll eine Außenwand das Gebäudeinnere vor Umwelteinflüssen wie Wind und Wetter schützen, sie soll Sicherheit für Bewohner und Passanten gewährleisten, möglichst langlebig sein und gleichzeitig ökologisch vertretbar, tragfähig, funktionell und zudem preisgünstig.

Alle diese Anforderungen können mit verschiedenen Kennwerten beschrieben werden, wobei die wichtigsten davon im Folgenden untersucht werden sollen:

- Bauphysikalische Eigenschaften:
 - Wärmedämmleistung
 - Speicherwirksame Masse
 - Schallschutz
- Statische und konstruktive Kenngrößen:
 - Wandstärke
 - Tragfähigkeit
 - Brandschutz
- Andere bauspezifische Funktionen:
 - Möglichst minimaler Unterhaltsaufwand
 - Gleichwertige Nutzungs- oder Gebrauchsdauer
 - Optische Eigenschaften
 - Kosten

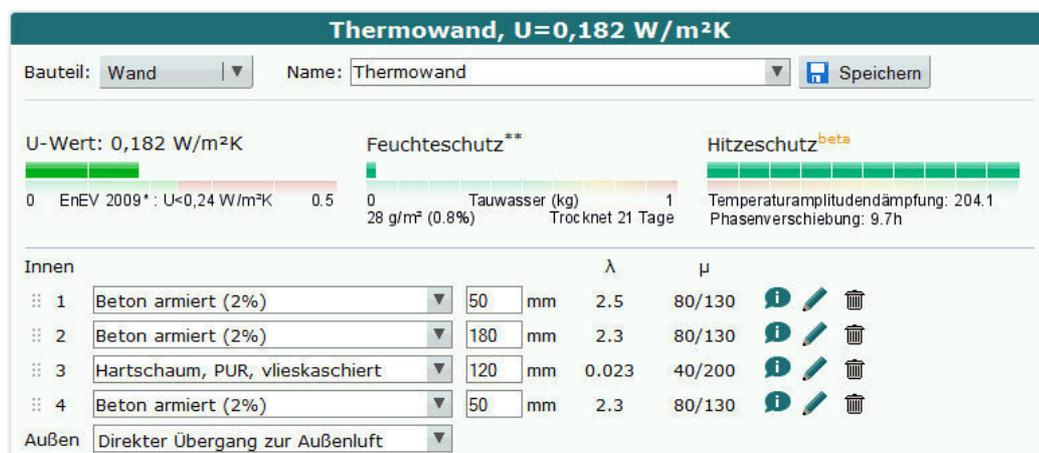
Es soll nun in den folgenden Abschnitten 2.6, 2.7 und 2.8 überprüft werden, ob oben angegebene Grundsätze an alle drei Wandkonstruktionen gestellt werden können um Gleichwertigkeit zu gewährleisten.

2.6. Bauphysikalische Eigenschaften

2.6.1. Ermittlung der Wärmedämmleistung

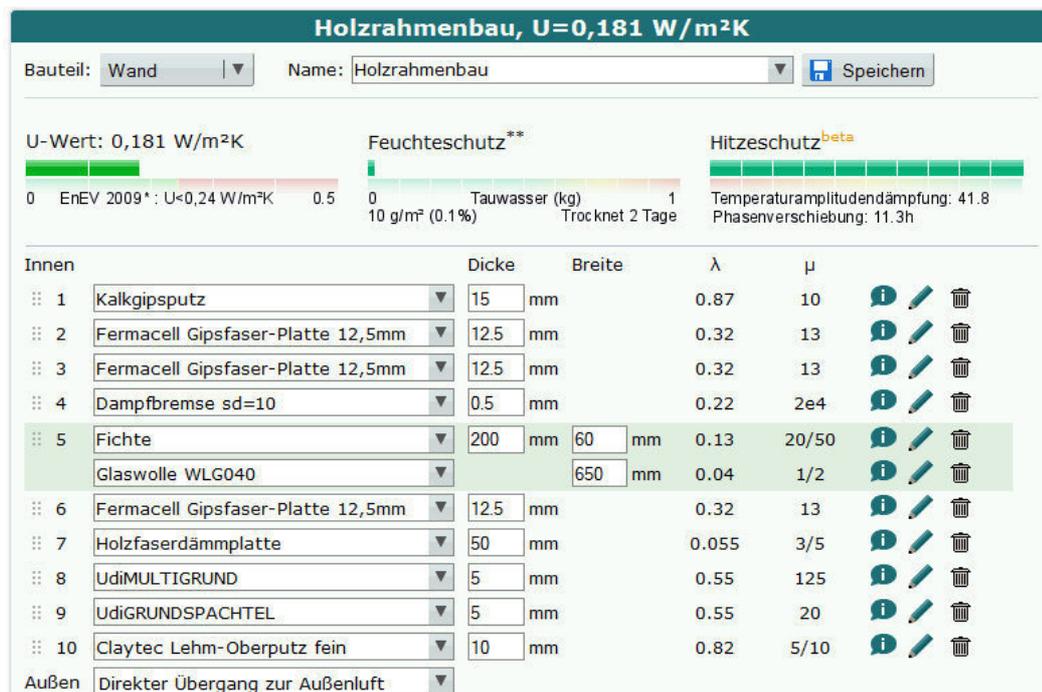
Die Wärmedämmleistung kann mit dem U-Wert beschrieben werden. Dazu wird der Schichtaufbau der jeweiligen Außenwand in einen der vielen online verfügbaren U-Wertrechner [29] eingegeben. Der U-Wert beschreibt die Energieverluste, die während der Heizperiode je Fläche der Wand und je Kelvin Temperaturunterschied an die Umwelt angegeben werden, demnach soll er einen möglichst niedrigen Wert aufweisen.

2.6.1.1 PROGRESS Thermowand®



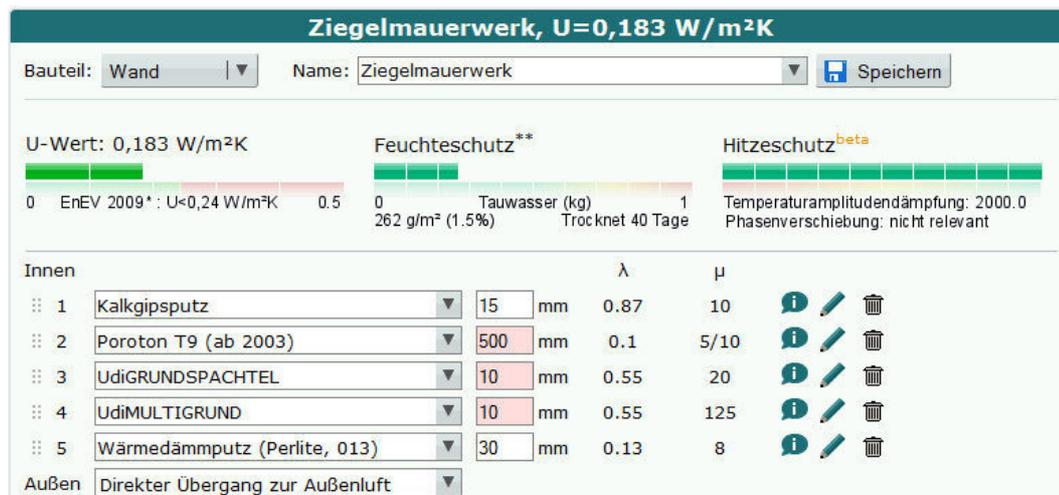
Für die PROGRESS Thermowand® ergibt sich ein U-Wert von 0,182 W/m²K

2.6.1.2 Holzrahmenbau



Die Wand im Holzrahmenbau weist einen U-Wert von 0,181 W/m²K auf.

2.6.1.3 Ziegelmauerwerk



Der U-Wert der Wand in Ziegelbauweise ergibt sich zu 0,183 W/m²K.

Die U-Werte der untersuchten Wandaufbauten, wie laut Norm geregelt, werden auf 2 Kommastellen gerundet und liegen folglich alle bei 0,18 W/m²K und damit im selben Bereich. Es sei angemerkt, dass es sich bei den ermittelten U-Werten um ungestörte Werte handelt, d.h. dass Durchdringungen wie beispielsweise Leitungsführungen oder Befestigungsmittel eine Kältebrücke bedeuten können, die den U-Wert deutlich verschlechtert.

Vergleichend zu online errechnetem, ungestörtem U-Wert der PROGRESS Thermowand® bestätigt eine alternative Berechnung nach UNI EN ISO 6946, dass der U-Wert von 0,18 W/m²K auch unter Berücksichtigung linearer Einbauten (Abstandhalter, Gitterträger) erreicht wird.

2.6.2. Berechnung der speicherwirksamen Masse

Durch eine möglichst hohe speicherwirksame Masse stellt sich im Bauwerk eine Phasenverschiebung ein, sodass das Bauwerk auf extreme Temperaturumstürze mit seiner Pufferwirkung reagieren kann. Bauten mit guter Pufferwirkung sind durch eine möglichst große speicherwirksame Masse charakterisiert.

Die speicherwirksame Masse ist im Wesentlichen abhängig von der Rohdichte des verwendeten Baumaterials. Sie kann nach ÖNORM EN ISO 13786 gemäß folgender Formel berechnet werden:

$$m_{w,BA} = \frac{c \cdot \rho \cdot d}{c_0}$$

mit

$m_{w,BA}$... flächenbezogene speicherwirksame Masse $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$

c ... spezifische Wärmekapazität des jeweiligen Baustoffes:

$= \left(0,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right)$ für metallische Baustoffe

$= \left(1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right)$ für mineralische Baustoffe

$$= \left(1,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) \text{ für organische Baustoffe}$$

$$\rho \dots \text{Rohdichte der Bauteilschicht} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

d...Dicke der Wand nach Festlegung:

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} \text{Hälfte der Bauteildicke;} \\ 10 \text{ cm;} \\ \text{Dicke bis zur ersten Dämmstoffschicht} \end{array} \right\}$$

$$c_0 \dots \text{Referenz-Speicherkapazität} = 1046,7 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right]$$

2.6.2.1 PROGRESS Thermowand®

PROGRESS Thermowand®	Schichtanteil	Schichtstärke		spez. Wärmekapazität	Rohdichte	
Schichtaufbau	%	d [cm]	d _(max)	c [kJ/(kgxK)]	ρ [kg/m³]	d*c*ρ
Beton Innenschale	99%	5	5	1,00	2374	117,51
Bewehrung Innenschale	1%	5	5	0,50	7850	1,96
Beton Ortbetonkern	99%	18	5	1,00	2374	117,51
Bewehrung Ortbetonkern	1%	18	5	0,50	7850	1,96
Summe	-	-	10,00	Speicherkapazität [kJ/(m²K)]		238,95
				Speichermasse [kg/m²]		228,29

Die speicherwirksame Masse $m_{w,BA}$ beträgt 228,29 kg/m².

2.6.2.2 Holzrahmenbau

Holzrahmenbau	Schichtanteil	Schichtstärke		spez. Wärmekapazität	Rohdichte	
Schichtaufbau	%	d [cm]	d _(max)	c [kJ/(kgxK)]	ρ [kg/m³]	d*c*ρ
Kalk-Gips- Innenputz	100%	1,5	1,5	1,00	1450	21,75
Gipsfaserplatte	100%	2,5	2,5	1,00	1000	25,00
Dampfbremse PEbahn	100%	0,1	0,1	1,00	1000	1,00
Konstruktionsholz	11%	20	5,9	1,50	470	4,42
Zwischendämmung Glaswolle	89%	20	0	1,50	20	0,00
Summe	-	-	10,00	Speicherkapazität [kJ/(m²K)]		52,17
				Speichermasse [kg/m²]		49,84

Die speicherwirksame Masse $m_{w,BA}$ beträgt 49,84 kg/m².

2.6.2.3 Ziegelmauerwerk

Ziegelmauerwerk	Schichtanteil	Schichtstärke		spez. Wärmekapazität	Rohdichte	
Schichtaufbau	%	d [cm]	d _(max)	c [kJ/(kgxK)]	ρ [kg/m³]	d*c*ρ
Kalk-Gips- Innenputz	100%	1,5	1,5	1,00	1450	21,75
keram. Hochlochziegel	97%	50	8,5	1,00	630	51,83
Dünnbettmörtel	3%	50	8,5	1,00	1700	4,64
Summe	-	-	10,00	Speicherkapazität [kJ/(m²K)]		78,22
				Speichermasse [kg/m²]		74,73

Die speicherwirksame Masse $m_{w,BA}$ beträgt 74,73 kg/m².

Aus obiger Berechnung ist deutlich ersichtlich, dass die Massivbauweisen im Vergleich zur Holzbauweise deutliche Vorteile hinsichtlich speicherwirksamer Masse bieten. Die Betonbauweise mit der PROGRESS Thermowand® weist eine über viermal höhere speicherwirksame Masse als die Holzbauweise und eine dreimal so große im Vergleich zur Ziegelbauweise auf.

2.6.3. Berechnung des Bauschalldämmmaßes R'_w

Das Schalldämmmaß gibt Auskunft über die schallschutzmäßigen Eigenschaften des Bauteils, wobei ein möglichst hoher Wert eine gute Dämmwirkung charakterisiert.

Da das Bauschalldämmmaß hauptsächlich vom (möglichst großen) Gewicht der Konstruktion abhängt, kann dieses gemäß folgender empirischen Formel nach Berger vereinfachend bestimmt werden:

$$R'_w = 28 \log m' - 20 \text{ [dB]}$$

mit

m' ...flächenbezogene Masse $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right]$

Zusätzlich kann laut DIN 4109 [10] für zweischaliges Mauerwerk der Korrekturbonus $\Delta R_{w,R} = 5 \text{ dB}$ vergeben werden, sofern die Wandkonstruktion die erforderlichen Eigenschaften aufweist.

Außenliegende Wärmedämmverbundsysteme hingegen verschlechtern das bewertete Schalldämmmaß, was mit einem Abzug von $\Delta R_{w,R} = 5 \text{ dB}$ berücksichtigt werden kann.

2.6.3.1 PROGRESS Thermowand®

$$m' = 692,4 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right]^4$$

$$R'_w = 28 \log 692,4 - 20 + 5 = 64,5 \text{ [dB]}$$

2.6.3.2 Holzrahmenbau

$$m' = 102,3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right]^5$$

$$R'_w = 28 \log 102,3 - 20 + 5 - 5 = 36,60 \text{ [dB]}$$

2.6.3.3 Ziegelmauerwerk

$$m' = 354,5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right]^6$$

$$R'_w = 28 \log 354,5 - 20 = 51,4 \text{ [dB]}$$

Aus obiger Berechnung ist ersichtlich, dass die Massivbauweise Vorteile hinsichtlich Bauschalldämmmaß bietet. Die Bauweise mit der PROGRESS Thermowand® bietet ein fast doppelt so hohes Bauschalldämmmaß im Vergleich zur Holzbauweise.

⁴ S. Berechnung der Masse in Tabelle **7T1**

⁵ S. Berechnung der Masse in Tabelle **7H1**

⁶ S. Berechnung der Masse in Tabelle **7Z1**

2.7. Statische und konstruktive Kenngrößen

2.7.1. Wandstärken

Die Wandstärken können aus *Abb. 1: Übersicht der gewählten Wandaufbauten: 1) Betonbauweise in PROGRESS Thermowand®, 2) Holzbauweise als Holzrahmenbau, 3) Ziegelbauweise aus Mauerwerk in Hochlochziegeln (6)* auf Seite 14 entnommen werden. Sie betragen 40,0 cm für die PROGRESS Thermowand®, 31,0 cm für die Holzrahmenbauweise und 55,5 cm für das Ziegelmauerwerk.

2.7.2. Ermittlung der Tragfähigkeit

Das wesentliche Kriterium der Tragfähigkeit ist die Fähigkeit der Wand, Druckkräfte aufnehmen zu können und diese nach unten weiterleiten zu können. Daher wird im Folgenden die maximal aufnehmbare Normalkraft je Laufmeter Wand ermittelt.

2.7.2.1 PROGRESS Thermowand®

Die Tragfähigkeit der PROGRESS Thermowand® verhält sich analog zu einer monolithischen Ortbetonkonstruktion. Daher ist die statisch- konstruktive Bemessung grundsätzlich im Eurocode 2 [11] geregelt.

Der Bemessungswert der Längsdruckkraft einer unbewehrten Wand darf für unverschieblich ausgesteifte Tragwerke nach dem vereinfachten Verfahren für Wände nach EN 1992-1-1, Abschnitt 12.6.5.2, wie folgt angenommen werden:

$$N_{Rd} = b * h_w * f_{cd} * \phi$$

mit

N_{Rd} ... Bemessungswert der aufnehmbaren Normaldruckkraft [kN]

b ... Gesamtbreite des Querschnitts [m]

h_w ... Gesamtdicke des Querschnitts [m]

f_{cd} ...charakteristische Betondruckfestigkeit [N/mm²]

ϕ ...Faktor zur Berücksichtigung der Lastausmitte, einschließlich der Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung und der normalen Auswirkungen des Kriechens

Für eine typische Wandhöhe von 3,50 m und Beton C25/30 ergibt sich bei zentrischer Druckbelastung eine Tragfähigkeit N_{Rd} von 1983 kN/m. Diese Tragfähigkeit ist die untere Schranke. Höher bewehrte Wände können deutlich größere Lasten abtragen.

2.7.2.2 Holzrahmenbau

Die Ermittlung der Tragfähigkeit für den Holzrahmenbau ist bedeutend komplexer, da die Belastung neben dem Wandaufbau maßgeblich von Art und Qualität der verwendeten Verbindungsmittel abhängig ist, vergleiche dazu auch die Dissertation von Mayer [31]. In Anlehnung an die Berechnung in oben erwähnter Dissertation

wird die zulässige Druckkraft für einen Druckanschluss mit einer Kraft rechtwinklig zur Faserrichtung gemäß EN 1995-1-1 [32] folgendermaßen berechnet:

$$\frac{F_{c,90,d}/A_{ef}}{k_{c,90} * f_{c,90,d}} \leq 1$$

mit

$$A_{ef} = l_{ef} * b = 6 * 2 = 120 \text{ cm}^2$$

$F_{c,90,d}$... Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft [kN]

$k_{c,90}$... Querdrukbeiwert für Vollholz aus Nadelholz = 1,25

$f_{c,90,d}$... Materialkennwert für Nadelholz C30 unter ständigen Lasten = $0,60 * 2,7/1,3$
= 1,246

ergibt sich $F_{c,90,d,max} = 186,9 \text{ kN}$. Das entspricht bei einem Stielabstand von 59 cm einer aufnehmbaren Normalkraft von 316,8 kN/m.

2.7.2.3 Ziegelmauerwerk

Für die Ziegelbauweise kann die aufnehmbare Normalkraft bei Belastung auf Druck aus den Berechnungstabellen des Herstellers [33] entnommen werden. Für Planziegel mit denselben mechanischen Kenngrößen ergibt sich bei Verwendung von Dünnbettmörtel der Klasse LM 21 eine zulässige Mauerwerksdruckspannung von 600 kN/m.

Aus obigen Berechnungen ist zu erkennen, dass die PROGRESS Thermowand® die größte Tragfähigkeit aufweist. Diese liegt mit knapp 2 MN fast 3-mal so hoch wie jene des Ziegelmauerwerks und ca. 6-mal höher als jene des Holzrahmenbaus.

Neben der aufnehmbaren Normalkraft gibt es mehrere Parameter, die die Tragfähigkeit beeinflussen. Dazu gehören Aspekte hinsichtlich Stabilität, Torsionstragfähigkeit, Momentenbeanspruchbarkeit und viele mehr. Diese werden für diese Gegenüberstellung nicht herangezogen.

2.7.3. Ermittlung des Feuerwiderstandes

Die Feuerwiderstandsdauer einzelner Bauteile wird in der Regel anhand Brandversuchen ermittelt und in gemäß ÖNORM 3501-2 in charakteristische Leistungseigenschaften (z.B. Tragfähigkeit R, Raumabschluss E, Wärmedämmung I usw.) eingeteilt, mit Angabe der Zeit in Minuten, in der das Bauteil der Brandeinwirkung standhält.

Zur Beurteilung der drei untersuchten Außenwandaufbauten werden Prüfungen an ähnlichen Wandaufbauten bzw. Festlegungen laut Norm herangezogen.

2.7.3.1 PROGRESS Thermowand®

Die Oberflächen der PROGRESS Thermowand® bestehen aus Beton. Laut dem italienischen Ministerialdekret D.M. 10.03.2005: Brandverhalten von Baumaterialien [29] kann eine Betonoberfläche als Baustoffklasse A1- unbrennbar eingestuft

werden. Zudem gilt laut EN 1992-1-2 [34], dass ein Wandaufbau aus mind. 15 cm Beton auf der Innenseite EI240 erfüllt, ohne gesonderte Versuche am Bauteil durchführen zu müssen.

2.7.3.2 Holzrahmenbau

Die Holzrahmenbauweise mit weitgehend ähnlichem Aufbau wurde von der MA39 klassifiziert. Demnach beträgt der Brandwiderstand REI60 [35].

2.7.3.3 Ziegelmauerwerk

Die Feuerwiderstandsklasse eines Ziegelmauerwerks mit ähnlichem Aufbau wurde ebenfalls von der MA39 klassifiziert [36]. Die Prüfung ergab REI120.

2.8. Andere bauspezifische Angaben

2.8.1. *Unterhaltungsaufwand*

Der Unterhaltungsaufwand der drei Wandaufbauten ist schwer zu quantifizieren. Mehrere Quellen, allen voran jene aus dem Bereich Massivbau wie beispielsweise die Bauinnung Augsburg [12] versprechen, dass Massivbauten *„sehr robust und stabil sind, und ihre Besitzer von aufwändigen Pflege- und Instandhaltungskosten entlasten“*.

In der Regel ist davon auszugehen, dass verputzte Wandkonstruktionen nur einen geringen Wartungs- und Instandhaltungsbedarf aufweisen. Dies betrifft nicht nur die Massivbau- sondern auch die Holzbauweise. Schwachstelle kann allerdings die außenliegende Wärmedämmung sein, wenn diese nicht nach Stand der Technik angebracht wurde, was sich durch zahlreiche Studien über Schäden an Wärmedämmverbundsystemen belegen lässt, vergleiche dazu auch den 4. Österreichischen Bauschadenbericht [13]. Im Gegensatz zu den beiden Außenwänden mit außenliegendem WDVS beziehungsweise mit Wärmedämmputz wird diese Problematik im Fall der PROGRESS Thermowand® durch die schützende Funktion der Betonscheibe verhindert. Bei sachgemäßer Ausführung ergibt sich aber für alle drei Wandaufbauten ein ähnlicher Unterhaltungsaufwand.

2.8.2. *Überprüfung der Nutzungsdauer*

Da die einzelnen Außenwandkonstruktionen sich aus einer Vielzahl von einzelnen Komponenten zusammensetzen, kann die Nutzungsdauer nicht so einfach bestimmt werden. Im Zuge dieser Arbeit wird eine einheitliche Nutzungsdauer allerdings dadurch berücksichtigt, dass Bauteilschichten mit geringerer Nutzungsdauer nach überschreiten der Lebensdauer ausgetauscht werden müssen, s. dazu die Ausführung im Abschnitt 3.2. *Lebenszyklus*.

2.8.3. Überprüfung der optischen Eigenschaften

2.8.3.1 PROGRESS Thermowand®

Die beiden schalungsglatten Oberflächen sind gemäß DIN 18217 [17] bereits streich- und tapezierfähig. Das Aufbringen eines Innenputzes kann entfallen, in der Regel wird nur bei Bedarf eine Fleckspachtelung vorgenommen. Der Putzflächenabzug von 3 % der Wohnfläche wie gemäß DIN gefordert muss daher nicht vorgenommen werden, sodass Wohnraum gewonnen werden kann.

2.8.3.2 Holzrahmenbau und Ziegelmauerwerk

Die Oberflächen der beiden Außenwandaufbauten sind optisch gleichwertig. Die Außenseite wird verputzt und kann anschließend mit Anstrich versehen werden. Die Innenseite wird ebenfalls verputzt und kann damit gestrichen oder alternativ mit Tapete verkleidet werden.

2.8.4. Kosten

Zur Ermittlung der Kosten wird das Richtpreisverzeichnis der Provinz Bozen [20] herangezogen. In diesem sind die drei Wandaufbauten als Position enthalten, sodass die Richtpreise je Quadratmeter daraus entnommen werden können. Auch wenn die darin enthaltenen Aufbauten nicht vollkommen den in Abschnitt 2.1 ausgewählten Aufbauten entsprechen, stellt die Größenordnung der Preise eine ausreichende Tendenz dar.

2.8.4.1 PROGRESS Thermowand®

Pos. 02.04.50.02.I: Doppelwand mit integrierter Wärmedämmung: U-Wert 0,19 W/m²K
Preis: 150,50 €/m²

2.8.4.2 Holzrahmenbau

Pos. 18.03.01.01.A: Tragende Außenwand aus Holzständerkonstruktion und Ausfachung mit Dämmung und Putzfassade: U-Wert 0,16 W/m²K
Preis: 198,49 €/m²

2.8.4.3 Ziegelmauerwerk

Pos. 18.02.01.01.D: Tragende Außenwand aus porosierten Hochlochziegeln als Planziegel mit Außendämmputz: U-Wert 0,19 W/m²K
Preis: 157,11 €/m²

Aus den obigen Preisen ist ersichtlich, dass die Massivbauweisen in derselben Preisklasse liegen, während der Holzrahmenbau kostenmäßig deutlich höher angesetzt ist. Es sei jedoch angemerkt, dass diese Preise nicht der einzige Aspekt sind, der aus Kostensicht berücksichtigt werden müsste. Ein wesentlicher Kostenfaktor ist beispielsweise die Errichtungsdauer, die bei Außenwänden in Systembauweise wie im Fall der PROGRESS Thermowand® und der Holzrahmenkonstruktion deutlich geringer liegt.

2.9. Zusammenfassung Bauteileigenschaften

In folgender Tabelle sind zusammenfassend die wichtigsten Kenngrößen der Bauteile angeführt:

Eigenschaft	PROGRESS Thermowand®	Holzrahmenbau	Ziegelmauerwerk
U- Wert [W/m ² K]	0,18	0,18	0,18
Speicherwirksame Masse [kg/m ²]	228,3	49,8	74,7
Schallschutz [dB]	$D_{2m,n,T,w}=55^7$ $R'_w = 64,5$	$R'_w = 36,6$	$R'_w = 51,4$
Wandstärke [cm]	40	31	55
Statische Traglast	ca. 2 MN/m	ca. 0,3 MN/m	ca. 0,6 MN/m
Brandschutz	EI 240	REI 60	REI 120
Unterhaltungsaufwand	-	-	-
Nutzungsdauer	-	-	-
Optisch	Sichtbetonoptik ⁸ / Streich / tapezierfertig	Streich / tapezierfertig	Streich / tapezierfertig
Richtpreis [€/m ²]	150,50	198,49	157,11

Tabelle 1: Überblick Anforderungen an Außenwände

Bei Betrachtung der Daten ist ersichtlich, dass die Massivbauweisen in einigen Punkten erhebliche Vorteile im Vergleich zur Holzbauweise bieten. Besonders hervorzuheben sind die Eigenschaften der PROGRESS Thermowand® in den Bereichen speicherwirksame Masse, Schallschutz, Traglast, Brandschutz und Preis. Trotz einiger Unterschiede in diesen Kenngrößen, die sich aufgrund der verschiedenen Bauweisen begründen, kann die Wahl der drei Wandaufbauten im Sinne einer funktionellen Einheit mit der Bezugsgröße 1 Quadratmeter als angemessen getroffen angesehen werden, was das Ziel dieses Kapitels war.

⁷ Für Außenbauteile gilt gemäß italienischem Ministerialdekret D.P.C.M.05/12/97 die Mindestanforderung $D_{2m,n,T,w} = 40$ dB. Die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz wurde aufgrund Messungen an bestehenden Referenzobjekten nachgewiesen.

⁸ Für die hohen Ansprüche an Sichtbetonoptik ist eine zusätzliche Oberflächenbehandlung erforderlich.

3. SACHBILANZ

In diesem Kapitel 3 wird eine sogenannte Sachbilanz erstellt. Dabei handelt es sich um den ersten Schritt zur Untersuchung des Energiebedarfs der Wandkonstruktionen, indem zu jedem Wandaufbau detaillierte Daten gesammelt werden, um Input- und Outputflüsse quantitativ und qualitativ zu ermitteln.

Dazu ist es erforderlich, sinnvolle Systemgrenzen anzunehmen, die einen räumlichen und zeitlichen Rahmen darüber geben, welche Flüsse Berücksichtigung finden und welche nicht.

Weil jedes Bauteil aus mehreren Komponenten besteht, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen, erzeugt jede dieser Komponenten einen eigenen Input- bzw. Outputfluss, der in diesem Kapitel aufgeschlüsselt nach Bauteil und Komponente angegeben wird.

3.1. Systemgrenzen

Die ausgewählte Systemgrenze umfasst den Prozessablauf von der Rohstoffgewinnung bzw. Verarbeitung der Zuschlagstoffe bis zum fertigen Produkt, so wie es das Werkstor verlässt („Cradle to gate“). Darin inbegriffen sind folglich die Rohstoff- und Energiegewinnung, die Rohstofftransporte ins Werk, die eigentliche Herstellung sowie Herstellung und Entsorgung eventuell benötigter Verpackungen.

Es wird angenommen, dass die Außenwandaufbauten direkt am Werksstandort eingebaut werden bzw. beim Baustoffhändler im Fall des Ziegelmauerwerks. Nicht enthalten ist die Verarbeitung der Außenwände auf der Baustelle (Zuschnitt im Zuge der Montage, Energieaufwand der Montagearbeiten...). Diese ist vernachlässigbar und hat laut den Ausführungen des Büros für Umweltchemie [14], Seite 20, nur einen unwesentlichen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf.

Ebenso wenig wird die Nutzungsphase betrachtet. Diese umfasst z.B. Einflüsse aus Instandhaltungsarbeiten bis zum Energieverbrauch des fertigen Bauwerks. Weil die gleiche Wärmedämmqualität (U-Wert) vorgegeben wurde, ist zu erwarten, dass sich während der Nutzungsphase hinsichtlich des aufzuwendenden Heizenergiebedarfs keine wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Varianten ergeben.

Zudem wird davon ausgegangen, dass in der Phase der Nutzung im Regelfall kaum Instandhaltungsprozesse an den Außenwandaufbauten notwendig sind. Im Falle von größeren auftretenden Alterungs- bzw. Verschleißerscheinungen erfolgt ein Austausch erst am Ende der Nutzungsdauer. Da es sehr schwierig ist, Daten für die angeführten Einflüsse aus der Nutzungsphase zu finden, wird die gesamte Nutzungsphase von dieser Arbeit ausgeschlossen.

Als zusätzliche Betrachtung wird schließlich der Rückbau der Wandelemente nach Erreichen der Nutzungsdauer in der „End of life“-Phase mit einbezogen. Darin inbegriffen ist der Rückbau, die stoffliche Verwertung bzw. Entsorgung entsprechend des jeweiligen Abfallschlüssels.

Zeitlich abgegrenzt ist die Sammlung des Datenmaterials mit einem Kalenderjahr, wobei im Fall der PROGRESS Thermowand® die Materialströme des Jahres 2011 analysiert wurden. Für die beiden anderen Außenwände wurden Annahmen zu gegenwärtig auftretenden Materialströmen getroffen. Aus den Datenbanken wurden für alle drei Außenwandaufbauten die aktuellsten verfügbaren Datensätze verwendet.

3.2. Dauer des Lebenszyklus

3.2.1. Lebensdauer von Bauwerken und baulichen Anlagen

Die Lebensdauer von Bauerzeugnissen ist weitestgehend unterschiedlich, beispielsweise kann die Lebensdauer einer Holzkonstruktion keinesfalls mit jener einer Massivkonstruktion verglichen werden, weil sich beide Produkte durch eine unterschiedliche Lebensdauer und damit durch eine unterschiedliche Nutzungsdauer auszeichnen.

In Europa gilt nach den Bauordnungen der jeweiligen Länder die Anforderung an Bauwerke, dass diese über einen angemessenen Zeitraum gebrauchstauglich sein müssen. Ergänzend dazu sagt die europäische Bauproduktenrichtlinie aus, dass *„mit den Bauprodukten Bauwerke errichtet werden können, die (als Ganzes und in ihren Teilen) unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit gebrauchstauglich sind und hierbei die ... wesentlichen Anforderungen erfüllen, sofern für die Bauwerke Regelungen gelten, die entsprechende Anforderungen enthalten. Diese Anforderungen müssen bei normaler Instandhaltung über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum erfüllt werden....[41]“*

Folglich sind für alle Bauprodukte Angaben zu machen, welche Ansprüche hinsichtlich Dauerhaftigkeit erfüllt werden. Dies stellt den Hersteller vor ein Problem, da die anzuwendenden Grundsätze und Methoden sehr unterschiedlich sind, weil über viele Bauprodukte detaillierte Informationen aufgrund fehlender Erfahrungswerte nicht vorhanden sind. Häufig müssen Annahmen zu Nutzungszeiträumen getroffen werden, die unter Berücksichtigung der ordnungsgemäßen Planung und Ausführung (nach Stand der Technik), Beanspruchung und der erfolgten Durchführung von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten abgeschätzt werden müssen.

Einen Bewertungsansatz der Nutzungsdauer von Bauwerken gibt der Eurocode EN 1990-2002 [42]. Dieser ist überblicksmäßig in folgender Tabelle angeführt:

Klasse der Nutzungsdauer	Planungsgröße der Nutzungsdauer [Jahre]	Beispiele
1	10	Tragwerke mit befristeter Standzeit
2	10 bis 25	Austauschbare Tragwerksteile, z.B. Kranbahnträger, Lager
3	15 bis 30	Landwirtschaftlich genutzte und ähnliche Tragwerke
4	50	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
5	100	Monumentale Gebäude, Brücke und andere Ingenieurbauwerke

Tabelle 2 Vorgaben zur geplanten Nutzungsdauer von Bauwerken oder Bauteilen laut Eurocode 1

An gewöhnliche Bauwerke wird laut obiger Tabelle folglich eine Nutzungsdauer von 50 Jahren gestellt. Dies umfasst im Wesentlichen alle Wohn- und Bürobauten, die mit den drei untersuchten Strukturen verwirklicht werden, sodass diese Dauer als Grundlage der Bewertung übernommen wird.

3.2.2. Nutzungsdauer der einzelnen Bauteilschichten

Um die geforderte Lebensdauer der gesamten Konstruktion zu erreichen, sollen Bauprodukte verwendet werden, die eine entsprechende Lebensdauer aufweisen. Dabei gilt zu beachten, dass jede einzelne Bauteilschicht eine eigene Lebensdauer aufweist. Um Daten hinsichtlich Lebenserwartung zu erhalten, werden folgende Tabellenwerke herangezogen:

- Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten [43]
- Leitfaden nachhaltiges Bauen: Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Liegenschaften [44]

Die in obigen Tabellenwerken enthaltenen Lebenserwartungen beziehen sich auf den bisherigen Erfahrungszeitraum mit diesen Materialien und bieten nur orientierende Richtwerte. Diese planungstechnischen Angaben, die von realen Projekten deutlich abweichen können, werden als Basis für diese Arbeit weiter herangezogen.

Die Lebensdauer der einzelnen Schichten unterscheidet sich teils deutlich. Schichten mit einer Lebensdauer unter 50 Jahren müssen unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2.1 angenommenen Nutzungsdauer ausgetauscht bzw. erneuert werden. In Übereinstimmung mit BNB [45] ist deshalb ein wesentliches Kriterium, ob eine Schicht eine Lebensdauer von unter 50 Jahren aufweist und welche Austauschrate sie hat. Für Schichten mit Lebensdauern von über 50 Jahren ist es damit irrelevant, ob die Lebensdauer beispielsweise 70 oder 80 Jahre beträgt, da stets vom Betrachtungszeitraum 50 Jahre ausgegangen wird.

Weiter gilt zu beachten, dass alle Schichten ausgebaut werden müssen, wenn eine Schicht mit geringerer Lebensdauer darunter liegt. Dies zeigt sich insbesondere bei Betrachtung der Dampfbremse beim Holzrahmenbau. Da die zugehörige Lebensdauer der Dampfbremse nur 40 Jahre beträgt, müsste diese ausgetauscht werden. Dadurch ist auch ein Austausch aller darüber liegenden Schichten – in diesem Fall des Gipskartons und des Innenputzes - notwendig. Das Vorhandensein von solchen Schichten wirkt sich deshalb maßgebend auf die Ergebnisse der Energiebilanz aus. Als weitere Überlegung gilt es zu prüfen, ob bei einem Austausch einer Schicht diese mit der darunterliegenden derart verbunden ist, dass keine schadfreie Demontage möglich ist – dies ist z.B. bei verklebten Baustoffen wie bei Wärmedämmverbundsystemen der Fall.

3.3. PROGRESS Thermowand®

Die einzelnen Bestandteile der PROGRESS Thermowand® werden aus statistischen Jahresdaten der Input- und Outputflüsse ermittelt, die ins Herstellerwerk gelangen bzw. dieses verlassen. Dafür war es nötig, den Produktionsprozess genau kennen zu lernen. Jeder Materialfluss, der zur Herstellung eines Wandelements beobachtet wurde, wurde penibel notiert und anhand statistischer Daten wie z.B. anhand von Ausgangsrechnungen mengenmäßig erfasst. Ebenso war es möglich, durch Kontakte mit den Lieferanten bzw. Herstellern der Inputmaterialien Ursprung und genaue Zusammensetzung zu ermitteln. Das ermöglichte eine sehr detaillierte Erfassung der Input- und Outputflüsse mit hoher Qualität des Datenmaterials, sodass auch sehr kleine Materialflüsse erfasst werden konnten. Das hat zur Folge, dass im Falle der PROGRESS Thermowand® auch Materialströme von unter 1% erfasst wurden – vgl. dazu die Produktgruppenregeln (PCR) von Bauprodukten, die nur die Berücksichtigung von Materialien über 1% der Masse vorschreibt [22]. Als Fertigungsstandort wurde das Werk in Brixen herangezogen.

3.3.1. Materialinput

Im Folgenden werden all jene Materialflüsse angegeben, die zur Herstellung von einem Quadratmeter PROGRESS Thermowand® im Fertigteilwerk erforderlich sind.

3.3.1.1 Beton

Die PROGRESS Thermowände® werden standardmäßig in der Betonfestigkeitsklasse C25/30 vertrieben, auch wenn werkseitig mindestens Betongüte C30/37 zum Einsatz kommt. Die Zusammensetzung des verwendeten Betons C30/37 kann aus der Rezeptur im Lieferantenverzeichnis entnommen werden. Zur Hinterfüllung des statischen Kerns kommt Ortbeton in einem ähnlichen Mischungsverhältnis zum Einsatz. Als Annahme kann daher dieselbe Betonrezeptur herangezogen werden.

Der Beton wird werksintern hergestellt und setzt sich aus nachfolgend angeführten Bestandteilen 3.3.1.2, 3.3.1.3, 3.3.1.4 und 3.3.1.5 zusammen.

3.3.1.2 Gesteinskörnungen (in Schalen und im Ortbeton)

Zur Verwendung kommen ausschließlich natürliche Gesteinskörnungen. Die verwendete Gesteinskörnung aus veränderlicher Zusammensetzung besteht aus 40 bis 60% Granit und ca. 30 bis 50% Glimmerschiefer. Der restliche Teil besteht aus Quarz und Kalk. Zum Teil wird auch Ausbruchmaterial aus einer Tunnelbaustelle verwendet – das ist dann zu 100% Granit. In beiden Fällen werden die Körnungen per Kipp-Lkw ins Werk der PROGRESS gefahren, die Transportentfernung beträgt ca. 12,5 km. Dort erfolgen das Waschen und das Sieben des Materials. Das Waschwasser wird werkseitig wiederverwendet und der Betonherstellung zugeführt, auch wenn es mengenmäßig durch Verdunstung stark reduziert wird. In ca. 15% des Volumens ist ein Brechen des Gesteins erforderlich. Dies erfolgt ebenfalls im Werk.

Alle Rohstoffe sind für die nächsten Jahrzehnte gesichert, es handelt sich um umfangreiche Vorkommen, deren Abbau nach den üblichen Vorschriften erfolgt.

Produkt	Gesteinskörnung	
Hersteller	[A], [B]	
Menge je m ² PTW	182,4 kg (Schalen) + 328,3 kg (Ortbeton)	
Transportentfernung	12,5 km	

Abb. 8: Gesteinskörnungen (1)

3.3.1.3 Wasser (in Schalen und im Ortbeton)

Das benötigte Frischwasser wird aus zwei im Werk gelegenen Tiefbrunnen entnommen. Teilweise wird das im Waschvorgang erhaltene Waschwasser beigemischt.

Produkt	Wasser
Hersteller	-
Menge je m ² PTW	18,8 kg (Schalen) + 33,8 kg (Ortbeton)
Transportentfernung	0 km

3.3.1.4 Zement (in Schalen und im Ortbeton)

Die verwendeten Zemente sind ausschließlich Portlandhüttenzement CEM II A-S und in sehr seltenen Spezialfällen Puzzolanzement CEM IV/A, der z.B. für korrosiv belastete Tanks verwendet wird. Für PROGRESS Thermowände® wird standardmäßig Portlandhüttenzement verwendet, deshalb beziehen sich alle weiteren Ausführungen auf diesen.

Der Portlandzement wird von einem Zementwerk mit Entfernung 154 km bezogen. Dort befindet sich ein Aufmahlwerk des Produzenten. Das Brennen des Zements wird im weiter entfernten Stammwerk (190 km) vorgenommen.

Produkt	Zement	
Hersteller	[C]	
Menge je m ² PTW	36,0 kg (Schalen) + 64,8 kg (Ortbeton)	
Transportentfernung	154 km	

Abb. 9: Zement (2)

3.3.1.5 Fließmittel (in Schalen und im Ortbeton)

Im verwendeten Beton ist auch Fließmittel enthalten. Es handelt sich dabei um Polycarboxylatether. Zur Verwendung kommt ein Produkt, das aus einer Entfernung von 416 km bezogen wird.

Produkt	Fließmittel	
Hersteller	[D]	
Menge je m ² PTW	0,32 kg (Schalen) + 0,58 kg (Ortbeton)	
Transportentfernung	416 km	

Abb. 10: Fließmittel (3)

3.3.1.6 Bewehrungsstahl

Für die einzubauende Mattenbewehrung werden Stahlcoils verwendet, die im Werk vollautomatisch zu Matten verschweißt werden. Beim Bewehrungsstahl handelt es sich um Betonstahl in Ringen, der als Coil aus 225 km Entfernung angeliefert wird. Im Werk erfolgen das Ausrichten und eine weitestgehende automatische Verarbeitung. Die Durchmesser betragen 6, 8 10, 12, 14 und 16 mm. Die durchschnittlich eingebaute Menge an Bewehrungsstahl beträgt 17,9 kg/m² Thermowand.

Produkt	Bewehrungsstahl	
Hersteller	[E]	
Menge je m ² PTW	17,9 kg	
Transportentfernung	225 km	

Abb. 11: Baustahl in Coils (1)

3.3.1.7 Gitterträger

Die eingebauten Gitterträger werden mit 12 m Länge bezogen. Die mittlere Transportentfernung dieser Träger beträgt 253 km (über die eingekaufte Menge gewichteter Mittelwert der Transportentfernungen von drei Zulieferfirmen). Im Werk erfolgt die weitestgehend vollautomatische Weiterverarbeitung zum einbaufähigen Gitterträger.

Die durchschnittlich eingebaute Menge an Gitterträgern und Ankern beträgt 3,6 kg/m² Thermowand.

Produkt	Gitterträger
Hersteller	[F]
Menge je m ² PTW	3,6 kg
Transportentfernung	253 km



Abb. 12: Gitterträger (1)

3.3.1.8 Dämmmaterial

Die Schichtstärke der innenliegenden Dämmung beträgt standardmäßig 12 cm. Die bezogenen Dämmplatten werden werksintern zu einer endlosen Platte verklebt und automatisch auf die erforderliche Größe zugeschnitten. Somit entsteht maximal 5% Verschnitt, das bedeutet einen Verbrauch von 1,05 m² Dämmmaterial pro produziertem m² Thermowand.

Als Dämmmaterial wird ein Paneel aus PUR/PIR verwendet. Das Herstellerwerk liegt in einer Entfernung von 395 km.

Produkt	Dämmmaterial
Hersteller	[G]
Menge je m ² PTW	1,05 m ² (=4,5 kg)
Transportentfernung	395 km



Abb. 13: Dämmstoff (1)

3.3.1.9 Schalöl / Trennmittel:

Im Werk werden Stahlschalungen verwendet. Diese werden vor dem Betoniervorgang mit einem Schalöl benetzt, um ein sauberes Ausschalen mit optisch einwandfreien Sichtoberflächen zu gewährleisten sowie ein Rosten der Schalungen zu verhindern. Zur Verwendung kommt ein Schalöl auf Mineralölbasis, aromatenarm, hergestellt in 416 km Entfernung. Verbrauch: ca. 1 Liter pro 100 m² Stahlschalung, d.h. bei einer Schalungsauslastung von 50% und zwei betonierten Scheiben je Wand entspricht der Verbrauch ca. 4 Liter pro 100 m² produzierter Wand.

Produkt	Schalöl
Hersteller	[H]
Menge je m ² PTW	0,04 l (=0,03 kg)
Transportentfernung	416 km



Abb. 14: Schalöl (1)

3.3.1.10 Abhubanker

In jedes Wandelement werden sogenannte Abhubanker/Transportanker eingebaut. Diese bilden den Angriffspunkt für das Be- und Entladen der Elemente, zum Drehen und für den Einbau. Zur Verwendung kommen glasfaserverstärkte Elemente, die aus 982 km Entfernung bezogen werden. Je m² werden 0,25 Stück eingebaut.

Produkt	Abhubanker
Hersteller	[I]
Menge je m ² PTW	0,25 Stück
Transportentfernung	982 km

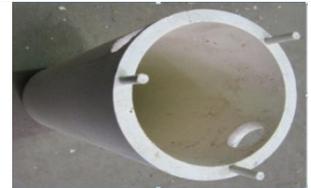


Abb. 15: GFK- Rohr (1)

3.3.1.11 Verbindungsstäbe (Pins)

Die Außen- und Innenschale der PROGRESS Thermowand® müssen bis zum endgültigen Ausbetonieren mit Ortbeton mit einem Element aneinander fixiert werden, das keine Kältebrücke ermöglicht. Zur Verwendung kommen daher Verbindungsstäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Diese werden in 618 km Entfernung hergestellt.

Der Einbau erfolgt im Raster 40x40 cm und daher werden 7 Stück pro m² benötigt.

Produkt	Verbindungsstäbe
Hersteller	[J]
Menge je m ² PTW	7 Stück
Transportentfernung	618 km



Abb. 16: Pin (1)

3.3.1.12 Bewehrungsabstandhalter

Um die Lage der Bewehrung in den beiden Scheiben zu gewährleisten, werden Kunststoffelemente aus PVC verwendet. Diese werden in 618 km Entfernung hergestellt. Es werden 8 Stück pro m² eingebaut.

Produkt	Bewehrungs- Abstandhalter
Hersteller	[K]
Menge je m ² PTW	8 Stück
Transportentfernung	618 km



Abb. 17: Abstandhalter (1)

3.3.1.13 Wandabstandhalter

Wandabstandhalter fixieren die beiden Scheiben in der erforderlichen Toleranz zueinander zusätzlich zu den unter Punkt 3.3.1.11 verwendeten Verbindungsstäben. Es handelt sich dabei um glasfaserverstärkte Elemente, die aus 982 km Entfernung bezogen werden. Je m² Wand wird 1 Stück benötigt.

Produkt	Wandabstandhalter	
Hersteller	[L]	
Menge je m ² PTW	1 Stück	
Transportentfernung	982 km	

Abb. 18: Wandabstandhalter (1)

3.3.1.14 Abstandhalterleisten (Drunterleiste) zwischen Mattenbewehrung und Dämmung

Zwischen Dämmebene und Mattenbewehrung wird eine PVC- Leiste eingebaut, die eine mechanische Beschädigung der Dämmung verhindert. Diese Leisten werden auf Rollen angeliefert und im Werk abgelängt. Die Rollen werden aus 436 km Entfernung bezogen. Je m² Thermowand wird ein Laufmeter eingebaut.

Produkt	Abstands- halterleisten	
Hersteller	[M]	
Menge je m ² PTW	1 lfm	
Transportentfernung	436 km	

Abb. 19: Abstandhalterleiste (1)

3.3.1.15 Elektrische Energie (im Herstellungsprozess im Werk)

Energiemenge:	12,24 kWh pro m ² PTW
- davon für Schotter/ Kiesverarbeitung (elektrisch):	3,46 kWh/m ²
- davon zur Herstellung Beton (elektrisch):	0,94 kWh/m ²
- davon zur Herstellung PTW (elektrisch):	2,80 kWh/m ²
- davon zur Trocknung PTW (Abwärme aus BHKW ⁹):	5,04 kWh/m ²

Bei oben ermittelten Energieverbräuchen handelt es sich um die Durchschnittswerte aus dem Jahr 2011. Herangezogen wurden die Energieverbräuche der betreffenden Umlaufanlage sowie des Beton- und Schotterwerks. Diese wurden durch die im entsprechenden Zeitraum produzierten Mengen dividiert.

⁹ Zur Beheizung der Trockentürme werden 7,20 kWh/m² Wärme benötigt. Dieser Wert muss gemäß ÖNORM EN 15316-4-5 [47] mit dem Primärenergiefaktor für Kraft-Wärme Kopplung aus Blockheizkraftwerken von 0,7 multipliziert werden, sodass sich umgerechnet ein Energiebedarf (elektrisch) von 5,04 kWh/m² ergibt.

3.3.2. Output

Bei der Verarbeitung/Montage von PROGRESS Betonfertigteilen entstehen im Regelfall nur sehr geringe Mengen an Materialresten, sodass neben der einbaufertigen PROGRESS Thermowand® nur geringe Outputmaterialien das Werk verlassen, die im Folgenden angegeben sind.

3.3.2.1 Bauschutt

Pro hergestelltem m² Doppelwand fallen 0,39 kg Bauschutt an. In diesem sind bis zu maximal 10% Verunreinigungen enthalten, (Kat. 3/A, z.B. Styroporabsteller). Dieser Bauschutt wird gesammelt und bis zu zweimal im Monat von einem Recyclingunternehmen abgeholt. Die Transportentfernung zum Sitz des Unternehmens beträgt 26 km.

Produkt	Bauschutt	
Abnehmer	[N]	
Menge je m ² PTW	0,39 kg	
Transportentfernung	26 km	

Abb. 20: Baurestmassen (1)

3.3.3. Vernachlässigte Flüsse

Alle nicht angegebenen Material- und Stoffströme, z.B.

- Holz- und Styroporabsteller
- Zuluft / Abluft (entsteht bei der Herstellung von Betonfertigteilen keine)
- Geräte, Stahlschalungen
- Lärmemissionen (Verhindert durch vollständig eingehauste Produktionsanlagen, d. h. alle Maschinen befinden sich in geschlossenen Hallen.)
- Abwasser (Das Brauchwasser wird im Werk behandelt und wieder dem Produktionsprozess zugeführt.)
- In der Herstellung benötigte Maschinen oder Anlagen wurden bezüglich ihres eigenen Herstellungsprozesses vernachlässigt.

Einen graphischen Überblick über die berücksichtigten Input- und Outputflüsse bietet das Stoffflussdiagramm **7ÜT** im Anhang, das mit der Software STAN 2.5 erstellt wurde.

Eine tabellarische Übersicht der Inputmaterialien ist der im Anhang beigefügten Tabelle **7T1** zu entnehmen.

3.4. Holzrahmenbau

Für den Holzrahmenbau kann nicht dieselbe Vorgehensweise herangezogen werden, weil genaue Materialflüsse nicht zur Verfügung standen. Daher wurde der Wandaufbau der Holzrahmenkonstruktion eines namhaften Fertighausherstellers herangezogen, der laut eigenen Angaben bereits über 15000 Projekte realisiert hat [23]. Dieser Wandaufbau wurde genau analysiert und dabei versucht, alle einzelnen Bestandteile zu ermitteln. Für Ströme, die quantitativ nicht analysiert werden konnten, wurden Annahmen getroffen. Diese umfassen beispielsweise die aufgewendete elektrische Energie für die Zusammensetzung der Holz-Riegelkonstruktion und für enthaltenes Schraubenmaterial. Zur Ermittlung der Transportentfernungen wurden der Sitz des Fertighausherstellers und die Entfernung zu Marktführern der bezogenen Ausgangsprodukte herangezogen, sodass sich plausible Transportwege ergaben.

Als Fertigungsstandort wird das Werk des Fertighausproduzenten herangezogen.

3.4.1. Materialinput

Im Folgenden werden all jene Materialflüsse angegeben, die zur Herstellung von einem Quadratmeter Holzrahmenbau am Fertigungsstandort erforderlich sind.

3.4.1.1 Außenputz

Als Oberputz wird ein Putz auf mineralischer Basis angewendet. Es handelt sich dabei um einen Vollabriebsputz mit Körnung von 1-3. Die Stärke dieser Putzschicht beträgt 0,153 cm, sodass das spezifische Gewicht 2,3 kg/m² beträgt.

Der angenommene Produktionsstandort liegt in 400 km Entfernung.

Produkt	Oberputz
Menge je m ² HR	2,3 kg
Transportentfernung	400 km



Abb. 21: Oberputz (7)

3.4.1.2 Haftvermittler

Der Oberputz wird auf eine Beschichtung aus Haftvermittler aufgebracht. Diese Grundierung hat eine vernachlässigbare Schichtstärke. Aufgebracht wird eine Menge von 0,3 kg/m². Der angenommene Produktionsstandort befindet sich in 500 km Entfernung.

Produkt	Haftvermittler / Isoliergrund
Menge je m ² HR	0,3 kg
Transportentfernung	500 km



Abb. 22: Haftvermittler (8)

3.4.1.3 Unterputz

Als Unterputz kommt ein mineralischer Putzmörtel mit Schichtstärke von 0,33 cm zum Einsatz. Dieser Grundputz soll vorhandene Unebenheiten in der Konstruktion ausgleichen. Die verwendete Menge beträgt 5 kg/m² bei einer angenommenen Transportentfernung von 400 km.

Produkt	Unterputz
Menge je m ² HR	5,0 kg
Transportentfernung	400 km



Abb. 23: Unterputz (7)

3.4.1.4 Armierungsgewebe

Das Armierungsgewebe wirkt wie eine Bewehrung des Putzes. Diese Anwendung ist bei Anbringen eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) erforderlich. Es handelt sich dabei um ein Gewebe aus Textilglas, das in die Putzschicht integriert wird. Inklusive Verschnitt werden ca. 1,1 m² je m² Außenwand benötigt. Der angenommene Produktionsstandort liegt in 600 km Entfernung.

Produkt	Armierungsgewebe
Menge je m ² HR	0,22 kg
Transportentfernung	600 km



Abb. 24: Gewebe (10)

3.4.1.5 Dübelsystem

Zur Befestigung des WDVS wird ein System aus Dübel- und Ankerelementen benötigt. Diese Teile werden aus Kunststoff hergestellt, vereinfachend wird PVC angenommen. Je m² werden 6 Befestigungssets zu je 0,082 g verwendet. Der Sitz des Herstellers dieses Dübelsystems befindet sich 900 km vom Einbauort entfernt.

Produkt	Dübelsystem
Menge je m ² HR	0,05 kg
Transportentfernung	900 km



Abb. 25: Dübelsystem (9)

3.4.1.6 Holzwolleleichtbauplatte

Holzwolle-Leichtbauplatten (auch HWL-Platten genannt) sind Bauplatten, die aus langfaseriger Holzwolle und Bindemitteln auf mineralischer Grundlage bestehen [24]. Diese Dämmschicht weist eine Stärke von 5 cm auf, das Herstellerwerk wird in 400 km Entfernung angenommen.

Produkt	Holzwoleleichtbau- platte	
Menge je m ² HR	18,5 kg	
Transportentfernung	400 km	

Abb. 26: HWLB-Platte (11)

3.4.1.7 Gipsfaserplatte

Die raumabschließende Wirkung der Wandkonstruktion wird durch beidseitige Bepunktung der Holz-Riegelkonstruktion mit Gipskartonplatten hergestellt. Dadurch werden die Anforderungen an Schall- und Brandschutz erfüllt. Außenliegend ist die Anbringung von 1,5 cm und innenliegend von 2,5 cm Gipskartonplatten vorgesehen. Die angenommene Entfernung zum Produktionsstandort beträgt 300 km.

Produkt	Gipsfaserplatte	
Menge je m ² HR	15 + 25 = 40,00 kg	
Transportentfernung	300 km	

Abb. 27: Gipsfaserplatte (12)

3.4.1.8 Konstruktionsholz

Als Konstruktionsholz kommt veredeltes Bauschnittholz zur Anwendung. Daraus werden die vertikalen Steher errichtet, die im Achsabstand 625 mm benötigt werden. Der Querschnitt des Holzes beträgt 60/200 mm. Die angenommene Transportentfernung beträgt 100 km.

Produkt	Konstruktionsholz	
Menge je m ² HR	9,0 kg	
Transportentfernung	100 km	

Abb. 28: Konstruktionsholz (16)

3.4.1.9 Glaswolle

Im entstehenden Zwischenraum der Riegel wird eine Dämmung aus Glaswolle eingebracht. Dabei handelt es sich um einen mineralischen Dämmstoff mit Hauptbestandteil aus Glasfasern. Bei einer Schichtstärke von 20 cm werden so 3,9 kg/m² Glaswolle benötigt. Die angenommene Transportentfernung für diesen Dämmstoff wird mit 500 km angenommen.

Produkt	Glaswolle	
Menge je m ² HR	3,9 kg	
Transportentfernung	500 km	

Abb. 29: Glaswolle (17)

3.4.1.10 Dampfbremse

Um einer Entstehung von schädlicher Feuchtigkeit im Inneren der Konstruktion entgegenzuwirken, ist mindestens der Einbau einer wasserdampfdiffusionsoffenen Folie erforderlich. Zur Anwendung kommt eine einfache Dampfbremse aus einer PE-Bahn mit einer Schichtstärke von ca. 1 mm. Der Sitz des Herstellerwerks wird in 500 km Entfernung angenommen.

Produkt	Dampfbremse	
Menge je m ² HR	1,0 kg	
Transportentfernung	500 km	

Abb. 30: Dampfbremse (18)

3.4.1.11 Innenputz

Innenliegend kommt ein Kalk-Gipsputz zur Anwendung. Bei 1,5 cm Schichtstärke werden 21,8 kg/m² benötigt. Die angenommene Transportentfernung zum Hersteller wird mit 400 km angenommen.

Produkt	Innenputz	
Menge je m ² HR	21,8 kg	
Transportentfernung	400 km	

Abb. 31: Innenputz (15)

3.4.1.12 Schraubenmaterial

Zur Verbindung der einzelnen Elemente ist Schraubenmaterial erforderlich. Da es sehr schwierig ist, mengenmäßige Angaben zu erhalten, wird der Bedarf an Schraubenmaterial mit 18 Schrauben bzw. Winkeln je m² abgeschätzt. Es handelt sich um Schrauben aus Stahl, die in 200 km Entfernung produziert werden.

Produkt	Schraubenmaterial	
Menge je m ² HR	0,25 kg	
Transportentfernung	200 km	

Abb. 32: versch. Stahlschrauben

3.4.1.13 Elektrische Energie (im Herstellungsprozess im Werk)

Über die verwendete Energiemenge, die im Prozess der Zusammensetzung der einzelnen Baumaterialien zur fertigen Wandkonstruktion benötigt wird, können keine präzisen Daten gefunden werden. Daher werden auch hier Annahmen getroffen.

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Konstruktionsbestandteile im Werk mehrfach gehoben und transportiert werden müssen und dass das

Konstruktionsholz passend abgelängt bzw. zugeschnitten werden muss. Selbiges gilt für die Glaswolle. Ebenso ist es erforderlich, Löcher für Verschraubungen vorzubohren sowie den Fertigungsstandort zu beheizen. Zudem erfolgen ein Verleimen und Verschrauben der Bestandteile und schließlich das beidseitige Verputzen der Wand:

Energiemenge:	9,4 kWh pro m ² HR
- davon zum Heben und für Transporte (elektrisch):	2,0 kWh/m ²
- davon zum Zuschnitt Glaswolle (elektrisch):	1,0 kWh/m ²
- davon für Bohren + Verschrauben HWLB-Platte (elektrisch):	0,2 kWh/m ²
- davon für Zuschnitt + Verschrauben Holzriegel: (elektrisch):	1,5 kWh/m ²
- davon für Beplankung mit Gipskarton (elektrisch):	0,3 kWh/m ²
- davon für Verleimen und Verputzen (elektrisch):	3,0 kWh/m ²
- davon zur Beheizung (Abwärme aus BHKW ¹⁰):	1,4 kWh/m ²

3.4.2. Output

Neben der einbaufertigen Außenwand in Holzrahmenbauweise konnten keine weiteren Outputmaterialien ermittelt werden.

3.4.3. Vernachlässigte Flüsse

Alle nicht angegebenen Material- und Stoffströme, z.B.

- problematische Abluft (z.B. Dämpfe aus Verleimen)
- Lärmemissionen
- Abwasser / Brauchwasser
- Im Herstellungsprozess fallen Sägespäne, Dämmstoffreste, Putzreste... an. Mengemäßig können diese nicht abgeschätzt werden, aufgrund ihrer geringen Masse werden sie vernachlässigt.
- In der Herstellung benötigte Maschinen oder Anlagen wurden bezüglich ihres eigenen Herstellungsprozesses vernachlässigt.

Einen graphischen Überblick über die berücksichtigten Input- und Outputflüsse bietet das Stoffflussdiagramm **➤ÜH** im Anhang, das mit der Software STAN 2.5 erstellt wurde.

Eine tabellarische Übersicht der Inputmaterialien ist der im Anhang beigefügten Tabelle **➤H1** zu entnehmen.

¹⁰ Zur Beheizung der Werkshalle werden laut Annahme 2,0 kWh/m² Wärme benötigt. Dieser Wert muss gemäß ÖNORM EN 15316-4-5 [47] mit dem Primärenergiefaktor für Kraft-Wärme Kopplung aus Blockheizkraftwerken von 0,7 multipliziert werden, sodass sich umgerechnet ein Energiebedarf (elektrisch) von 1,40 kWh/m² ergibt.

3.5. Ziegelmauerwerk

Auch für die Erstellung des Ziegelmauerwerks wurde eine analoge Vorgangsweise zum Holzriegelbau angewendet. Annahmen mussten bezüglich Energiebedarf zur Herstellung des Mauerwerks aus den Inputmaterialien getroffen werden. Hervorzuheben ist, dass die Transportwege für das Ziegelmauerwerk deutlich länger sind, da die Ziegel in der Regel vom Herstellerwerk zuerst an einen Baustoffhändler geliefert werden müssen und folglich der Fertigungsstandort nicht dem Standort des Baustoffhändlers entspricht. Die PROGRESS Thermowand® bzw. der Holzriegelbau werden im Gegensatz dazu direkt vom Produktionsstandort zur Baustelle geliefert.

3.5.1. Materialinput

Im Folgenden werden all jene Materialflüsse angegeben, die zur Herstellung von einem Quadratmeter Ziegelmauerwerk am Sitz des Baustoffhändlers erforderlich sind.

3.5.1.1 Außenputz

Weil die Ziegelkonstruktion allein die Wärmedämmeigenschaften nicht erreicht, wird die Wand mit 4 cm starkem Wärmedämmputz versehen. Dabei handelt es sich um einen Putzmörtel, dem als Zuschlag EPS beigemischt wurde. Als Transportentfernung zum Hersteller werden 400 km angenommen.

Produkt	Wärmedämmputz
Menge je m ² ZM	8,8 kg
Transportentfernung	400 km

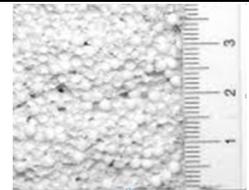


Abb. 33: Wärmedämmputz (14)

3.5.1.2 Keramische Hochlochziegel

Das Mauerwerk wird aus keramischen Hochlochziegeln mit planparallel geschliffenen Lagerflächen errichtet. Die Abmessungen der Ziegel betragen 50/24/24,9 cm. Daher werden ca. 16 Stück Ziegel je Quadratmeter Wand benötigt. Das Herstellerwerk der Ziegel wird in 500 km angenommen.

Produkt	Hochlochziegel
Menge je m ² ZM	313,6 kg
Transportentfernung	500 km



Abb. 34: Hochlochziegel Porotherm (19)

3.5.1.3 Dünnbettmörtel

Versetzt werden die Ziegel mit Dünnbettmörtel, der in eine Lagerfuge von 1 mm Dicke aufgebracht wird. Die Transportentfernung zum Hersteller wird mit 400 km angenommen.

Produkt	Dünnbettmörtel	
Menge je m ² ZM	10,4 kg	
Transportentfernung	400 km	

Abb. 35: Mörtelbett (13)

3.5.1.4 Innenputz

Innenliegend kommt ein Kalk-Gipsputz zur Anwendung. Bei 1,5 cm Schichtstärke werden 21,8 kg/m² benötigt. Die angenommene Transportentfernung zum Hersteller beträgt 400 km.

Produkt	Innenputz	
Menge je m ² ZM	21,8 kg	
Transportentfernung	400 km	

Abb. 36: Innenputz (15)

3.5.1.5 Energie

Über die verwendete Energiemenge, die im Prozess der Zusammensetzung der einzelnen Baumaterialien zur fertigen Wandkonstruktion benötigt wird, können keine präzisen Daten gefunden werden. Daher werden auch hier Annahmen getroffen.

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Ziegel auf der Baustelle angehoben und transportiert werden müssen, dass Passtücke passend abgelängt bzw. zugeschnitten werden müssen. Selbiges gilt für den Mörtel. Dieser muss noch zusätzlich mit Anmachwasser vermischt werden. Weitere Energie wird für das beidseitige Verputzen der Wand benötigt.

Energiemenge:	5,3 kWh pro m ² ZM
- davon zum Heben und für Transporte (elektrisch):	3,0 kWh/m ²
- davon zum Zuschnitt Ziegel (elektrisch):	0,2 kWh/m ²
- davon zum Anmischen Putz + Mörtel (elektrisch):	1,0 kWh/m ²
- davon Aufbringung Putz: (elektrisch):	1,0 kWh/m ²
- davon zur Beheizung (Abwärme aus BHKW ¹¹):	0,1 kWh/m ²

¹¹ Für Heizzwecke werden laut Annahme 0,2 kWh/m² Wärme benötigt. Dieser Wert muss gemäß ÖNORM EN 15316-4-5 [47] mit dem Primärenergiefaktor für Kraft-Wärme Kopplung aus Blockheizkraftwerken von 0,7 multipliziert werden, sodass sich umgerechnet ein Energiebedarf (elektrisch) von 0,14 kWh/m² ergibt.

3.5.2. *Output*

Neben der einbaufertigen Außenwand in Ziegelbauweise konnten keine weiteren Outputmaterialien ermittelt werden.

3.5.3. *Vernachlässigte Flüsse*

Alle nicht angegebenen Material- und Stoffströme, z.B.

- Problematische Abluft
- Lärmemissionen
- Abwasser / Brauchwasser
- Im Herstellungsprozess fallen Baurestmassen aus Ziegelabbruch, Mörtelresten usw. an. Mengenmäßig können diese nicht abgeschätzt werden, daher werden sie vernachlässigt.
- In der Herstellung benötigte Maschinen oder Anlagen wurden bezüglich ihres eigenen Herstellungsprozesses vernachlässigt.

Einen graphischen Überblick über die berücksichtigten Input- und Outputflüsse bietet das Stoffflussdiagramm **7ÜZ** im Anhang, das mit der Software STAN 2.5 erstellt wurde.

Eine tabellarische Übersicht der Inputmaterialien ist der im Anhang beigefügten Tabelle **7Z1** zu entnehmen.

4. ENERGIEBILANZ

In diesem Kapitel erfolgt die Zuordnung der in Kapitel 3 gesammelten Input- und Outputmaterialien zu deren Energiefaktoren. Dabei handelt es sich um Kennzahlen, die aus Datenbanken entnommen werden. Diese Kennzahlen geben Information darüber, welcher Primärenergieaufwand der Herstellung einer Einheit eines bestimmten Materials zugeordnet wird, sodass die Energiebilanz durch Multiplikation der Materialmenge mit der entsprechenden Kennzahl erhalten werden kann.

Für diese Vorgangsweise müssen grundlegende Definitionen und Abgrenzungen angeführt werden. Anschließend wird kurz auf die verwendeten Datenbanken und deren Charakteristiken eingegangen und schließlich die Energiebilanz für die drei Außenwandaufbauten in tabellarischer Form erstellt.

4.1. Begriffsdefinitionen

4.1.1. Generische Daten

„Generisch“- aus dem griechischen für „allgemein“ beschreibt bereits ziemlich eindeutig, dass es sich bei diesen Daten nicht um spezifische Basisdaten handeln kann. Vielmehr sind mit dem Begriff „generische Daten“ repräsentative Mittelwerte gemeint, die sich laut Klöpffer und Grahl, [37], Seite 134 *„immer auf der spezifischen Analyse der Stoff- und Energieströme in definierten Anlagen beruhen. Sie sind über die Bildung sinnvoller Mittelwerte so aufbereitet, dass sie [...] in einer Ökobilanz brauchbar sind.“*

Im Zuge dieser Energiebilanz werden solche generischen Daten in Form von Kennzahlen aus Datenbanken bezogen.

4.1.2. KEV und KEA

Der **KEV** (Kumulierter Energieverbrauch) gibt *„die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann.“* [40] Konkret werden die Massen dieser Materialien selbst deshalb nicht mit einbezogen und müssten z.B. für die Erstellung einer Rohstoffbilanz zusätzlich berücksichtigt werden. Somit ist der KEV ein Maß für die energiebedingte Umweltbelastung. Häufig wurde im deutschsprachigen Raum der KEV auch mit dem Begriff „graue Energie“ gleichgesetzt.

Der **KEA** (Kumulierter Energieaufwand) hingegen bezieht laut VDI-Richtlinie 4600 neben dem Primärenergieaufwand auch die stofflich genutzten Energiemengen mit ein. Dieser „vergegenständlichte Heizwert“ sowie die Entsorgungsaufwände werden

mit einbezogen, weil auch diese zur Herstellung eines Produktes aufgewendet werden müssen. Dabei sind hier auch Gutschriften aus stofflich genutzten Energieträgern (z. B. für die Energierückgewinnung aus Holz) eingerechnet.

Durch die unterschiedlichen Definitionen stellt der KEV eine Größe mit starkem Emissionsbezug dar, der KEV mit Ressourcenbezug. In dieser Arbeit wird eine Energiebilanz erstellt, die stofflich gebundene Energie miteinschließt. Daher wird der KEA verwendet während der KEV nicht herangezogen wird.

4.1.3. PEI

Die Abkürzung PEI steht für den Primärenergieinhalt eines Materials. Darin inkludiert ist der Energieverbrauch, der zur Herstellung eines Produktes aufgewendet werden musste. Laut der Homepage Baunetzwissen [39] weist er *„die graue Energie eines Baustoffes aus, beschreibt also die zur Herstellung verbrauchte Energie. Dabei wird zwischen erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energie unterschieden.“*

4.2. Abgrenzung der verwendeten generischen Daten

Bei der Auswahl der generischen Daten wurde große Aufmerksamkeit auf die Übereinstimmung dieser in den Systemgrenzen gelegt. Die Kriterien, nach denen die Auswahl der Daten getroffen wurden, sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

4.2.1. Inhaltliche Konsistenz

Es wurde nur Datenmaterial herangezogen, das in seinen Systemgrenzen konsistent war. Dies bedeutet, dass die Daten von Materialien nur dann verwendet werden konnten, wenn alle Prozesse von der Rohstoffgewinnung bis zum Ende der Produktionsphase bilanziert wurden („Cradle to gate“).

Große Sorgfalt wurde zudem auf jene Materialien gelegt, die als Rohmaterial bereits Energie enthalten, die nicht aus der Herstellung resultiert (wie z.B. Erdöl, das sowohl zur Energieerzeugung als auch stofflich als Bestandteil von Kunststoffen verwendet werden kann). Diese Rohstoffenergie wird in den verschiedenen Datenbanken teils mitberücksichtigt und teils nicht, weil sie nach der thermischen Verwertung ja wieder zur Verfügung steht und im Produkt nur über einen bestimmten Zeitraum gebunden wurde, vergleiche dazu auch die Ausführungen des Büros für Umweltchemie [14], Seite 3. Sofern nicht gesondert angegeben, wurden nur Daten mit inkludierter Rohstoffenergie verwendet. Kennzahlen von Datenbanken, welche die rohstoffgebundene Energie nicht enthielten, wurden mit der Rohstoffenergie des jeweiligen Materials beaufschlagt.

4.2.2. Räumliche Konsistenz

Bei Vorhandensein von Daten aus Deutschland wurden diese bevorzugt verwendet, weil der Schwerpunkt der meisten der verwendeten Datenbanken in Deutschland lag. Ansonsten kam Datenmaterial mit Bezug zu Europa zur Verwendung. In einzelnen Ausnahmefällen wurden Datensätze mit Bezug auf Italien, Österreich, Schweiz oder das Vereinigte Königreich verwendet.

4.2.3. Zeitliche Konsistenz (Alter des Datenmaterials)

Nach Möglichkeit wurden die aktuellsten Datensätze aus dem Jahr 2012 herangezogen. Sofern diese obige Kriterien nicht erfüllten, wurde in absteigender Reihenfolge auch älteres Material aus den vorhergegangenen Jahren verwendet.

4.2.4. Übereinstimmung des Recyclinganteils

Besonders bei Metallen (hervorzuheben ist der Stahl) wurde darauf geachtet, dass jene Daten herangezogen wurden, die im Herstellungsprozess von einem Recyclinganteil ausgehen, der mit dem realen Recyclinganteil übereinstimmt. So wurde beispielsweise Datenmaterial mit in Italien vorherrschendem Recyclinganteil verwendet, da auch in der PROGRESS Thermowand® italienischer Stahl eingebaut wird.

4.3. Verwendete Datenbanken

Da die Verwendung einer einzigen Datenbank zu ungenau eingeschätzt wurde bzw. keine gefunden werden konnte, die alle in den Abschnitten 3.3, 3.4, und 3.5 ermittelten Materialien enthielt, wurden unterschiedliche Datenbanken herangezogen. Im Folgenden sind die verwendeten Datenbanken kurz beschrieben.

4.3.1. Graue Energie von Baustoffen [I]

Bei dieser Datenbank handelt es sich um ein Tabellenwerk, das vom Schweizer Büro für Umweltchemie ab dem Jahre 1995 herausgegeben wurde. Neben der grauen Energie von zahlreichen Baumaterialien sind in dieser Unterlage auch ausführliche Erklärungen und Hintergrundinformationen zum Datenmaterial enthalten.

Das Datenmaterial weist teils Bezug zum Schweizer Markt auf, wobei allerdings für Transportleistungen europäische Durchschnittswerte verwendet wurden. Die enthaltenen Daten beinhalten nur die Anteile der nichterneuerbaren Energie einschließlich Wasserkraft. Angaben zum Anteil erneuerbarer Energien werden keine gemacht.

Dieses Tabellenwerk ist anschaulich aufgebaut und relativ kompakt, sodass es optimal als Basis für weitere Betrachtungen herangezogen werden kann. Eine

genauere Spezifizierung der Datensätze sowie Angaben zum Anteil erneuerbarer Energie konnten allerdings nicht entnommen werden.

4.3.2. Bath Inventory of Carbon and Energy (ICE) [II]

Diese Datenbank ist frei verfügbar und gibt speziell auf Baumaterialien abgestimmt die enthaltene Energie sowie den enthaltenen Kohlenstoff an. Die Daten wurden aus öffentlich zugänglichen Datenquellen wie z.B. LCA's, Fachartikel, Bücher usw. entnommen, sodass insgesamt über 1700 Datensätze zur Verfügung stehen. Öffentlich zugänglich ist allerdings nur das ICE- eine Zusammenfassung mit Einteilung in 34 Hauptmaterialgruppen.

Die im ICE enthaltenen Daten beziehen sich auf die Prozesse „Cradle to gate“, d.h. dass Transporte für jeden einzelnen Anwendungsfall zusätzlich zu berücksichtigen sind. Der Großteil der Daten wurde mit Bezug auf Europa ermittelt, einige wenige Daten beziehen sich speziell auf das Vereinigte Königreich. Aus dieser Datenbank entnommen wurden nur die zutreffenden Daten über die graue Energie, die laut dem Verfasser des ICE mit größerer Sorgfalt ermittelt wurden. Die Kennzahlen der grauen Energie dieser Datenbank enthalten ebenso die Rohstoffenergie (mit Ausnahme von Holzprodukten, diese wurden mit dem erneuerbaren spezifischen Heizwert von Holz von 18,72 MJ/kg beaufschlagt).

4.3.3. Ökobau.dat [III]

Ökobau.dat ist eine frei zur Verfügung gestellte Baustoffdatenbank, die vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung Deutschland über das Informationsportal Nachhaltiges Bauen zum Download bereit gestellt wird.

Die rund 950 Datensätze enthalten nicht nur die graue Energie von Baustoffen (aufgeschlüsselt in erneuerbare Energie, nicht erneuerbare Energie sowie Sekundärenergie¹²), sondern auch vielfältige Daten hinsichtlich globaler ökologischer Wirkungen. Diese Daten basieren wiederum auf der Datenbank GaBi 2011.

Jeder Datensatz wird mit Angaben von Bezugseinheit, Gültigkeitsdauer und Datenqualität vervollständigt, sodass für diese Arbeit die Datensätze mit größter Übereinstimmung gemäß Abschnitt 4.2 herangezogen werden konnten. Die entnommen Kennzahlen beziehen sich auf die Prozesse „Cradle to gate“ mit Bezug auf Europa oder Deutschland.

Ökobau.dat ist eine sehr umfassende Datenbank und erwies sich im Zuge dieser Arbeit als die vollständigste aller verwendeten Datenbanken, sodass für die Betrachtung der Entsorgungsphase ausschließlich die „End of life“ - Datensätze von Ökobau.dat herangezogen wurden.

¹² Die Daten der enthaltenen Sekundärenergie werden in dieser Arbeit als nicht erneuerbare Energie betrachtet.

4.3.4. ProBas –Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente [IV]

ProBas ist ein Projekt des Umweltbundesamtes Deutschland, das eine im Internet kostenlos zugängliche Datenbank für Daten zum Umweltmanagement, zu Ökobilanzen und Stoffstromanalysen erstellt. Die enthaltenen Daten basieren wiederum auf Datenbanken wie Ecoinvent, GEMIS und anderen.

ProBas stellt eine Bibliothek für Lebenszyklusdaten mit über 8.000 Datensätzen dar, die hauptsächlich Themen wie Energie und Transporte betreffen. Ein Teil der Datensätze betrifft auch Materialien und Produkte mit Angabe der Inputenergie zur Herstellung, angegeben in KEA oder KEV gemäß Abschnitt 4.1.2 und aufgeschlüsselt in erneuerbare Energie, nicht erneuerbare Energie sowie andere Energie¹³). Für diese Arbeit werden die Energiekennzahlen des KEA und folglich inklusive rohstoffgebundener Energie herangezogen. Die Daten werden mit dem Ortsbezug Europa oder Deutschland ausgewählt.

Probas ist als Datenbank nicht auf Baustoffe abgestimmt, weshalb viele der benötigten Materialien in dieser Datenbank nicht enthalten sind.

4.3.5. Homepage *bauumwelt.de* [V]

Diese Homepage wird vom Institut Bauen und Umwelt e.V. aus Königswinter betrieben. Dieses Institut vereint zahlreiche Hersteller von Baustoffen, die für deren Produkte eine LCA bzw. EPD erstellen ließen. Diese Umweltproduktdeklarationen können kostenlos von der Homepage heruntergeladen werden.

Aus diesen Deklarationen können für den jeweiligen Baustoff die Daten der enthaltenen grauen Energie, aufgeschlüsselt in nicht erneuerbar und erneuerbare Energie bezogen werden.

Alle entnommenen Datensätze beziehen sich auf „Cradle to gate“ und örtlich auf den Sitz des Herstellers, der in der Regel in Deutschland liegt. Diese Datenbank enthält ausschließlich verkaufsfertige Produkte, sodass sie für den Wandaufbau der PROGRESS Thermowand® nicht herangezogen werden kann: Die benötigten EPD's mit Daten für zahlreiche Materialien (Sand, Kies, Wasser, Transport, Energie...) sind nämlich nicht verfügbar.

4.3.6. Bilan Produit [VI]

Bei Bilan Produit handelt es sich nicht um eine eigenständige Datenbank, sondern um eine Software, die auf dem Programm Excel basiert. Herausgegeben wurde die Software im Jahr 2008 von der Agentur für Umwelt und Energiemanagement ADEME Frankreich in Zusammenarbeit mit der Universität Cergy-Pontoise.

Die Software ermöglicht die mengenmäßige Eingabe von einzelnen Stoffen oder Materialien, die dann den globalen Umweltdaten zugewiesen werden. Diese Daten wiederum basieren auf der Datenbank Ecoinvent Version 2.0. Die Software erstellt

¹³ Die Daten der enthaltenen anderen Energie werden in dieser Arbeit als nicht erneuerbare Energie betrachtet

nach Eingabe aller Materialien, Transporte usw. bereits eine Auswertung im Sinne einer LCA. Sie liefert Ergebnisse zu den ökologischen Wirkungen der einzelnen Materialien, aufgeschlüsselt in unterschiedliche Wirkungskategorien (z.B. Ressourcenverbrauch, Treibhauspotential usw.).

Leider ist die Dateneingabe in diese Software sehr aufwändig, zudem werden nur die Daten der Wirkungskategorie nicht erneuerbare Energie ausgegeben, während die Anteile der erneuerbaren Energie unbeachtet bleiben. Für diese Arbeit wurde diese Software daher nur für den Aufbau der PROGRESS Thermowand® herangezogen.

4.3.7. Homepage dataholz.com [VII]

Auf dieser Homepage der Holzforschung Austria sind für verschiedenste Außenwandaufbauten aus Holz ökologische Bewertungen angegeben. So können verschiedene Wirkungskategorien abgelesen werden, darunter auch der Primärenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar. Für den Außenwandaufbau der Holzrahmenkonstruktion ist auf der Homepage ein analoger Aufbau vorhanden, sodass die betreffenden Daten von dort übernommen werden können.

4.3.8. Baubook [VIII]

Baubook ist eine Onlineplattform, in der Kataloge mit bauphysikalischen und bauökologischen Richtwerten kostenlos zur Verfügung gestellt werden. In diesen Katalogen sind Kennwerte zur Berechnung von Energie- und Ökokennzahlen enthalten, wobei die fachliche Verantwortung für die bauökologischen Richtwerte beim IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH liegen und großteils auf Basisdaten aus Ecoinvent Version 2.1. beruhen.

Aus dem Online- Katalog können die Daten der nicht erneuerbaren, grauen Energie entnommen werden, die sich auf die Prozesse „Cradle to gate“ beziehen mit örtlichem Bezug Österreich oder Europa. Diese Datenbank wird aufgrund der Unvollständigkeit nur für die Außenwand in Ziegelbauweise herangezogen.

4.4. Methodische Vorgangsweise

Für alle Materialien wurden aus den Datenbanken generische Daten gesammelt.

Die Berechnung erfolgt pro Baustoff bzw. pro Bauteilschicht, indem die jeweilige Masse mit den Kennzahlen für Produktion und „End-of-life“-Phase multipliziert und aufsummiert wird.

Für die drei Außenwandaufbauten wurden unterschiedliche Datenbanken – je nach Eignung – verwendet, wobei mindestens fünf verschiedene Datenbanken für jeden Aufbau verwendet wurden. Als zusätzliches Kriterium wurde festgelegt, dass mindestens vier von diesen fünf Datenbanken für alle Wandaufbauten dieselben sein sollten (Datenbanken [I] Graue Energie, [II] Bath, [III] Ökobau.dat und [IV]

Probas). Ein zusammenfassender Überblick über die Datenbanken und ihre Verwendung ist in nachfolgender Tabelle ersichtlich.

Datenbank	PROGRESS Thermowand®			Holzrahmenbau			Ziegelmauerwerk		
	N.E. ¹⁴	E. ¹⁵	T. ¹⁶	N.E. ¹⁴	E. ¹⁵	T. ¹⁶	N.E. ¹⁴	E. ¹⁵	T. ¹⁶
Graue Energie [I]	✓			✓			✓		
Bath (ICE) [II]			✓			✓			✓
Ökobau.dat [III]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ProBas [IV]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
bauumwelt.de [V]				✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bilan Produit [VI]	✓								
dataholz.com [VII]				✓	✓	✓			
Baubook [VIII]							✓		

Tabelle 3: Übersicht über die verwendeten Datenbanken

Die aus diesen Datenbanken gewonnenen Energiefaktoren wurden im Sinne von generischen Daten gemittelt und anschließend deren Durchschnittswerte für die weitere Untersuchung herangezogen.

In den dem Anhang beigefügten Tabellen **AT2**, **AH2** und **AZ2** sind die entnommenen Werte dieser Untersuchung dargestellt.

4.5. Exkurs zur Verwendung von generischen Daten

Die Methodik dieser Arbeit beinhaltete die Sammlung und Verwertung von möglichst vielen Daten aus Datenbanken. Bei dieser Vorgehensweise wurde beobachtet, dass das Datenmaterial in den Datenbanken teils erheblich voneinander abweicht. So wurde festgestellt, dass bestimmte Daten trotz gleicher Systemabgrenzungen deutlich vom Mittelwert der übrigen Datenbanken abweichen, angeführt sei beispielsweise ein Tonziegel, der in der Datenbank von Ecoinvent mit einem Primärenergiebedarf von 2,59 MJ/kg angegeben ist, in der Datenbank von EPD aber mit nur 1,39 MJ/kg, vgl. dazu Paleari [48], Seite 13, und damit mit über 80% abweicht.

In dieser Arbeit wurden deshalb Daten mit prozentuellen Abweichungen von über 50% nicht verwendet. Als Ergebnis wurde folglich ein repräsentativer Mittelwert von generischen Daten herangezogen. Klarerweise wirft diese Vorgehensweise nun die Frage auf, ob die Verwendung von generischen Daten für die Zielsetzung dieser Arbeit sinnvoll bzw. überhaupt brauchbar ist.

Dazu wurde im Fall des Betons eine gesonderte Untersuchung durchgeführt. Einerseits wurde der generische Datensatz für Ortbeton aus den Datenbanken

¹⁴ Kennzahlen zur enthaltenen nicht erneuerbaren Energie

¹⁵ Kennzahlen zur enthaltenen erneuerbaren Energie

¹⁶ Kennzahlen ohne Aufschlüsselung erneuerbar / nicht erneuerbare Energie

bezogen. In einem zweiten Schritt wurden die Inhaltsstoffe des Ortbetons, der im Unternehmen PROGRESS verwendet wird, anhand seiner Rezeptur ermittelt. Die Inhaltsstoffe wurden mengenmäßig bestimmt sowie deren Produktionsstandorte ermittelt. Anhand der Massen, der Transporte und der Materialien wurden anschließend wiederum die Datensätze für die Inputmaterialien herangezogen. So konnte der Energiebedarf der Vorketten des Ortbetons von PROGRESS ermittelt werden, der den generischen Daten der Datenbanken gegenübergestellt werden kann. Die betreffenden Kennzahlen sind in Tabelle 7T2 im Anhang in roter Farbe markiert und in untenstehender *Tabelle 4* überblicksmäßig zusammengefasst:

		Quelle:	Quelle:	Quelle:	Quelle:
		Graue Energie [I]	Bath: Totale Primärenergie [II]	Ökobau.dat [III]	PROBAS: KEV [IV]
		N.E	Σ	Σ	Σ
generische Daten	[MJ/BE]	0,85	0,95	0,77	0,96
Ortbeton PROGRESS	[MJ/BE]	1,01	0,87	0,79	0,89

Tabelle 4: Überblick über die entnommenen Kennzahlen aus den Datenbanken und den selbst errechneten Kennzahlen für Ortbeton.

Aus dieser Betrachtung ist ersichtlich, dass die Kennzahlen keine Tendenz aufweisen. In Abhängigkeit von der betrachteten Datenbank sind diese entweder zu gering oder zu hoch angegeben. Wenn von der Datenbank „Graue Energie [I]“ abgesehen wird, die keine Angaben zum erneuerbaren Energieanteil angibt, dann liegen die Abweichungen maximal bei +-8%. Dieser geringe Unterschied kann somit als vernachlässigbar angesehen werden, sodass die Wahl von generischen Daten zulässig scheint.

Zudem muss angemerkt werden, dass selbst spezifische Daten immer eine gewisse natürliche Unsicherheit aufweisen. Der Wechsel von Zulieferern ist in der produzierenden Industrie beispielsweise eine durchaus gängige Praxis, auch mehrmals im Jahr. Besonders klar verdeutlicht wird dies im Fall von Baustahl. Dieser unterliegt sehr starken Preisschwankungen, sodass auch innerhalb eines Produkts wie der PROGRESS Thermowand® Stähle wechselnder Lieferanten verwendet werden, weil viele Stahlteile beim wirtschaftlichsten Anbieter mit langer Vorhaltezeit bestellt und auf Lager gehalten werden. Eine detaillierte Aufschlüsselung ist daher nur über das Jahresmittel sinnvoll und enthält selbst dann noch Ungenauigkeiten. Ein weiteres Problem schließt jene Materialien ein, deren Herkunft bzw. deren Ausgangsrohstoffe unbekannt sind. Viele Materialien werden über Zwischenhändler vertrieben, sodass deren Ursprung nicht immer ermittelt werden kann. In allen diesen Fällen ist die Verwendung generischer Daten daher sinnvoll, sofern die Systemgrenzen zum Großteil übereinstimmen, vergleiche dazu auch Klöpffer und Grahl, [37] Seite 135.

5. ERGEBNISSE

Dieses Kapitel 5 befasst sich mit den Ergebnissen aus der Energiebilanz in Kapitel 4. Die Auswertung erfolgt durch graphische Darstellungen und Tabellen, die die unterschiedlichen Energieaufwände in den verschiedenen Produktions- und Entsorgungsphasen abbilden.

Zudem erfolgt eine Aufschlüsselung der drei Außenwandkonstruktionen nach ihren Bestandteilen, um aufzuzeigen, an welcher Stelle sich energetische Optimierungspotentiale für die Bauteilherstellung ergeben.

5.1. Begriffsdefinitionen

Die Ergebnisse der Untersuchung des Energiegehalts werden mit folgenden Kenngrößen angegeben:

5.1.1. *M.P.N.E*

Die Abkürzung M.P.N.E steht für „**Mittelwert Produkt Nicht Erneuerbar**“. Dabei handelt es sich um das Produkt aus Masse und dem beinhalteten nicht erneuerbarem Energiebedarf des jeweiligen Materialinputs. Die Angabe erfolgt in [MJ]. Darin eingeschlossen ist, je nach verwendeter Datenbank, der nicht erneuerbare KEA bzw. PEI gemäß Definition in Abschnitt 4.1.2 und 4.1.3.

5.1.2. *M.P.E*

Diese Abkürzung steht für „**Mittelwert Produkt Erneuerbar**“. Analog zu Punkt 5.1.1 wird darin der Mittelwert aus dem Produkt von Masse und Energiegehalt des jeweiligen Inputmaterials angegeben, allerdings in diesem Fall der erneuerbare Energiebedarf, der zur Herstellung bzw. Entsorgung des Materials aufgewendet werden muss. Die Angabe erfolgt in [MJ].

5.1.3. *M.P.N.E+ M.P.E*

Dieser Wert ist der gesamte Energiegehalt, also die Summe aus dem Anteil an nicht erneuerbarer Energie und erneuerbarer Energie. Die Angabe erfolgt in [MJ]. Aufgrund der Mittelwertbildung aus Kennzahlen von verschiedenen Datenbanken, die teilweise nur Energiefaktoren zu erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Anteilen enthielten, kann dieser Wert von der mathematischen Summe aus M.P.E. und M.P.N.E. abweichen.

5.2. Auswertung Produktionsstadium

Im Produktionsstadium wird zuerst der Energiebedarf ermittelt, der sich aus der einmaligen Errichtung der Wand ergibt. Anschließend wird jedem Material bzw. jeder Bauteilschicht eine Nutzungsdauer zugeteilt. Diese Zuteilung erfolgte in Übereinstimmung mit Unterlagen des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen [46] sowie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesens [43]. Anhand der ermittelten Nutzungsdauer konnte dann jeder Bauteilschicht eine Anzahl von erforderlichen Zyklen zugeordnet werden, um die in Abschnitt 3.2 definierte Lebensdauer von 50 Jahren der Außenwandkonstruktion zu gewährleisten. Diese Zuordnung ist aus den im Anhang angefügten Tabellen **7T2**, **7H2** und **7Z2** zu entnehmen.

Somit ergeben sich bei Auswertung der grauen Energie in der Produktionsphase zwei unterschiedliche Betrachtungen.

Folgende Tabellen geben eine Übersicht über die aufgewendete Energie der drei Wandaufbauten, aufgeschlüsselt in nicht erneuerbare und erneuerbare Energie.

	Produktionsstadium					
	Einmalige Errichtung			Lebensdauer 50 Jahre		
	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]
PTW	1538	77	1606	1538	77	1606
HR	729	336	1087	1166	436	1631
ZM	1195	99	1331	1486	107	1630

Tabelle 5: Übersicht über die aufgewendete Energie bei einmaliger Errichtung des Bauteils sowie in Bauteil mit Lebensdauer 50 Jahre. (absolute Zahlen)

	Produktionsstadium					
	Einmalige Errichtung			Lebensdauer 50 Jahre		
	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
PTW	95%	5%	100%	95%	5%	100%
HR	68%	32%	100%	73%	27%	100%
ZM	92%	8%	100%	93%	7%	100%

Tabelle 6 Übersicht über die aufgewendete Energie bei einmaliger Errichtung des Bauteils sowie in Bauteil mit Lebensdauer 50 Jahre. (prozentuelle Anteile)

Aus vorheriger *Tabelle 5* und *Tabelle 6* ist ersichtlich, dass die PROGRESS Thermowand® bei einmaliger Errichtung in der Kategorie M.P.N.E am schlechtesten abschneidet, dicht gefolgt von der Ziegelbauweise. Am Besten schneidet die Holzrahmenbauweise ab, die nicht nur in Summe den geringsten Energieaufwand benötigt, sondern mit 32% auch den höchsten Anteil an erneuerbarer Energie aufweist.

Betrachtet man den Energieaufwand für die Lebensdauer 50 Jahre im rechten Teil der Tabellen, dann relativiert sich diese Aussage allerdings. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Holzbauweise aus mehreren Bauteilschichten besteht, die eine geringere Lebensdauer als 50 Jahre aufweisen und daher ausgetauscht werden müssen, steigt sowohl der erneuerbare als auch der nicht erneuerbare Energiebedarf in dieser Betrachtung an. Selbiges gilt auch für die Ziegelbauweise, sodass nun die PROGRESS Thermowand® den geringsten Gesamtenergieaufwand erfordert, gefolgt von Holzrahmenbau und Ziegelbauweise. Jedenfalls kann aber festgestellt werden, dass der Gesamtenergieaufwand aller drei Konstruktionen dicht beieinander liegt. Ein Unterschied von 25 MJ zwischen geringstem und höchstem Energieaufwand entspricht einem prozentuellen Unterschied von nur ca. 1,5%, wobei die Holzbauweise mit 27% noch immer den höchsten Anteil an erneuerbarer Energie aufweist.

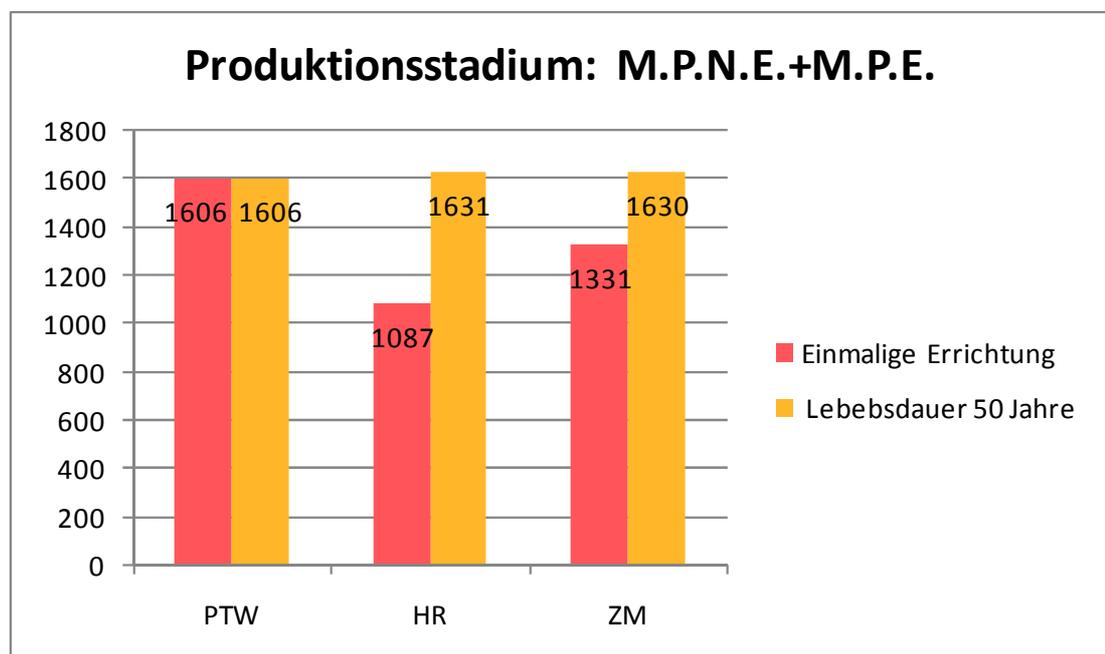


Abb. 37: Gegenüberstellung der gesamt aufgewendeten Primärenergie in der Produktionsphase

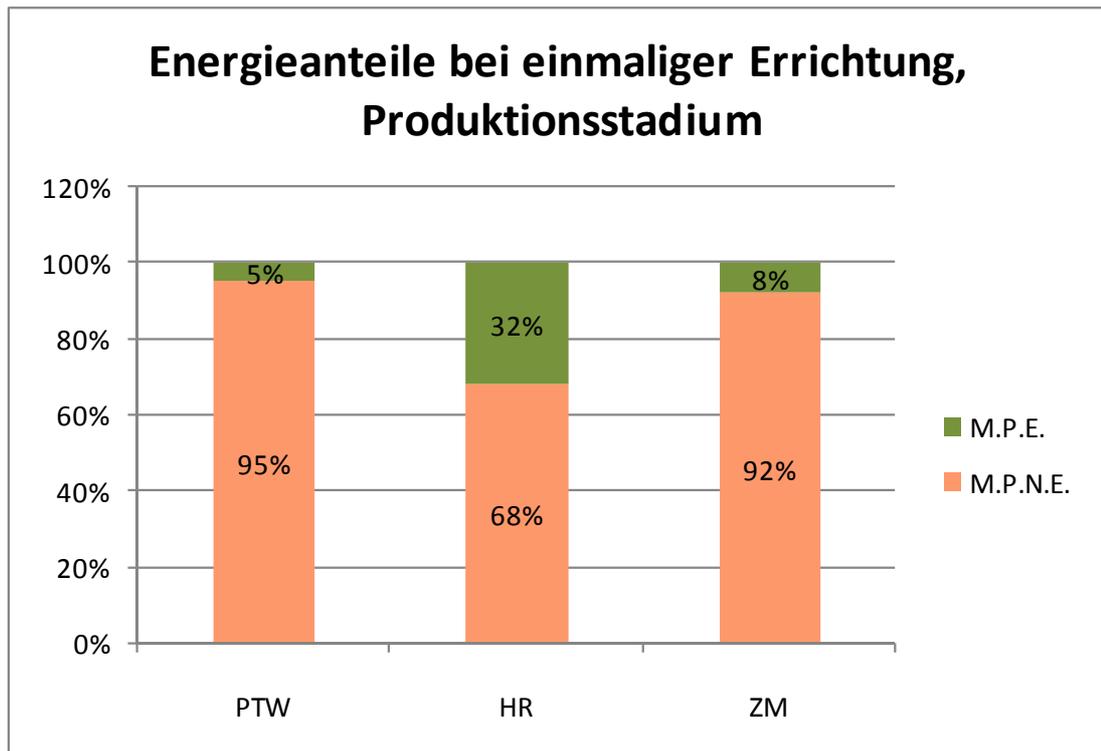


Abb. 38: Übersicht über die Anteile von erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energie bei einmaliger Errichtung im Produktionsstadium

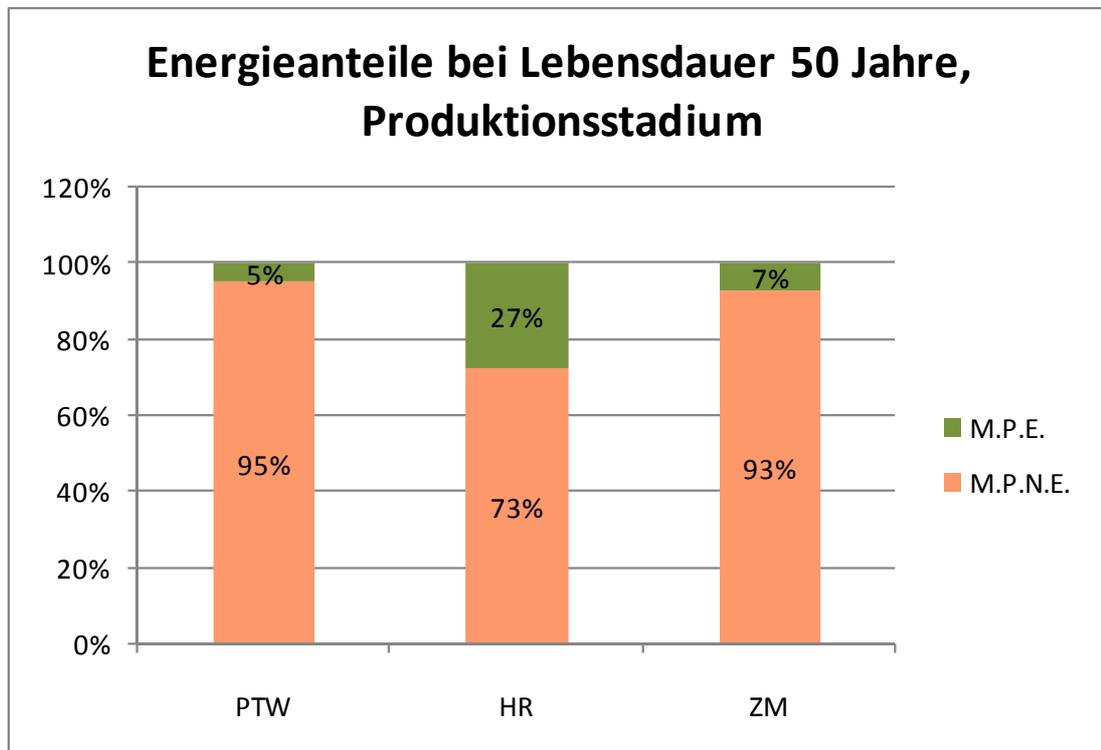


Abb. 39 Übersicht über die Anteile von erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energie bei Lebensdauer 50 Jahre im Produktionsstadium

5.3. Auswertung Entsorgungsstadium

Die Ermittlung der grauen Energie der Bauteile im Entsorgungsstadium erfolgt analog zum Produktionsstadium, mit Ausnahme der Tatsache, dass bisher im Bauteil gebundene Energie wieder freigesetzt wird, was sich durch negative Kennzahlen äußern kann, wenn das betrachtete Material beispielsweise ein petrochemisches Produkt wie Kunststoff oder Holz ist. Die Zuordnung der Daten zu den Schichten der Außenwandbauteile ist in den Tabellen **7T4**, **7H4** und **7Z4** zu entnehmen.

Unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer der Materialien ergeben sich wiederum zwei unterschiedliche Betrachtungen.

Folgende beiden Tabellen geben eine Übersicht über die aufgewendete Energie der drei Wandaufbauten, aufgeschlüsselt in nicht erneuerbare und erneuerbare Energie.

	Entorgungsstadium					
	Einmalige Errichtung			Lebensdauer 50 Jahre		
	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]
PTW	-138	-7	-145	-138	-7	-145
HR	-101	2	-98	-95	13	-82
ZM	25	1	26	34	1	35

Tabelle 7: Übersicht über die aufgewendete Energie bei einmaliger Entsorgung des Bauteils sowie in Bauteil mit Lebensdauer 50 Jahre. (absolute Zahlen)

	Entorgungsstadium					
	Einmalige Errichtung			Lebensdauer 50 Jahre		
	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
PTW	95%	5%	100%	95%	5%	100%
HR	102%	-2%	100%	116%	-16%	100%
ZM	97%	3%	100%	97%	3%	100%

Tabelle 8: Übersicht über die aufgewendete Energie bei einmaliger Entsorgung des Bauteils sowie in Bauteil mit Lebensdauer 50 Jahre. (prozentuelle Anteile)

Aus obiger *Tabelle 7* und *Tabelle 8* kann der Energiebedarf in der Entsorgungsphase entnommen werden. Auffallend ist, dass die PROGRESS Thermowand® sowie die Holzrahmenbauweise einen negativen Energiebedarf aufweisen, d.h. dass ein „Guthaben“ bisher gebundener Energie wieder frei gesetzt wird. Im Fall der PROGRESS Thermowand® liegt der Grund dafür bei den Materialien Nr. 3 bis Nr. 8 in der Tabelle **7T4** im Anhang (Dämmung aus PUR, Abstandshalter aus PVC, Pins aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Abhubanker und Drunterleiste), die

aus Kunststoffen bestehen und damit rohstoffgebundene Energie enthalten, die bei einer thermischen Verwertung wieder zur Verfügung gestellt wird. Bei der Holzrahmenbauweise liegt die Begründung in den Materialien Nr. 6 (Dübelsystem aus PVC), Nr. 8 (Konstruktionsholz) und Nr. 10 (Dampfbremse) aus Tabelle **7H4** im Anhang, die ebenfalls rohstoffgebundene Energie enthalten, die bei thermischer Verwertung wieder freigesetzt wird. Die Ziegelbauweise hingegen erfordert auch im Entsorgungsstadium einen zusätzlichen Energieaufwand, weil sie ausschließlich aus Materialien ohne rohstoffgebundener Energie besteht.

Während der Energiebedarf der PROGRESS Thermowand® in beiden Betrachtungen „einmalige Errichtung“ und „Lebensdauer 50 Jahre“ unverändert bleibt, unterscheiden sich diese für die Holz- und Ziegelbauweise.

In Gegenüberstellung mit dem Produktionsstadium kann festgestellt werden, dass der Energiebedarf aus dem Entsorgungsstadium um eine Größenordnung kleiner liegt und damit nur geringen Einfluss auf den gesamten Lebenszyklus hat.

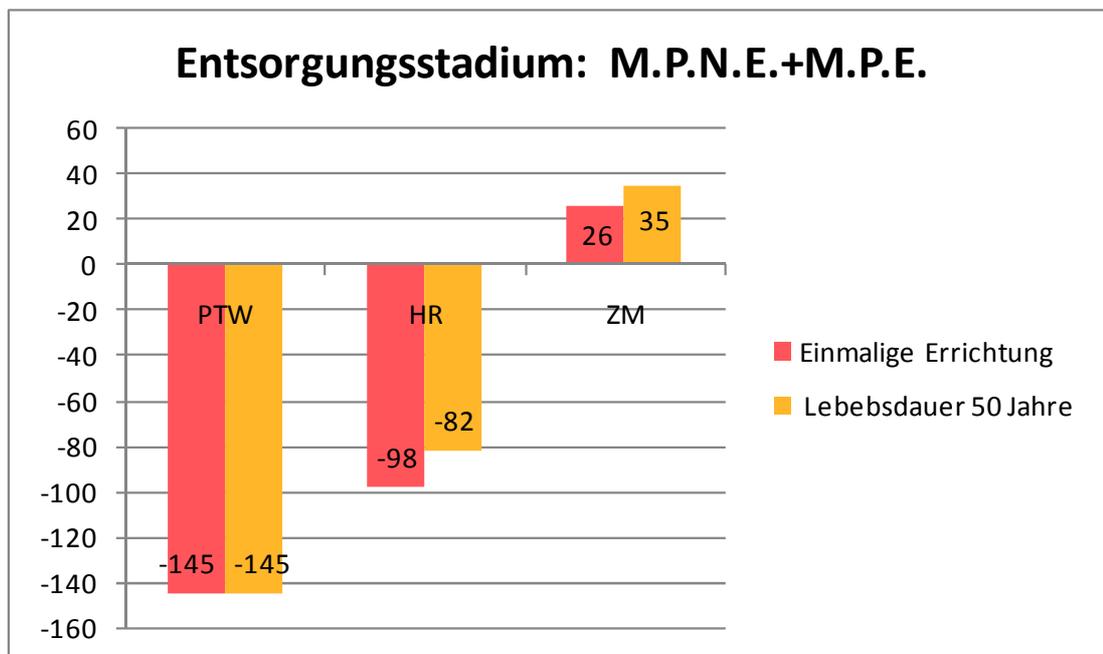


Abb. 40: Gegenüberstellung der gesamt aufgewendeten Primärenergie in der Entsorgungsphase

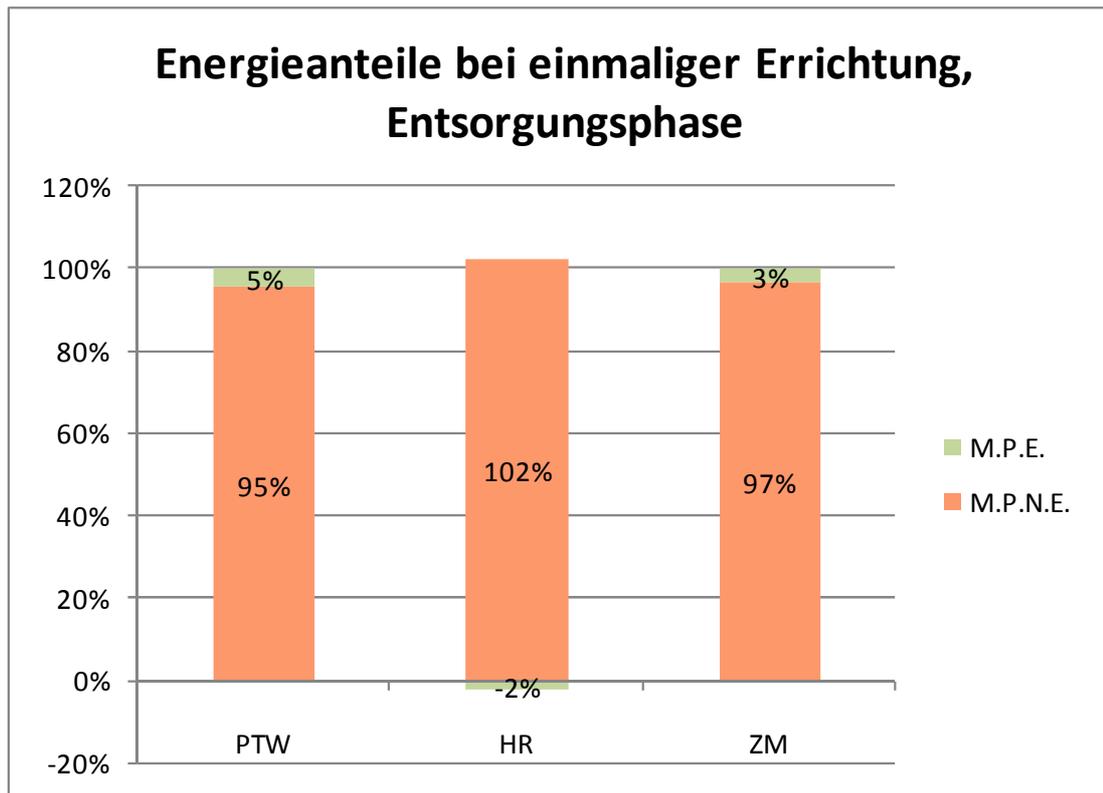


Abb. 41 Übersicht über die Anteile von erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energie bei einmaliger Entsorgung in der Entsorgungsphase

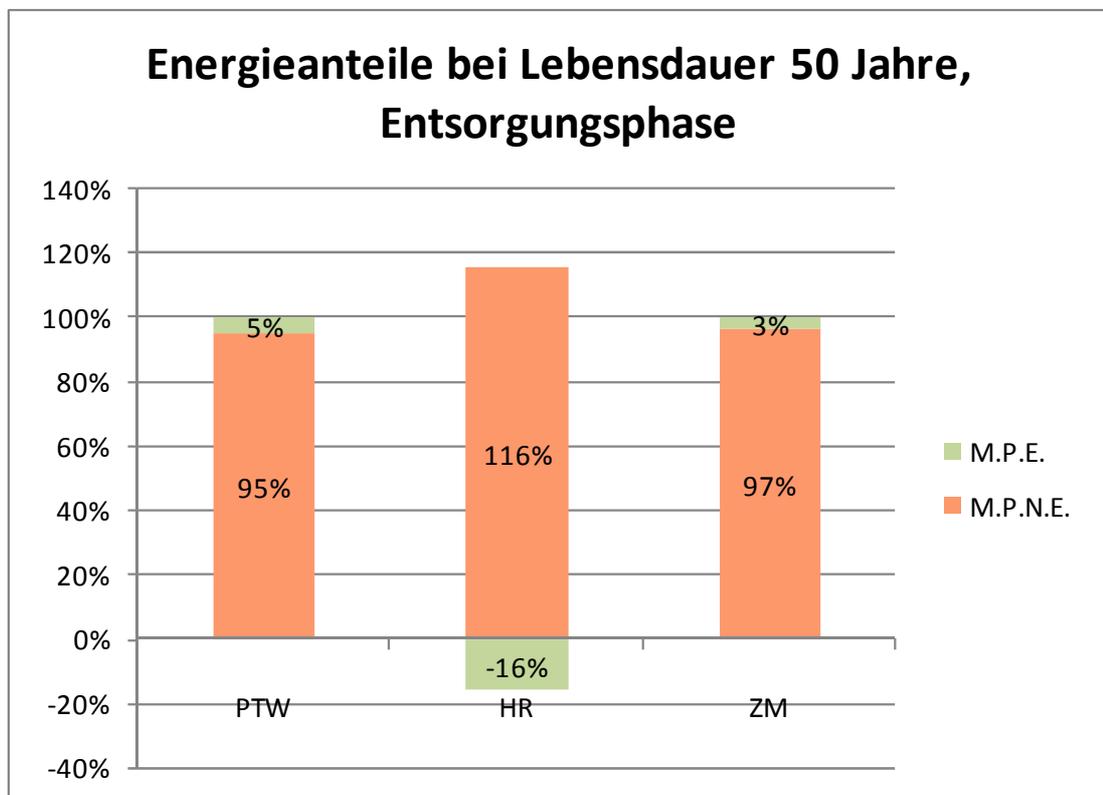


Abb. 42 Übersicht über die Anteile von erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energie bei Lebensdauer 50 Jahre im Produktionsstadium

5.4. Auswertung gesamter Lebenszyklus

Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus, (ausgenommen bleibt die Nutzungsphase gemäß Abschnitt 3.1) dann können die Ergebnisse aus Abschnitt 5.2: *Auswertung Produktionsstadium* und Abschnitt 5.3: *Auswertung Entsorgungsstadium* aufsummiert werden. Diese Zusammenfassung ist den dem Anhang beigefügten Tabellen **7T5**, **7H5** und **7Z5** zu entnehmen.

Folgende Tabellen geben einen Überblick über den Energieaufwand in Produktions- und Entsorgungsstadium, aufgeschlüsselt in nicht erneuerbare und erneuerbare Energie.

	Gesamt					
	Einmalige Errichtung			Lebensdauer 50 Jahre		
	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]
PTW	1400	70	1461	1400	70	1461
HR	629	339	989	1071	449	1549
ZM	1220	100	1357	1519	108	1665

Tabelle 9: Übersicht über die aufgewendete Energie bei einmaliger Errichtung und anschließender Entsorgung des Bauteils sowie in Bauteil mit Lebensdauer 50 Jahre. (absolute Zahlen)

	Gesamt					
	Einmalige Errichtung			Lebensdauer 50 Jahre		
	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.	M.P.N.E.	M.P.E.	M.P.N.E.+M.P.E.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
PTW	95%	5%	100%	95%	5%	100%
HR	65%	35%	100%	70%	30%	100%
ZM	92%	8%	100%	93%	7%	100%

Tabelle 10: Übersicht über die aufgewendete Energie bei einmaliger Errichtung mit anschließender Entsorgung des Bauteils sowie in Bauteil mit Lebensdauer 50 Jahre. (prozentuelle Anteile)

Aus obiger *Tabelle 9* und *Tabelle 10* kann abgelesen werden, dass die PROGRESS Thermowand® und damit die Betonbauweise jene Außenwandkonstruktion ist, die in Summe den geringsten Primärenergiebedarf erfordert. Der Anteil an erneuerbarer Energie ist mit 5% relativ gering, im Vergleich dazu weist die Holzbauweise einen hohen Anteil an erneuerbarer Energie von 30% auf, allerdings bei einem höheren Gesamtenergiebedarf von ca. 6% im Vergleich zur PROGRESS Thermowand®. Die Ziegelbauweise benötigt einen ca. 14% höheren

Gesamtenergiebedarf als die PROGRESS Thermowand® und steht daher in dieser Betrachtung an letzter Stelle.

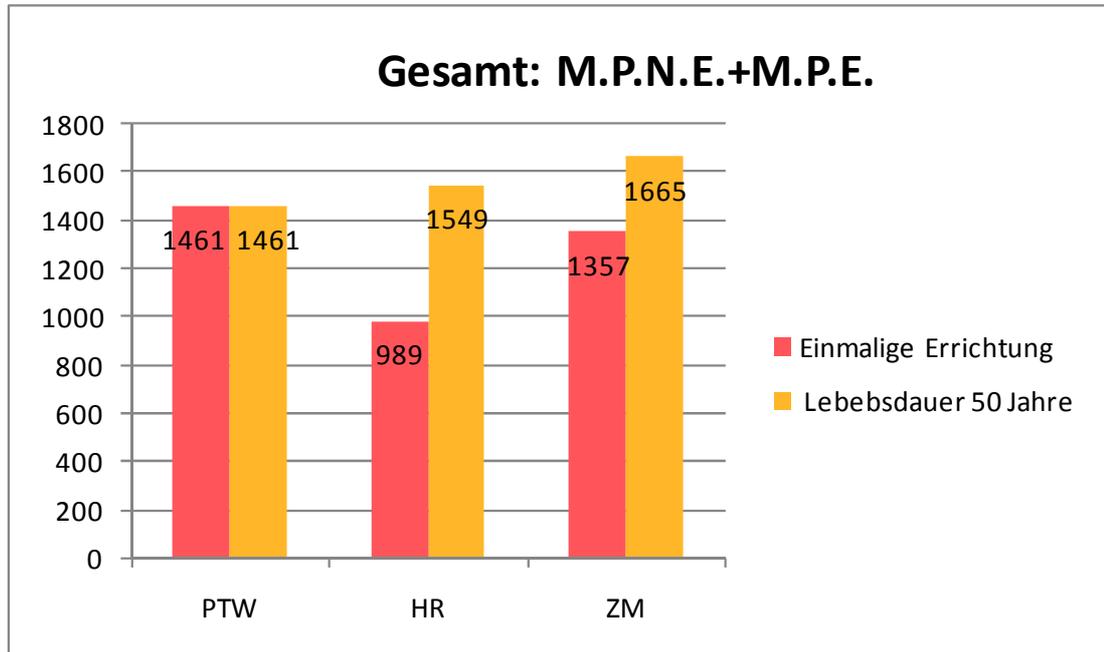


Abb. 43: Gegenüberstellung der gesamt aufgewendeten Primärenergie im gesamten Lebenszyklus

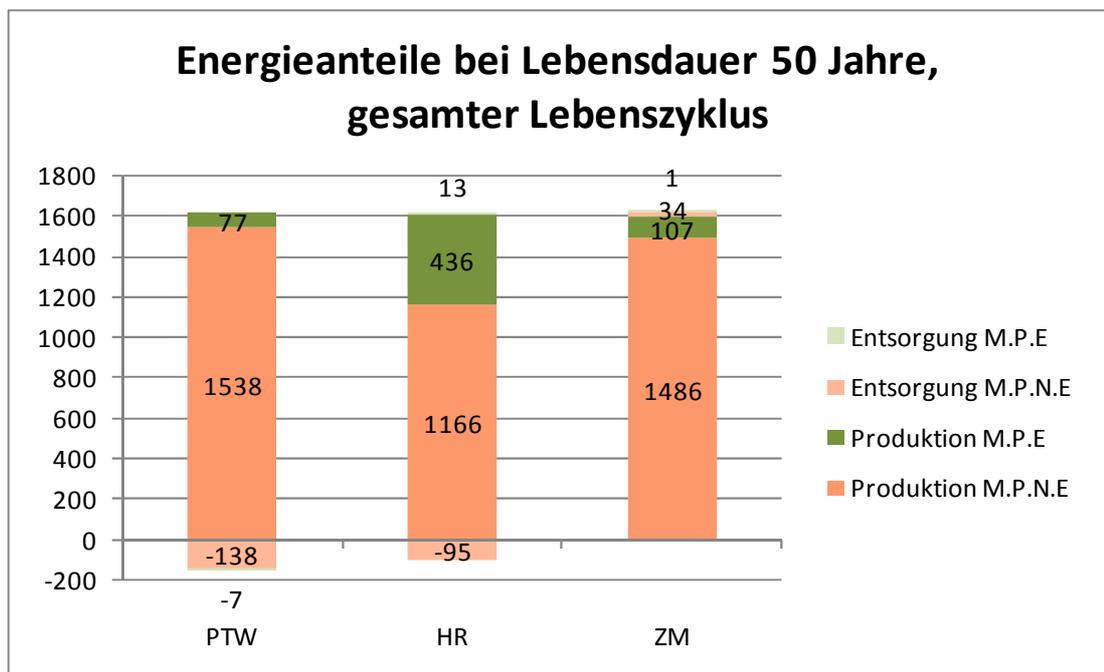


Abb. 44: Energieanteile bei 50 Jahre Lebensdauer im gesamten Lebenszyklus der drei Außenwandaufbauten im Vergleich

Folgende Abbildung gibt eine Übersicht über den Gesamtenergiebedarf für 1 m² Außenwand, aufgeteilt in erneuerbare Energie und nicht erneuerbare Energie.

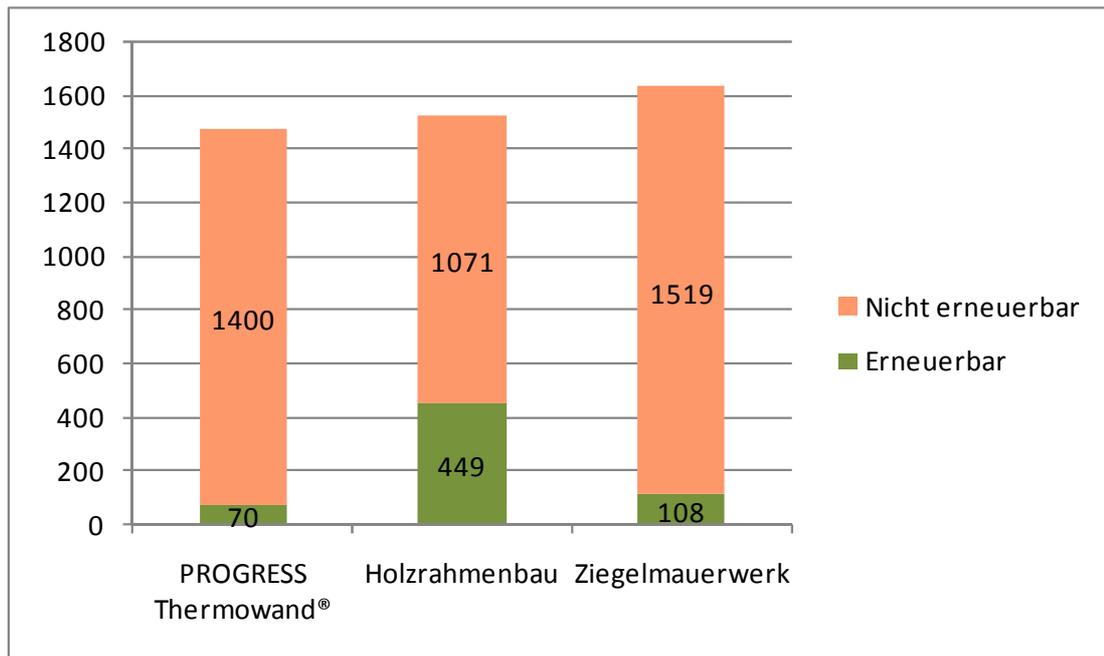


Abb. 45: Gesamtenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar

Transporte sind immer von Distanz, Art des Transportmittels und dessen Auslastung abhängig. Daher kann es für manche Betrachtungen zweckmäßiger sein, den Primärenergiebedarf ohne den Anteil aus Transporten darzustellen. Dies erfolgt in den folgenden beiden Abbildungen, die analog zu Abb. 44 und Abb. 45 erstellt wurden.

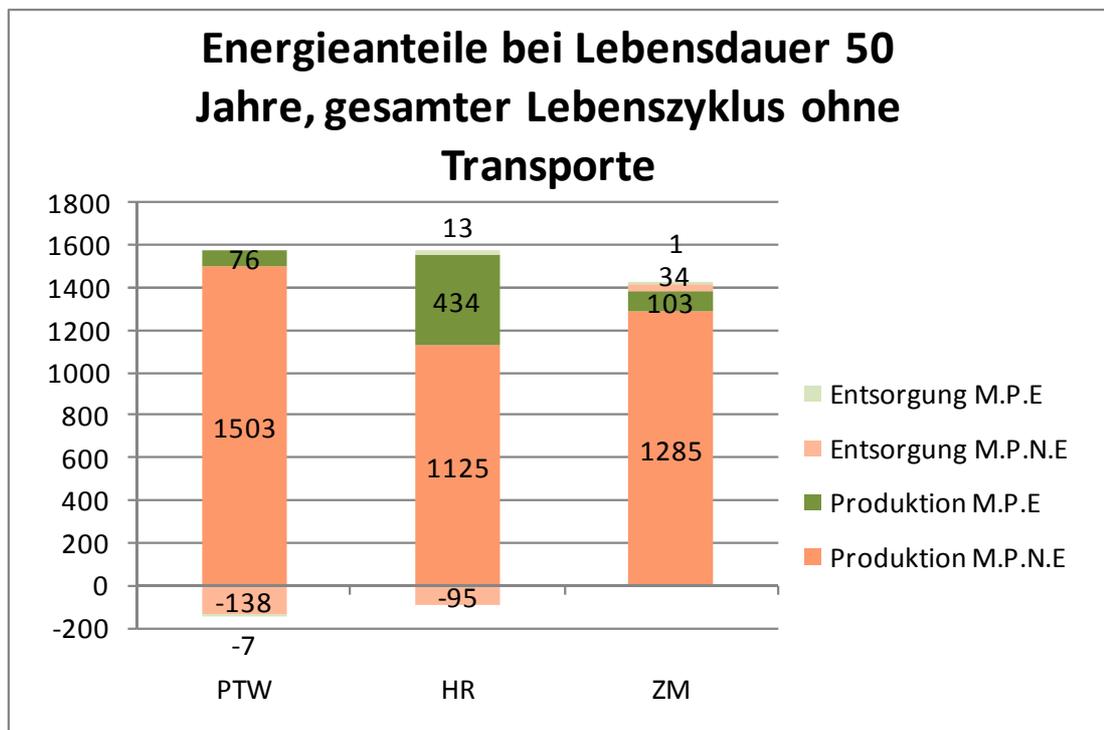


Abb. 46: Energieanteile bei 50 Jahre Lebensdauer im gesamten Lebenszyklus unter Vernachlässigung der Transporte der drei Außenwandaufbauten im Vergleich

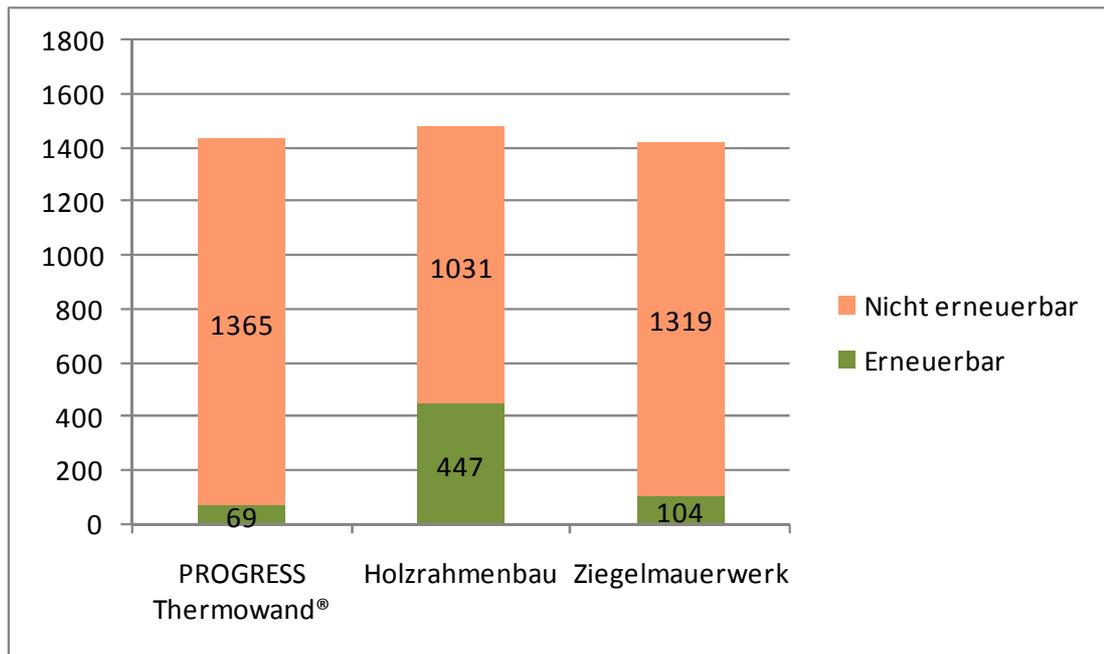


Abb. 47: Gesamtenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar ohne Anteil aus Transporten

Im Folgenden wird für die drei Wandvarianten der Gesamtenergiebedarf dargestellt, der sich in den jeweiligen Lebenszyklusphasen ergibt. Die Transporte werden in dieser Darstellung wie eine eigenständige Phase betrachtet.

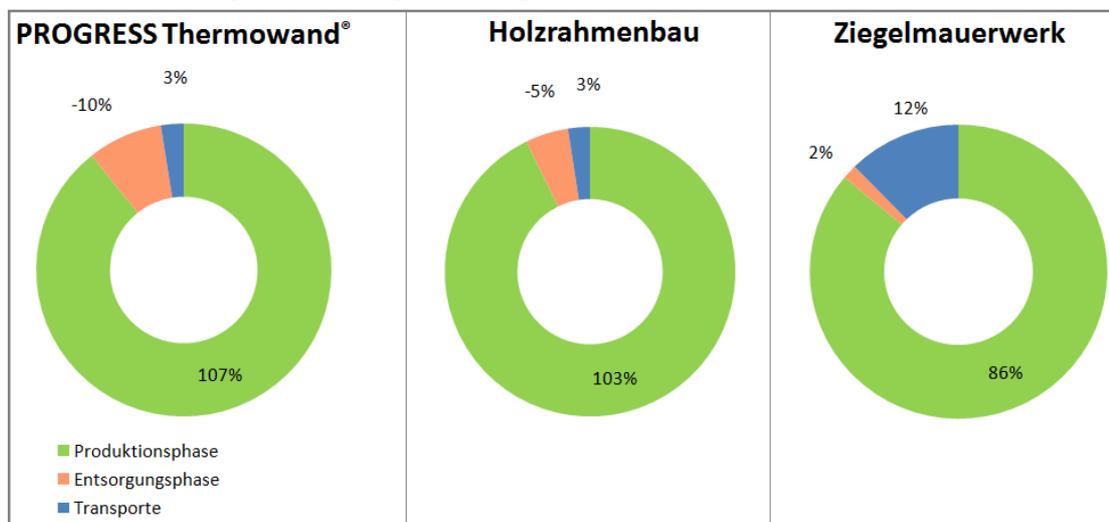


Abb. 48: Gesamtenergiebedarf nach Lebenszyklusphasen

Aus obiger Abb. 48: Gesamtenergiebedarf nach Lebenszyklusphasen ist ersichtlich, dass die Transporte nur einen unwesentlichen Anteil am Gesamtenergiebedarf haben, dieser Einfluss wird in der Regel überschätzt, beträgt er bei der PROGRESS Thermowand® und beim Holzrahmenbau nur 3%. Lediglich für das Ziegelmauerwerk stellen die Transporte mit 12% einen größeren Anteil dar.

Auch die Entsorgungsphase hat nur einen geringen Einfluss. Im Fall der PROGRESS Thermowand® sowie des Holzrahmenbaus entstehen in der Entsorgungsphase sogar Gutschriften. Die Begründung dafür liegt in der thermischen Verwertung von

energieintensiven Materialien: Durch die Verbrennung von Kunststoffen wie z.B. des Dämmstoffs PUR oder von Holz wird Energie freigesetzt, die wieder einer anderen Verwendung zugeführt werden kann.

Den größten Anteil am Primärenergiebedarf hat die Produktionsphase. Sie erfordert am meisten Energie, sodass dort für Optimierung das größte Potential liegt.

5.5. Auswertung nach Materialien

Aus Herstellersicht besonders interessant ist eine Auswertung des Energiebedarfs aufgeschlüsselt nach den verwendeten Materialien. Anhand dieser Betrachtung werden jene Materialien mit den größten Umweltauswirkungen ersichtlich, die über das größte Verbesserungspotential verfügen.

Klarerweise ist diese Betrachtungsweise in erster Linie von der Menge des jeweiligen Materials abhängig – siehe dazu auch die Übersichten **7ÜT**, **7ÜH**, **7ÜZ** im Anhang – weshalb die Vermutung nahe liegt, dass Materialien mit der größten Menge auch den größten Anteil am Energiebedarf haben müssen. Diese Vermutung bestätigt sich aber nur zum Teil, wie im Folgenden aufgezeigt werden soll. Um eine übersichtlichere Darstellung zu ermöglichen, werden Materialien mit ähnlichen Eigenschaften zu jeweils einer Gruppe zusammengefasst. Die Untersuchung folgt nun für die drei Wandkonstruktionen.

5.5.1. *PROGRESS Thermowand*[®]

Über den gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren werden für die *PROGRESS Thermowand*[®] wie im Abschnitt 5.4 ersichtlich 1461 MJ Energie benötigt. Diese Energiemenge setzt sich aus den Energiemengen der einzelnen Materialien zusammen. In folgender Abbildung ist die prozentuelle Aufteilung dargestellt.

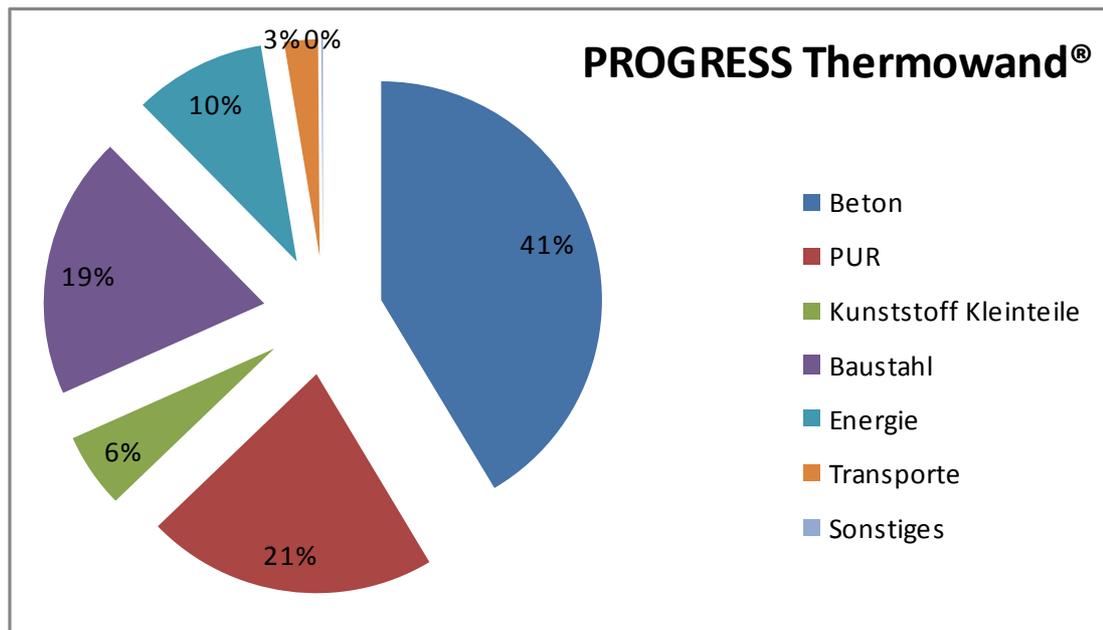


Abb. 49: Anteilsmäßiger Energiebedarf nach Materialien der PROGRESS Thermowand®

Die Materialien mit dem größten Energiebedarf sind erwartungsgemäß jene, die auch mengenmäßig den größten Anteil aufweisen, nämlich Beton und der Stahl. Der hohe Energiebedarf des Betons ist im Wesentlichen im hohen Energiebedarf des Zements begründet, der sich aufgrund des Herstellungsprozesses ergibt. Zur Nutzung dieses Einsparungspotentials wurden bereits viele verschiedene Forschungen angestellt. Erwähnt sei die Verwendung von innovativen Zusätzen wie beispielsweise TX Active¹⁷, Geopolimeren oder ähnlichem zur Senkung des Primärenergiebedarfs. Aber auch in der Entwicklung neuer, umweltschonender Bindemittel gibt es einige vielversprechende Forschungen, z.B. durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit dem neuartigen hydraulischen Bindemittel Celitement.¹⁸ Jedenfalls muss angemerkt werden, dass sämtliche Entwicklungen in diese Richtung noch keine marktreife Lösung darstellen.

Auffallend ist auch der hohe Anteil des Dämmmaterials PUR, das mit Sicherheit zu einem der energieintensiveren Dämmmaterialien gehört und durch ein weniger energieintensives Material wie beispielsweise Mineral- oder Glaswolle ersetzt werden könnte.

Des Weiteren kann festgestellt werden, dass die Transporte während des Lebenszyklus mit 3% nur einen geringen Anteil an der Gesamtenergiebilanz haben.

¹⁷ TX Active ist ein photokatalytischer Stoff für Betonprodukte vom Unternehmen Italcementi, der organische und anorganische Schadstoffe aus der Luft aufnimmt und zu binden vermag.

¹⁸ Celimente zeichnen sich durch die Verminderung von Energieverbrauch und Kohlendioxidemission bei ihrer Herstellung aus, die unter Sättigungsdampfdruck bei deutlich niedrigeren Temperaturen im Vergleich zur herkömmlichen Portlandherstellung stattfindet.

5.5.2. Holzrahmenbau

Über den gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren werden für den Holzrahmenbau wie im Abschnitt 5.4 ersichtlich 1549 MJ Energie benötigt. Diese Energiemenge setzt sich aus den Energiemengen der einzelnen Materialien zusammen. In folgender Abbildung ist die prozentuelle Aufteilung dargestellt.

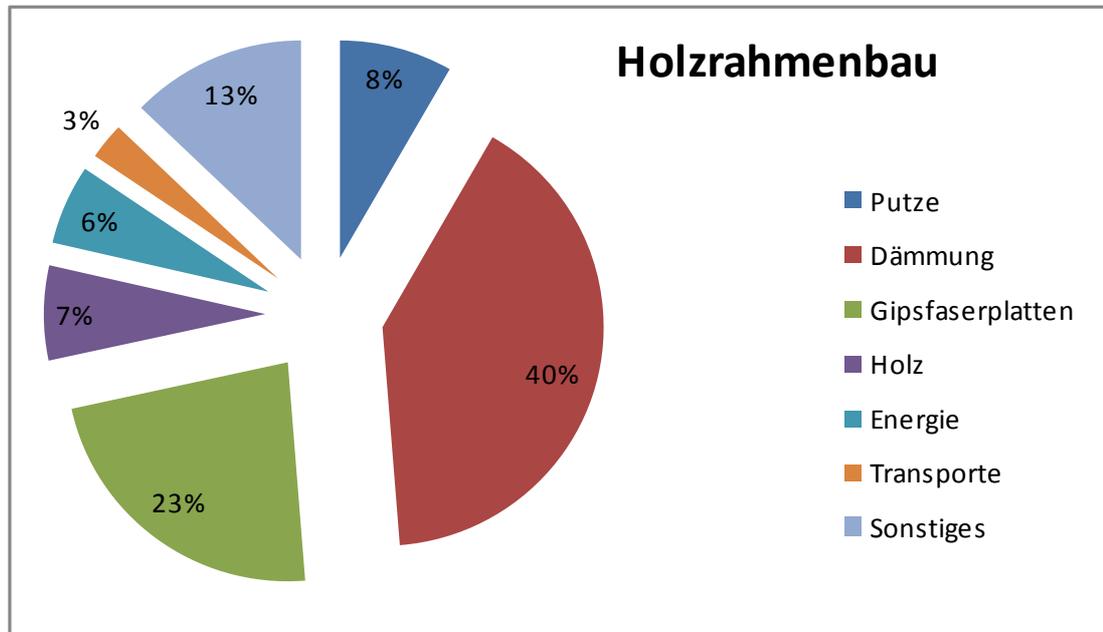


Abb. 50 Anteilmäßiger Energiebedarf nach Materialien im Holzrahmenbau

Den größten Energiebedarf weisen Holzwolleleichtbauplatte und Glaswolle auf, die in obiger Abbildung unter dem Begriff „Dämmung“ zusammengefasst wurden. Der Löwenanteil entfällt dabei mit 32,6% auf die Holzwolleleichtbauplatte, die aufgrund des darin enthaltenen Bindemittels in ihrer Herstellung energieintensiv ist. Verbesserungen könnten durch Verzicht auf zementöse Bindemittel oder durch Verwendung von alternativen Produkten erreicht werden.

Auch die Gipsfaserplatten weisen einen hohen Energieanteil auf, der Rest verteilt sich relativ gleichmäßig auf die übrigen Materialien, wobei der eigentliche Holzanteil nur 7% ausmacht.

Des Weiteren interessant ist, dass auch im Fall des Holzrahmenbaus der Anteil aus den Transporten gering ist, und genauso wie im Fall der PROGRESS Thermowand® bei nur 3% liegt.

5.5.3. Ziegelmauerwerk

Über den gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren werden für das Ziegelmauerwerk wie im Abschnitt 5.4 ersichtlich 1665 MJ Energie benötigt. Diese Energiemenge setzt sich aus den Energiemengen der einzelnen Materialien zusammen. In folgender Abbildung ist die prozentuelle Aufteilung dargestellt.

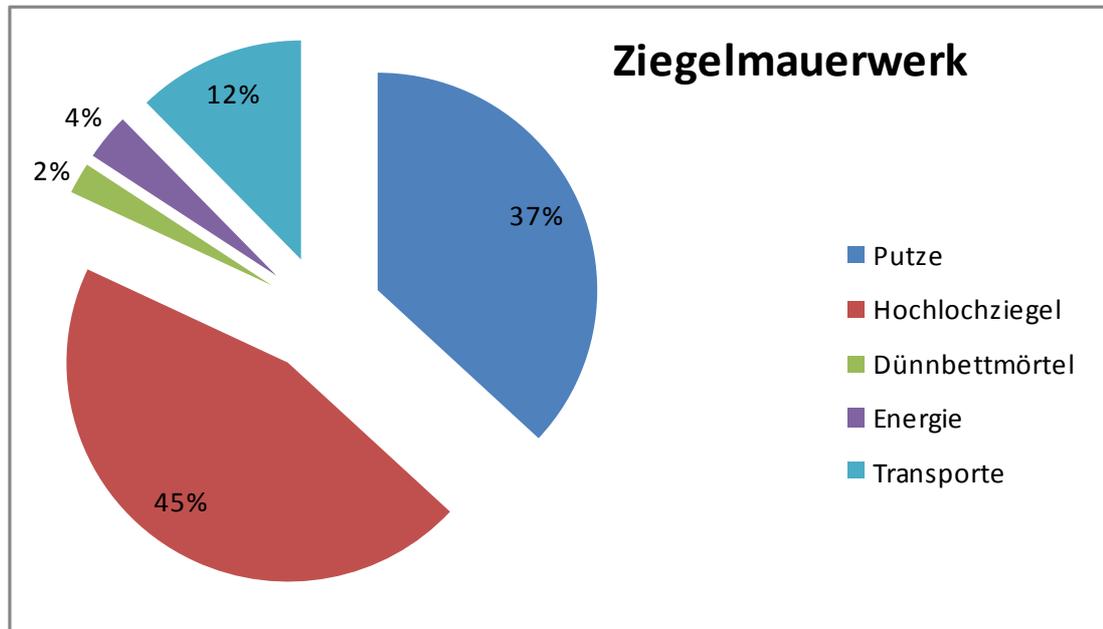


Abb. 51 Anteilsmäßiger Energiebedarf nach Materialien im Ziegelbau

Das Material mit dem größten Energiebedarf ist der Hochlochziegel, der auch den Hauptbestandteil der gesamten Konstruktion ausmacht. Auffallend hoch ist allerdings der energetische Anteil der Putze, wobei der Innenputz mit rund 5% im Vergleich zum Wärmedämmputz an der Außenseite mit 32% kaum ins Gewicht fällt. Größtes Einsparpotential liegt somit im Bereich des Ziegels sowie beim Wärmedämmputz, der wiederum mineralische Bindemittel und das energieintensive EPS-Granulat enthält.

Auffallend ist der im Vergleich zu beiden vorherigen Wandaufbauten höhere Energiebedarf, der sich aus den Transporten ergibt. Die Begründung hierfür liegt einerseits in den deutlich längeren Transportwegen, andererseits am hohen Eigengewicht der transportierten Materialien (Ziegel).

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Kapitel werden einige grundsätzliche Überlegungen zu den getroffenen Annahmen gestellt und die vorherigen Kapitel kurz zusammengefasst. Ein Ausblick über weitere interessante Fragestellungen, die sich auf Basis dieser Arbeit ergeben, bildet den Abschluss von Kapitel 6.

6.1. Plausibilitätsbetrachtungen zu den Annahmen

Im Zuge dieser Arbeit mussten mehrere Annahmen getroffen werden. In diesem Abschnitt sollen einige grundsätzliche Überlegungen erfolgen, ob und in welcher Weise die Wahl dieser Annahmen die vorangestellten Ergebnisse beeinflusst.

6.1.1. Transporte

In den Abschnitten 3.4: *Holzrahmenbau* und 3.5: *Ziegelmauerwerk* wurden für die Transportentfernungen Annahmen getroffen. Eine Prüfung der Sensitivität zum Einfluss der Transporte hat gezeigt, dass die Ergebnisse richtungstreu unverändert bleiben, auch wenn die angenommenen Transportentfernungen vergrößert werden. Die Begründung liegt im insgesamt geringen Anteil, den Transporte am Primärenergieverbrauch haben.

6.1.2. Nutzungsdauer

In Abschnitt 3.2 wurde eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich die Lebensdauer maßgeblich auf die Ergebnisse der Energiebilanz auswirkt. Ob diese Annahme zulässig war, soll im Zuge einer Sensitivitätsanalyse geprüft werden. Dazu wird der Gesamtprimärenergiebedarf der einzelnen Materialien durch ihre Lebensdauer dividiert, sodass der durchschnittlich anfallende Primärenergiebedarf je Jahr erhalten wird. Ein Aufsummieren über die jeweiligen Bestandmaterialien der Außenwandkonstruktionen ergibt schließlich den durchschnittlichen jährlichen Energiebedarf. Nicht zielführend ist diese Vorgehensweise für die Anteile aufgrund Transport und direktem elektrischen Energiebedarf in der Herstellung. Diese verfügen über keine Nutzungsdauer, da sie in jedem Lebenszyklus immer nur einmal auftreten werden. Da gemäß Abschnitten 5.4 und 5.5 Transporte und Energie im Herstellungsprozess zusammen nur maximal 16% des Gesamtenergiebedarfs haben – vgl. dazu *Abb. 51 Anteilsmäßiger Energiebedarf nach Materialien im Ziegelbau* – beeinflussen diese die Sensitivitätsanalyse nicht maßgeblich. Daher wird diesen Anteilen eine fiktive Lebensdauer von 50 Jahren zugeordnet.

Diese Ausarbeitung kann aus den im Anhang beigefügten Tabellen **7T6**, **7H6** und **7Z6** entnommen werden. Zusammenfassend sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in folgender Tabelle dargestellt:

Bezug	Erneuerbar				Nicht erneuerbar				Gesamt			
	50 Jahre		pro Jahr		50 Jahre		pro Jahr		50 Jahre		pro Jahr	
	[MJ]	[%]	[MJ]	[%]	[MJ]	[%]	[MJ]	[%]	[MJ]	[%]	[MJ]	[%]
PTW	70	16%	1,1	16%	1400	92%	21,7	98%	1461	88%	22,6	95%
HR	449	100%	7,0	100%	1071	70%	16,2	73%	1549	93%	23,5	98%
ZM	108	24%	1,4	19%	1519	100%	22,1	100%	1665	100%	23,9	100%

Tabelle 11: Gegenüberstellung der absoluten und prozentuellen Anteile des Gesamtprimärenergiebedarfs mit den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse zur Nutzungsdauer

Obige Tabelle 11 stellt den Gesamtenergiebedarf der drei Außenwände aus Abb. 45: Gesamtenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse gegenüber. Die Angaben in [%] beziehen sich jeweils auf den Wandaufbau mit dem größten Gesamtenergiebedarf. Es ist zu erkennen, dass die prozentuellen Anteile im Bereich „Erneuerbar“ weitestgehend identisch sind. Im Bereich „Nicht erneuerbar“ verschlechtern sich die prozentuellen Anteile der PROGRESS Thermowand® und der Holzrahmenbauweise um bis zu sechs Prozentpunkte im Vergleich zur Ziegelbauweise. Selbiges gilt schließlich auch für die Kategorie „Gesamt“, mit sieben Prozentpunkten Verschlechterung im Fall der PROGRESS Thermowand®. Dennoch zeigt die letzte Spalte der Tabelle auf, dass die PROGRESS Thermowand® noch immer die energiesparendste Außenwand darstellt, in unveränderter Reihenfolge gefolgt von Holzrahmen- und Ziegelbauweise. Dies bestätigt, dass die getroffene Annahme keinen Einfluss auf die Ergebnisse des Gesamtenergiebedarfs hat und dieser richtungstreu erhalten bleibt.

6.1.3. Entsorgung

Zwischen den Angaben der Entsorgung in einigen überprüften Umweltdeklarationen und der heute üblichen praktizierten Entsorgung besteht häufig ein beträchtlicher Unterschied, sodass die in dieser Arbeit erfolgte Bewertung nur einen theoretischen Ansatz darstellt und in der Praxis nur bedingt zutrifft. Zudem bieten Datenbanken kaum Daten über mögliche alternative Entsorgungsszenarien, sodass in dieser Arbeit für jedes Material das gängigste Szenario verwendet wurde, auch wenn dieses auf in Außenwänden verwendete Materialien nicht immer zutreffen wird.

Auch unter Anbetracht der unzuverlässigen Qualität der Ergebnisse in der Entsorgungsphase wird die Aussage dieser Arbeit nicht eingeschränkt, da die Entsorgungsphase nur ca. 10% des Energiebedarfs der Produktionsphase ausmacht.

6.1.4. Niedriger Gesamtenergiebedarf oder hoher Anteil an erneuerbarer Energie?

Es stellt sich die Frage, ob nun die Außenwandkonstruktion mit dem niedrigsten Gesamtprimärenergiebedarf (PROGRESS Thermowand®) die umweltschonendere Variante darstellt oder jene mit dem größten Anteil an Primärenergie aus

erneuerbarer Quellen (Holzrahmenbauweise). Eine richtungssichere Behauptung hinsichtlich Energiebedarf ist die Aussage „je weniger desto besser“, aber klarerweise stellt sich auch die Frage des Ursprungs der Energie. Aus dem Umweltforschungsplan des Bundesministeriums [1] ist zur Verwendung von erneuerbarer Energie folgendes zu entnehmen: *„Auch die Nutzung erneuerbarer (regenerativer) Primärenergien wie Sonne, Wasser- und Windkraft oder Biomasse, ist nicht folgenlos und beansprucht u.a. – wegen geringer Energiedichte – relativ viel Naturraum mit möglichen Konflikten zum Landschafts- und Naturschutz.“*

Demnach stellen auch erneuerbare Energien eine Umweltbelastung dar, die nicht unterschätzt werden soll. Dass (mehr) erneuerbare Primärenergie umweltfreundlicher ist als (weniger) nicht erneuerbare, kann daher weder bestätigt noch dementiert werden. Diesbezüglich sind weitere Untersuchungen nötig, die nicht Inhalt dieser Arbeit sind.

6.2. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden drei unterschiedliche Außenwandaufbauten in Beton- Holz- und Ziegelbauweise hinsichtlich ihres Primärenergiebedarfs verglichen.

Dazu wurden drei Wandaufbauten aufgrund von verbreiteten und marktüblichen Bauweisen ausgewählt. Es sind dies die PROGRESS Thermowand®, der Holzrahmenbau sowie die Ziegelbauweise. Die drei Varianten wurden auf Basis äquivalenter bauphysikalischer, konstruktiver, und sonstiger Eigenschaften untersucht und deren Gleichwertigkeit im Sinne einer funktionellen Einheit festgestellt, wobei die beiden Massivbauweisen in einzelnen Kriterien deutliche Vorteile aufweisen.

In einer Sachbilanz der drei Außenwandaufbauten wurden alle relevanten Energie- und Materialströme in der Produktionsphase erfasst und anschließend über einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren bilanziert. Transporteinflüsse wurden ebenso berücksichtigt, wobei teilweise Annahmen zur Entfernung getroffen wurden.

Der Abbruch und die Entsorgung bzw. Deponierung in der „End of life“-Phase wurde in der Energiebilanz ebenfalls erfasst.

Die Bilanzierung erfolgte unter Zuhilfenahme von mehreren Datenbanken, aus denen für die jeweiligen Bestandmaterialien der drei Wände generisches Datenmaterial entnommen wurde. Anhand der entnommenen Energiefaktoren konnten dem jeweiligen Material der erneuerbare und der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf zugewiesen werden.

Anhand der Auswertung der Energiebilanz konnten zusammenfassend folgende Aussagen getroffen werden:

- Die PROGRESS Thermowand® erfordert in Summe mit 1461 MJ den geringsten Primärenergiebedarf, wobei davon 5% aus erneuerbaren Quellen bezogen werden

- Die Holzbauweise erfordert in Summe 1549 MJ und weist mit 30% den höchsten Anteil an erneuerbarer Primärenergie auf
- Die Ziegelbauweise benötigt 1665 MJ Primärenergie, wobei 7% davon erneuerbare Energie ist
- Der größte Anteil am Primärenergiebedarf entsteht bei allen drei Wandaufbauten in der Produktionsphase
- Die Entsorgungsphase erfordert weniger als 10% des Gesamtenergiebedarfs
- Der Transportanteil am gesamten Primärenergiebedarf liegt bei 3% (Holz- und Betonbauweise) bzw. 12% (Ziegelbauweise)
- Materialien aus mineralischen Bindemitteln haben einen großen Anteil am Energiebedarf
- Auch die Dämmmaterialien haben bedeutenden Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf

Diese Untersuchung hat aufgezeigt, dass der aufzuwendende Energiebedarf der drei Außenwandkonstruktionen über den Lebenszyklus in einer ähnlichen Größenordnung liegt. Die Massivbauweise ist damit der Holzbauweise hinsichtlich ihrer Primärenergieaufwendungen fast gleichwertig (Ziegelmauerwerk) bzw. sogar überlegen (PROGRESS Thermowand®). Besonders die Betonbauweise schneidet im Kriterium Gesamtenergiebedarf gut ab.

Diese Erkenntnis widerspricht der weit verbreiteten Meinung, dass ein ökologisches Bauen nur in Holzbauweise möglich sei. Dies mag zwar auf den ersten Blick eine plausibel klingende Behauptung sein, aber auch wenn man von einer anzunehmenden Unsicherheit aufgrund der verwendeten Daten ausgeht, dann kann diese Behauptung relativiert werden. Durch eine objektive Bewertung wie sie anhand dieser Energiebilanz unter Betrachtung des gesamten Lebenszyklus vorgenommen wurde, lässt sich ein energieschonenderes Bauen mit Holz im Vergleich zur Massivbauweise nicht bestätigen.

Mineralische Konstruktionsmaterialien zeichnen sich durch eine deutlich höhere Langlebigkeit aus im Vergleich zu organischen Materialien. Ein mehrfacher Austausch von Materialien innerhalb des Lebenszyklus bewirkt einen zusätzlichen Energiebedarf, der durch sorgsame Auswahl der Materialien vermindert werden könnte. Die Verwendung von vielen unterschiedlichen Materialien im Sinne eines Composite- Werkstoffs (z.B. Wärmedämmputz mit EPS, Holzrahmenbau mit Dampfbremse) bewirkt, dass die Lebensdauer des Bestandteils mit der geringsten Lebensdauer zum schlagenden Kriterium wird. Um dem entgegenzuwirken ist es sinnvoll, innerhalb eines Bauteils nur Materialien mit ähnlicher und aufeinander abgestimmter, möglichst langer Lebensdauer zu verwenden.

Zudem zeigt diese Arbeit auf, dass eine Optimierung der Energiebilanz nur durch eine konsequente Analyse der einzelnen Bestandteile der

Außenwandkonstruktionen möglich ist. Diesbezüglich ist es entscheidend, die Systemgrenzen mit großer Sorgfalt auszuwählen und eine möglichst umfassende Information über die verwendeten Materialien zu besitzen. So können umweltrelevante Informationen erhalten werden, die der Hersteller für zukünftige Produktentwicklung und fundierte Aussagen gegenüber Anspruchsgruppen verwenden kann.

6.3. Ausblick

Um, aufbauend auf diese Arbeit, eine anschauliche Vergleichbarkeit der drei Außenwandaufbauten zu erhalten sind folgende weiteren Untersuchungen interessant:

- Ermittlung der Einflüsse aus der Nutzungsdauer (z.B. Heizwärmebedarf) unter Einbeziehung der Instandhaltungsarbeiten
- Datensammlung aufgrund von Referenzbauwerken, die Aufschluss über den Rückbau, den Abbruch und die Verwertung oder Entsorgung der Materialien geben mit Angabe aller relevanten Material- und Energieflüsse
- Erweiterung der Bilanzierung auf ein gesamtes Referenzbauwerk, z.B. ein Einfamilienhaus mit typischen Fensteranteilen, Dachflächen, Innenausbau usw.

7. QUELLVERZEICHNIS

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007). *Umweltforschungsplan: Kumulierter Energieverbrauch (KEV) – ein praktikabler Bewertungs- und Entscheidungsindikator für nachhaltige Produkte und Dienstleistungen*, Kurzfassung 201 41 129. Bonn
- [2] Europäische Union (21.01.2013). *Europa 2020: Die fünf EU-Kernziele für das Jahr 2020*. Retrieved April 15.2013 from: http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/in dex_de.htm
- [3] Eurostat (2011). Final energy consumption, by sector in 1000t of oil equivalent, table tsdpc320 . Retrieved April 17.2013 from: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tsdpc320>
- [4] Graubner, C.A / Hüske, K. (2003): *Nachhaltigkeit im Bauwesen: Grundlagen – Instrumente – Beispiele*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 1
- [5] Europäische Union (09.03.2011). *Clevere Energienutzung in Europa in Sicht*. Retrieved April 15.2013 from: http://ec.europa.eu/news/energy/110309_1_de.htm
- [6] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (09.03.2011). *Verordnung (EU) No 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates*. Straßburg 2011
- [7] Frick, L. / Landeszentrale für politische Bildung Baden-Württemberg. *Energie und Nachhaltigkeit: Probleme – Zielkonflikte – Lösungsansätze* In: Zeitschrift für die Praxis der Politischen Bildung, Heft 04.2008. Villingen-Schwenningen 2008
- [8] Baumast, A. / Pape J. (2001): *Betriebliches Umweltmanagement. Theoretische Grundlagen. Praxisbeispiele*. Stuttgart: Ulmer, S. 166-177
- [9] *DIN EN ISO 14040:2009-11: Umweltmanagement - Ökobilanz- Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)*
- [10] *DIN 4109: 1989-11: Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise, Beiblatt 1*
- [11] Eurocode EN 1992-1-1: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau*
- [12] Bauinnung Augsburg Elias Holl (2012). Retrieved April 30.2013: from <http://www.bauinnung-augsburg.de/index.php?id=385>
- [13] Balak, M. / Pohlplatz K. / Rosenberger R. / Steinbrecher M. (2011). *4. Österreichischer Bauschadensbericht: Fassaden Teil 1: WDVS- Fassaden*. Wien: WKÖ und IBF
- [14] Kaltschmitt, M / Hartmann, H / Hofbauer, H. (2009). *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Berlin. Springer Verlag, S. 9
- [15] Büro für Umweltchemie (1998). *Graue Energie von Baustoffen: Tabellenwerk zu Bauchemikalien, Verarbeitungs- und Transportprozessen mit Erläuterungen und Empfehlungen für die Baupraxis* (2. Vollständig neu überarbeitete Auflage). Zürich
- [16] Österreichisches Institut für Bautechnik (2007). *OIB Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz*. Wien
- [17] *DIN 18217: Betonflächen und Schalungshaut*. Dezember 1981
- [18] Schebek, L. (2007). Von der Wiege bis zur Bahre: Eine Einführung in den Schwerpunkt Lebenszyklusanalysen in der Nachhaltigkeitsbewertung. In: *Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis* 07(3). Karlsruhe, S. 4.
- [19] Baumann, H./Tillman, A.-M.(2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Lund: Studentliteratur AB.
- [20] Autonome Provinz Bozen Südtirol, Abteilung Hochbau und technischer Dienst (2012): *Richtpreisverzeichnis Hochbauarbeiten 2012*. Bozen
- [21] SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry. (1993). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: a 'Code of Practice'*. Brüssel: SETAC publications
- [22] The international EPD System. (2012). *Product category rule and PCR basic module: construction product and construction services*. Schweden, S.9.
- [23] Rubner Holzbau , (2012) *Firmeninterne Angaben: Holzhausbau*. Kiens (IT)
- [24] Homepage Wikipedia. org *Holzwohle-Leichtbauplatte*. Retrieved März 04.2013: from <http://de.wikipedia.org/wiki/Holzwohle-Leichtbauplatte>

- [25] Verband Österreichischer Ziegelwerke (2012) *Wir über uns*. Retrieved April 04.2013: from http://www.ziegel.at/de/ueberuns/ueber_uns
- [26] Abteilung Energiebilanz und Energieeffizienz. (2003). *Energiebericht 2003 der österreichischen Bundesregierung*. Wien, S.117.
- [27] Teischinger, A. / Stingl, R. / Zukal, M.L. (2011) *Holzbauanteil in Österreich – Statistische Erhebung von Holzbauvorhaben*, Wien, S.8
- [28] PROGRESS AG, (2012) *Firmeninterne Veröffentlichung: Produktionszuwächse PROGRESS Thermowand 2008-2011*, Brixen
- [29] Homepage online U-Wertrechner; Retrieved April 03.2013 from <http://www.uwert.net/berechnung/u-wert-rechner>
- [30] Decreto del Ministero dell'Interno 10 marzo (2005). *Classi di reazione al fuoco per i prodotti da costruzione da impiegarsi nelle opere per le quali è prescritto il requisito della sicurezza in caso d'incendio*. Rom
- [31] Mayer, U. (2004): *Ein Beitrag zur Bemessung von Holzrahmenbauwänden mit der Methode der Finiten Elemente, Dissertation*. Hamburg
- [32] Eurocode EN 1995-1-1:2010-12: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [33] Wienerberger Gruppe (2001): *Ganz einfach: Porothersm Planziegel*. Hannover, S.47
- [34] Eurocode EN 1992-2004: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall
- [35] Fachverband der Holzindustrie / Berufsgruppe Bau: Katalog bauphysikalisch und ökologisch geprüfter Holzbauteile, Datenblatt Holzforschung Austria (2012). *Bauteil awropo06b-02 - Aussenwand - Holzrahmenbau, nicht hinterlüftet, ohne Installationsebene, geputzt*. Wien
- [36] Prüfzeugnis MA39 VFA 2009-0307.01. Wien
- [37] Walter Klöpffer, W./ Grahl, B. (2009). *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Beruf und Ausbildung*. Weinheim. Wiley-VCH
- [38] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (2013). *Der Kumulierte Energieverbrauch als Indikator*. Retrieved Januar 09. 2013, from <http://www.ffe.de/die-themen/mobilitaet/90-der-kumulierte-energieverbrauch-als-indikator>
- [39] Homepage Baunetzwissen (2013) *Primärenergiegehalt* Retrieved April 11.2013: from http://www.baunetzwissen.de/glossarbegriffe/Nachhaltig-Bauen-Primaerenergiegehalt_1074251.html
- [40] VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt [Hrsg.]: *VDI 4600 – Kumulierte Energieaufwand (KEA)*. Beuth Verlag, Berlin 2012, S.6.
- [41] Richtlinie des Rates vom 21.12.1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/109/EWG)
- [42] Eurocode EN 1990-2002: Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 1-1: Grundlagen - Nutz- und Eigenlasten
- [43] Kompetenzzentrum der Initiative „Kostengünstig qualitätsbewusst Bauen“ im Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2009). *Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten: Tragkonstruktion, Nichttragende Konstruktion, Installationen und betriebstechnische Anlagen Außenanlagen*, Info - Blatt Nr. 4.2. Berlin
- [44] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2001). *Leitfaden nachhaltiges Bauen: Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Liegenschaften*. Anlage 6. Berlin
- [45] Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung, Referat II Nachhaltiges Bauen (2011). *Erläuterungen zur BBSR- Tabelle: Nutzungsdauer von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB*. Berlin
- [46] BNB - Bewertungssystem nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (2011). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalyse nach BNB*.
- [47] ÖNORM EN 15316-4-5: Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen - Teil 4-5: Wärmeerzeugungssysteme, Leistungsfähigkeit und Effizienz von Fernwärme- und großvolumigen Systemen
- [48] Paleari M. (2012). *Life Cycle Assessment in edilizia: Dichiarazioni EPD per imprese e progettisti*. Mailand

8. VERZEICHNIS DER VERWENDETEN DATENBANKEN

- [I]. Büro für Umweltchemie (1998). *Graue Energie von Baustoffen: Tabellenwerk zu Bauchemikalien, Verarbeitungs- und Transportprozessen mit Erläuterungen und Empfehlungen für die Bau Praxis* (2. Vollständig neu überarbeitete Auflage). Zürich
- [II]. Prof. Hammond G. / Jones C. (2008). *Bath Inventory of Energy and Carbon (ICE)* (Version 1.6a) Bath: University of Bath (UK)
- [III]. Geschäftsstelle Nachhaltiges Bauen im BBSR (2011). *Ökobau.dat: Baustoffdatenbank für die Bestimmung globaler ökologischer Wirkungen*. Berlin
- [IV]. Umweltbundesamt im Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012). *Webportal ProBas: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente*. Dessau
- [V]. IBU – Institut Bauen und Umwelt e. V. ,Königswinter: *Umwelt-Deklarationen (EPD)*. Retrieved April 11.2013, from <http://bau-umwelt.de/hp1/Startseite.htm>
- [VI]. ADEME - Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie in Zusammenarbeit mit der Universität Cergy-Pontoise (2008). *Bilan Produit: Classeur d'Estimation des Impacts Environnementaux des Produits*. Angers (FR)
- [VII]. Fachverband der Holzindustrie / Berufsgruppe Bau: Katalog bauphysikalisch und ökologisch geprüfter Holzbauteile, Datenblatt Holzforschung Austria (2012). *Bauteil awropo06b-02 - Außenwand - Holzrahmenbau, nicht hinterlüftet, ohne Installationsebene, geputzt*. Wien
- [VIII]. Baubook GmbH betrieben vom Energieinstitut Vorarlberg und der IBO GmbH. *Webportal Baubook.info: Die Datenbank für ökologisches Bauen & Sanieren*. Wien

9. ABBILDUNGSERZEICHNIS

- (1) Eigene Aufnahme
- (2) Homepage domrep-immobilien; from http://domrep-immobilien.blogspot.it/2008_10_01_archive.html
- (3) Homepage ebay.de
- (4) Homepage Dataholz.com; from <http://www.dataholz.at/cgi-bin/WebObjects/dataholz.woa/wa/bauteil?language=de&kz=awropo06b>, 04.04.2013
- (5) Homepage Baupraxis.de; from <http://baupraxis.de/magazin/bauplanung/wandkonstruktionen-mit-ziegel.html>, 04.04.2013
- (6) Eigene Zeichnung
- (7) Homepage sto.de, 15.05.2013; from http://www.sto.de/de/topnav/presse/presse-meldungen_35459.html
- (8) Homepage synthesa.at, 15.05.2013; from http://www.synthesa.at/index.php?id=891&no_cache=1&L=0&actMenuId=4028e42923e1fd9e0123e20075350cc8&cltpid=4028e42923e1fd9e0123e20075f00cd1&cltpnlsid=4028e42923e1fd9e0123e20075f00cd2
- (9) EJOT Baubefestigungen GmbH, EPD-EJT-2011112- D: Verankerungs- und Befestigungselemente für Wärmedämm-Verbundsysteme
- (10) Homepage rednet-gewebe.de, 15.05.2013; from <http://www.rednet-gewebe.de/rednet.php?id=6>
- (11) Homepage Baunetzwissen, 04.03.2013; from http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Daemmstoffe_Holzwohle-und-Mehrschicht-Leichtbauplatten_152152.html?img=0&layout=galerie
- (12) Homepage Baunetzwissen, 04.03.2013; from http://www.baunetzwissen.de/glossar-begriffe/Gesund-Bauen-nbsp-Gipsfaserplatten_1547637.html?img=1&layout=galerie
- (13) Homepage Ziegelvertrieb Bayern, 15.05.2013; from <http://www.ziegelvertrieb-bayern.de/html/mauertec.html>
- (14) Homepage fraunhofer.de, 15.05.2013; https://www.irb.fraunhofer.de/denkmalpflege/materialkennwerte.jsp?blatt=W_rmed_mmputz
- (15) Homepage baulinks.de, 15.05.2013; from <http://www.baulinks.de/webplugin/2011/1058.php4>
- (16) Homepage Holzland Köster; from http://www.holzland-koester-shop.de/product_info.php/info/p1439_Konstruktionsholz--40-x-60-mm---Standardlaengen-.html
- (17) Homepage ricardo.ch; from <http://www.ricardo.ch/kaufen/handwerk-und-garten/baustoffe/isolation-glaswohle-20cm-preis-pro-m2/v/b/an697748076/>
- (18) Homepage floorcenter.eu; from <http://www.floorcenter.eu/bodenbelag/zubehoer/trittschalldaemmung/pe-dampfbremse-aquastop-400-cm-100-m/a-19597/>
- (19) Homepage Wienerberger; from <http://www.wienerberger.at/wand/produktkatalog/porotherm-wandsysteme>

10. LIEFERANTENVERZEICHNIS

Aus Datenschutzgründen wird das Verzeichnis der Lieferanten nicht veröffentlicht.
Auf Nachfrage kann dieses zur Verfügung gestellt werden.

BETONREZEPTUR

Aus Datenschutzgründen wird die Betonrezeptur nicht veröffentlicht. Auf Nachfrage kann diese zur Verfügung gestellt werden.

11. ANHANG

Ü. Stoffflussdiagramme

- ÜT: Übersicht der berücksichtigten Stoffflüsse für die PROGRESS Thermowand®
- ÜH: Übersicht der berücksichtigten Stoffflüsse für die Holzrahmenbauweise
- ÜZ: Übersicht der berücksichtigten Stoffflüsse für das Ziegelmauerwerk

T. Tabellen PROGRESS Thermowand®

- T1: Materialkennwerte
- T2: Energiegehalt Produktionsstadium
- T3: Zusammenfassung Produktionsstadium
- T4: Entsorgungsstadium
- T5: Zusammenfassung gesamter Lebenszyklus
- T6: Sensitivitätsanalyse Zusammenfassung

H. Tabellen Holzrahmenbauweise

- H1: Materialkennwerte
- H2: Energiegehalt Produktionsstadium
- H3: Zusammenfassung Produktionsstadium
- H4: Entsorgungsstadium
- H5: Zusammenfassung gesamter Lebenszyklus
- H6: Sensitivitätsanalyse Zusammenfassung

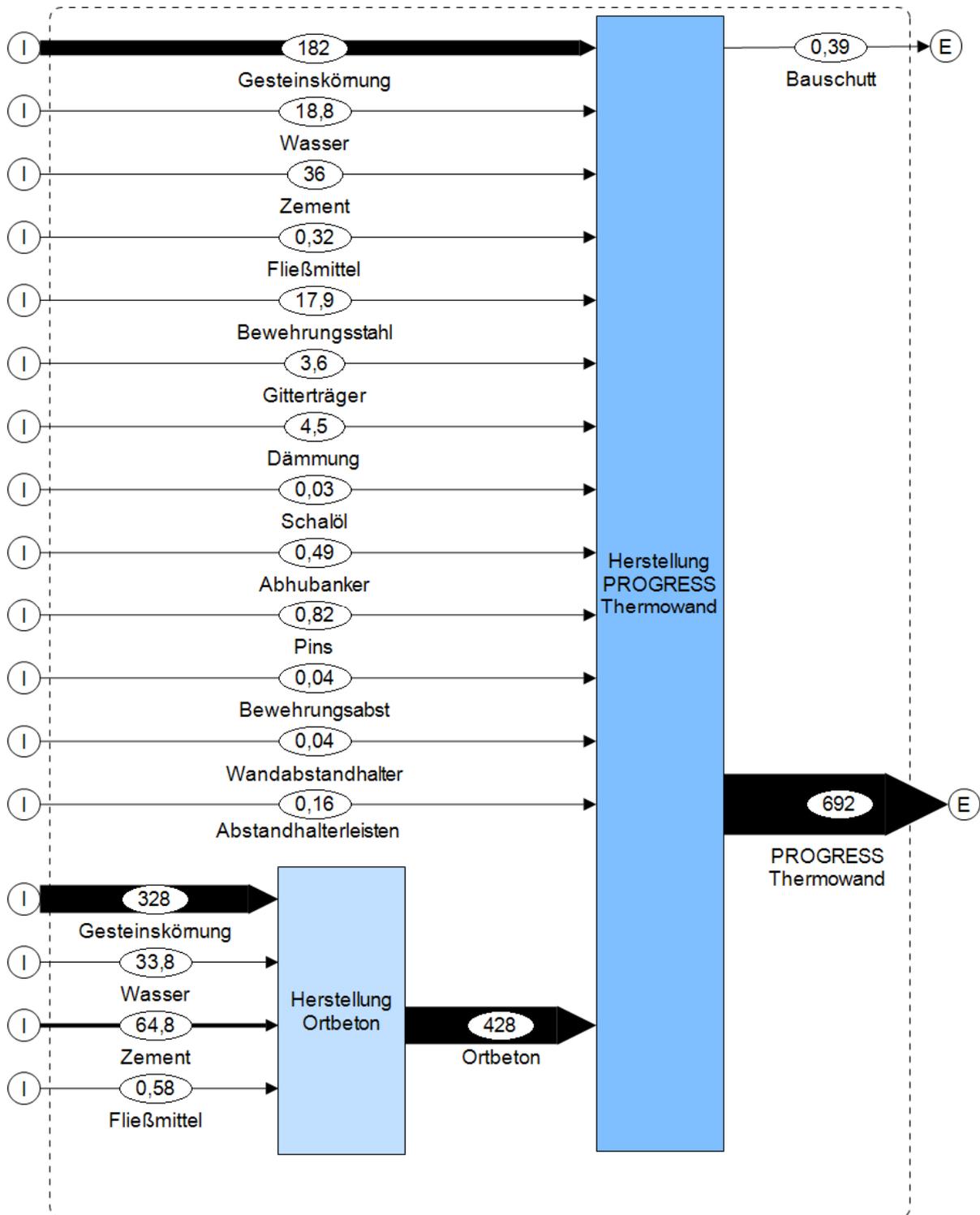
Z. Tabellen Ziegelmauerwerk

- Z1: Materialkennwerte
- Z2: Energiegehalt Produktionsstadium
- Z3: Zusammenfassung Produktionsstadium
- Z4: Entsorgungsstadium
- Z5: Zusammenfassung gesamter Lebenszyklus
- Z6: Sensitivitätsanalyse Zusammenfassung

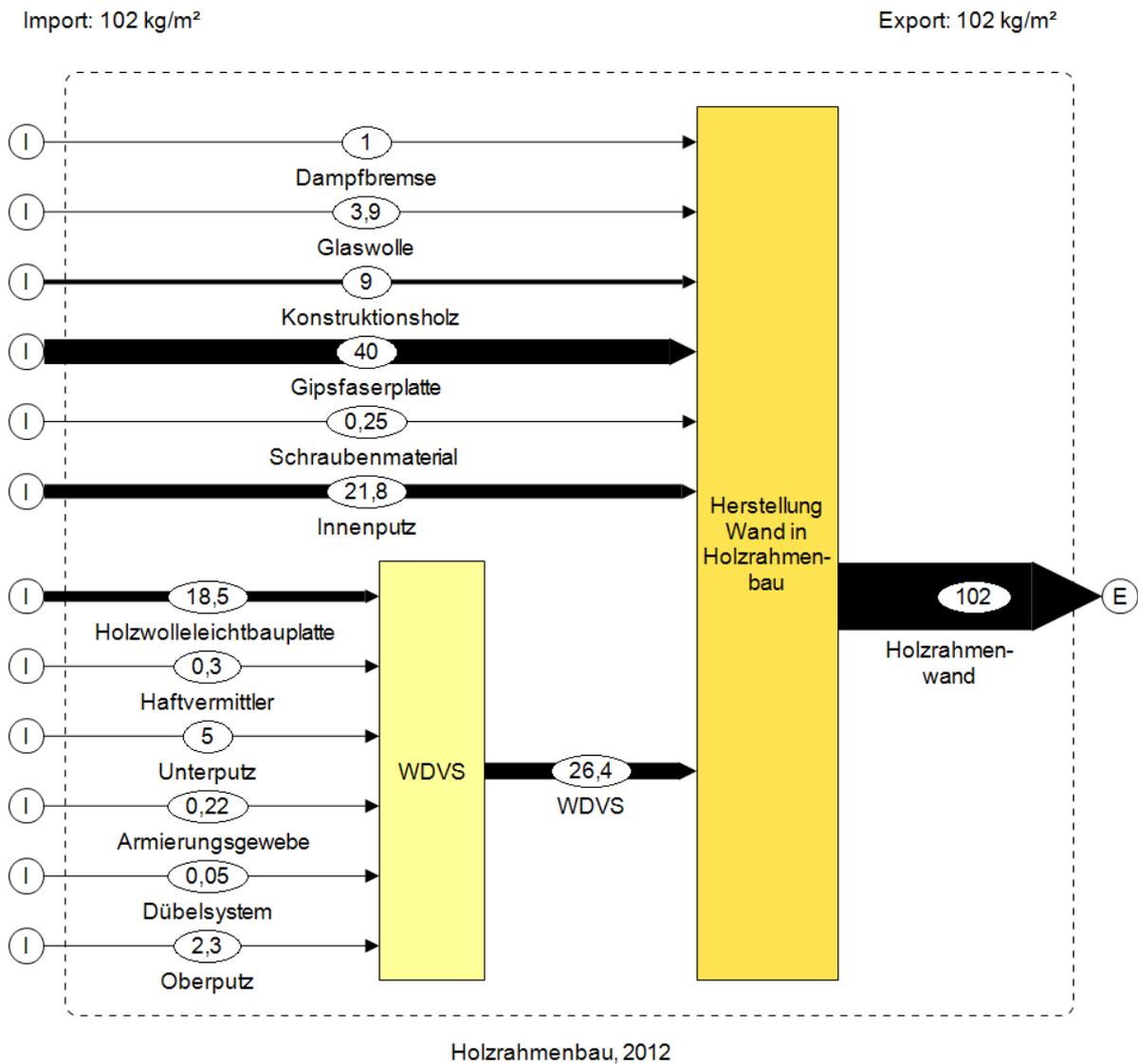
ÜT: Übersicht der berücksichtigten Stoffflüsse für die PROGRESS Thermowand®.

Import: 693 kg/m²

Export: 693 kg/m²



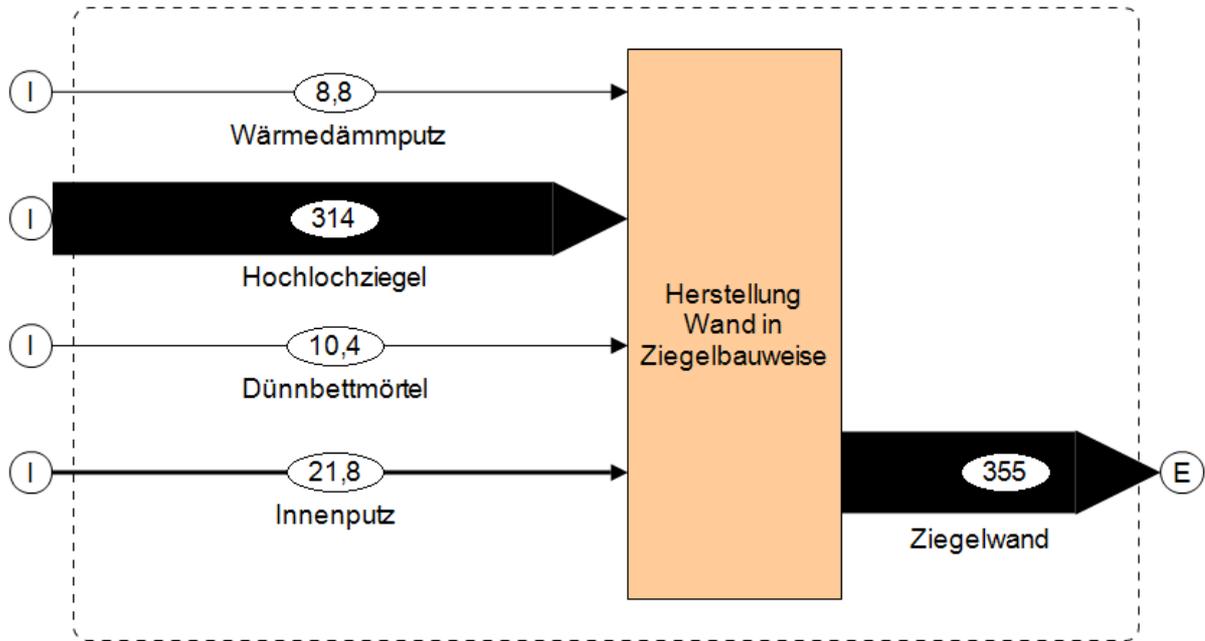
ÜH: Übersicht der berücksichtigten Stoffflüsse für die Holzrahmenbauweise.



ÜH: Übersicht der berücksichtigten Stoffflüsse für das Ziegelmauerwerk.

Import: 355 kg/m²

Export: 355 kg/m²



Ziegelmauerwerk, 2012

PROGRESS Thermowand®	Materialkennwerte	T1
-----------------------------	--------------------------	-----------

Pos.	Material	Beschreibung	Menge	Schicht-	Roh-	Wärmeleit-	Masse / m ²	Anteil an
				stärke	dichte	fähigkeit	Wand	Masse
				[cm]	[kg/m ³]	[W/m ² K]	[kg]	M%
1	Beton	Schalen	2x5 cm	10	2374	2,3	237,4	34%
2	Ortbeton	Hinterfüllung	18 cm	18	2374	2,3	427,3	62%
3	PUR	Dämmung	1,05 m ² / m ² , 12 cm	12	36	0,023	4,5	1%
4	PVC	Abstandhalter	8 Stück /m ² zu 5 g	-			0,04	0%
5	Kunststoff mit GFK	Pins GFK SySpro	7 Stück /m ² zu 117,1g	-	1360	0,36	0,82	0%
6	Kunststoff mit GFK	Pins GFK CSM	1 Stück / m ² zu 40g	-		0,028	0,04	0%
7	Kunststoff mit GFK	Abhubanker	0,25 Stück /m ² zu 1,96kg	-	2075	0,43	0,49	0%
8	PVC	Drunterleiste	1 lfm / m ²	-			0,16	0%
9	Baustahl	Coil	17, 92 kg / m ²	-	7850	-	17,9	3%
10	Baustahl	GTR	3,60 kg / m ²	-	7850	-	3,6	1%
11	min. Öl	Schalöl-Trennmittel	0,04 l/m ²	-	750	-	0,03	0%
12	Abfälle	Baurestmassen	0,39 kg / m ²	-			0,39	-
13	Energie [kWh/m ²]	Produktion		-			12,2	-
14	Transport [tkm]			-			30,3	-
Summe				40,00		U= 0,18	692,3	100%

Beton Alternativ

1a	Zement	CEM II A-S	360,0 kg/m ³	-	3100	-	360	15%
1b	Sand	0/2	819,0 kg/m ³	-	2683	-	819	34%
1c	Kies	2/8 und 4/16	1005,0 kg/m ³	-	2707	-	1005	42%
1d	Wasser	Wasser	188,0 kg/m ³	-	1000	-	188	8%
1e	min. Öl	Fließmittel	3,2 kg/m ³	-	1070	-	3,2	0%
Summe je m³							2374,0	100%
Summe je m ²								

Holzrahmenbau	Materialkennwerte	H1
----------------------	--------------------------	-----------

Pos.	Material	Beschreibung	Menge	Schicht-	Roh-	Wärmeleit-	Masse / m ²	Anteil an
				stärke	dichte	fähigkeit	Wand	Masse
				[cm]	[kg/m ³]	[W/m ² K]	[kg]	M%
1	mineralischer Putzmörtel	Oberputz Vollabrieb- Körnung von 1-3	2,3 kg/m ²	0,153	1500	0,87	2,3	2%
2	Farbe und Grundierung	Haftvermittler / Isoliergrund mit org. Bindemittel	0,3 kg/m ²	0,02	1500	-	0,3	0%
3	mineralischer Putzmörtel	Unterputz	5 kg/m ²	0,333	1500	0,87	5,0	5%
4	Textilglas	Armierungsgewebe	1,1 m ² /m ² zu 200 g/m ²	-	-	-	0,22	0%
5	Holzwoleleichbauplatte	Dämmung		5	370	0,09	18,5	18%
6	PVC	Dübelsystem	6 Stück/m ² zu 0,082g	-	-	-	0,05	0%
7	Gipsfaserplatte	Gipsfaserplatte		1,5	1000	0,32	15,0	15%
8	Holz	Konstruktionsholz (60/200 e=625)	Schichtanteil 10,62%	20	470	0,13	9,0	9%
9	Glaswolle	Zwischendämmung	Schichtanteil 89,38%	20	20	0,04	3,9	4%
10	PE-bahn	Dampfbremse		0,1	1000	-	1,0	1%
11	Gipsfaserplatte	Gipsfaserplatte		2,5	1000	0,32	25,0	24%
12	Kalk-Gipsputz	Innenputz		1,5	1450	0,6	21,8	21%
13	Stahl	Schraubenmaterial		-	-	-	0,25	0%
14	Energie [kWh/m ²]	Produktion		-	-	-	9,4	-
15	Transport [tkm]			-	-	-	34,7	-
Summe				31,11		U= 0,18	102,3	100%

Ziegelmauerwerk	Materialkennwerte	Z1
------------------------	--------------------------	-----------

Pos.	Material	Beschreibung	Menge	Schicht-	Roh-	Wärmeleit-	Masse / m ²	Anteil an
				stärke	dichte	fähigkeit	Wand	Masse
				[cm]	[kg/m ³]	[W/m ² K]	[kg]	M%
1	Wärmedämmputz	außen, mit EPS		4	220	0,09	8,8	2%
2	keram. Hochlochziegel	Plan 50/24/24,9	ca. 16 Stk/m ²	50	630	0,1	313,6	88%
3	Dünnbettmörtel	LM 21	7l/m ²	50	1700	1,4	10,4	3%
4	Kalk-Gipsputz	Innenputz		1,5	1450	0,6	21,8	6%
5	Energie [kWh/m ²]	Produktion					5,34	-
6	Transport [tkm]						173,2	-
Summe				55,50		U= 0,18	354,5	100%

PROGRESS Thermowand®	Zusammenfassung Produktionsstadium (cradle to gate)	T3
-----------------------------	--	-----------

Pos.	Material	Produktionsstadium			Lebens- dauer [Jahre]	Zyklen in 50 Jahren	Produktionsstadium		
		einmalig					für 50 Jahre		
		M.P.N.E [MJ]	M.P.E [MJ]	M.P.N.E +M.P.E. [MJ]			M.P.N.E [MJ]	M.P.E [MJ]	M.P.N.E +M.P.E. [MJ]
1	Beton	189,9	7,9	203,3	70	1,0	189,9	7,9	203,3
2	Ortbeton	341,8	14,3	366,0	70	1,0	341,8	14,3	366,0
3	PUR	470,8	10,3	450,3	60	1,0	470,8	10,3	450,3
4	PVC	2,4	0,1	2,6	70	1,0	2,4	0,1	2,6
5	Kunststoff mit GFK	59,3	2,6	65,9	70	1,0	59,3	2,6	65,9
6	Kunststoff mit GFK	2,9	0,1	3,2	70	1,0	2,9	0,1	3,2
7	Kunststoff mit GFK	35,6	1,6	39,6	70	1,0	35,6	1,6	39,6
8	PVC	9,9	0,5	10,4	70	1,0	9,9	0,5	10,4
9	Baustahl	217,1	20,2	236,7	70	1,0	217,1	20,2	236,7
10	Baustahl	43,7	4,1	47,6	70	1,0	43,7	4,1	47,6
11	min. Öl	1,7	0,0	1,7	-	1,0	1,7	0,0	1,7
12	Abfälle	0,0	0,0	0,0	-	1,0	0,0	0,0	0,0
13	Energie [kWh/m²]	127,8	14,0	141,8	-	1,0	127,8	14,0	141,8
14	Transport [tkm]	35,1	1,1	36,3	-	1,0	35,1	1,1	36,3
Summe		1537,9	76,7	1605,5			1537,9	76,7	1605,5

Beton Alternativ

1a	Zement	1623,3	37,2	1659,8	70	1,0	1623,3	37,2	1659,8
1b	Sand	53,6	2,8	60,6	70	1,0	53,6	2,8	60,6
1c	Kies	118,3	7,1	125,4	70	1,0	118,3	7,1	125,4
1d	Wasser	1,5	0,0	1,5	70	1,0	1,5	0,0	1,5
1e	min. Öl	188,1	0,3	188,5	70	1,0	188,1	0,3	188,5
Summe je m³		1984,8	47,5	2035,8			1984,8	47,5	2035,8
Summe je m²		551,3	13,2	565,5			551,3	13,2	565,5

Holzrahmenbau	Zusammenfassung Produktionsstadium (cradle to gate)	H3
----------------------	--	-----------

Pos.	Material	Produktionsstadium			Lebens- dauer [Jahre]	Zyklen in 50 Jahren	Produktionsstadium		
		einmalig					für 50 Jahre		
		M.P.N.E [MJ]	M.P.E [MJ]	M.P.N.E +M.P.E. [MJ]			M.P.N.E [MJ]	M.P.E [MJ]	M.P.N.E +M.P.E. [MJ]
1	mineralischer Putzmörtel	3,8	0,5	4,2	30	2,0	7,6	1,0	8,5
2	Farbe und Grundierung	3,8	0,0	3,8	30	2,0	7,5	0,0	7,6
3	mineralischer Putzmörtel	17,7	0,5	18,2	30	2,0	35,4	1,0	36,4
4	Textilglas	15,0	1,6	16,6	30	2,0	30,1	3,1	33,2
5	Holzwoleleichbauplatte	107,9	111,2	206,8	30	2,0	215,8	222,5	413,5
6	PVC	3,8	0,2	3,9	30	2,0	7,6	0,5	7,8
7	Gipsfaserplatte	73,1	2,6	80,9	50	1,0	73,1	2,6	80,9
8	Holz	25,3	176,4	224,0	70	1,0	25,3	176,4	224,0
9	Glaswolle	128,6	8,8	131,6	60	1,0	128,6	8,8	131,6
10	PE-bahn	90,9	1,6	100,8	40	2,0	181,9	3,1	201,6
11	Gipsfaserplatte	121,9	4,4	134,8	50	2,0	243,7	8,8	269,5
12	Kalk-Gipsputz	38,3	2,3	40,3	40	2,0	76,5	4,6	80,6
13	Stahl	2,8	0,3	3,1	-	1,0	2,8	0,3	3,1
14	Energie [kWh/m²]	89,6	1,7	91,3	-	1,0	89,6	1,7	91,3
15	Transport [tkm]	40,3	1,3	41,6	-	1,0	40,3	1,3	41,6
Summe		729,5	336,3	1087,1			1165,8	435,7	1631,1

Ziegelmauerwerk	Zusammenfassung Produktionsstadium (cradle to gate)	Z3
------------------------	--	-----------

Pos.	Material	Produktionsstadium			Lebens- dauer [Jahre]	Zyklen in 50 Jahren	Produktionsstadium		
		einmalig					für 50 Jahre		
		M.P.N.E [MJ]	M.P.E [MJ]	M.P.N.E +M.P.E. [MJ]			M.P.N.E [MJ]	M.P.E [MJ]	M.P.N.E +M.P.E. [MJ]
1	Wärmedämmputz	254,8	5,4	260,2	30	2,0	509,6	10,8	520,5
2	keram. Hochlochziegel	612,9	78,9	733,3	90	1,0	612,9	78,9	733,3
3	Dünnbettmörtel	39,8	2,5	37,6	90	1,0	39,8	2,5	37,6
4	Kalk-Gipsputz	35,9	2,3	38,3	40	2,0	71,8	4,6	76,7
5	Energie [kWh/m²]	50,9	6,1	57,0	-	1,0	50,9	6,1	57,0
6	Transport [tkm]	200,6	4,0	204,6	-	1,0	200,6	4,0	204,6
Summe		1194,9	99,1	1331,1			1485,6	106,9	1629,7

PROGRESS Thermowand®	Entsorgungsstadium	T4
-----------------------------	---------------------------	-----------

Pos.	Material	Ökobau.dat [III]							Entsorgungsstadium			Entsorgungsstadium			
		N.E	E.	S.	BE	Σ	P.N.E	P.E	P.T	einmalig			für 50 Jahre		
										M.P.N.E	M.P.E	M.P.N.E	M.P.N.E	M.P.E	M.P.N.E
		MJ/BE	MJ/BE	MJ/B	- MJ/BE	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]
1	Beton	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	12,3	0,5	12,8	12,3	0,5	12,8	12,3	0,5	12,8
2	Ortbeton	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	22,2	0,9	23,1	22,2	0,9	23,1	22,2	0,9	23,1
3	PUR	-30,2	-0,4		kg	-30,6	-137,0	-1,8	-138,8	-137,0	-1,8	-138,8	-137,0	-1,8	-138,8
4	PVC	-24,4	-1,9	0,0	kg	-26,3	-1,0	-0,1	-1,1	-1,0	-0,1	-1,1	-1,0	-0,1	-1,1
5	Kunststoff mit GFK	-24,4	-1,9	0,0	kg	-26,3	-20,0	-1,6	-21,6	-20,0	-1,6	-21,6	-20,0	-1,6	-21,6
6	Kunststoff mit GFK	-24,4	-1,9	0,0	kg	-26,3	-1,0	-0,1	-1,1	-1,0	-0,1	-1,1	-1,0	-0,1	-1,1
7	Kunststoff mit GFK	-24,4	-1,9	0,0	kg	-26,3	-12,0	-1,0	-13,0	-12,0	-1,0	-13,0	-12,0	-1,0	-13,0
8	PVC	-24,4	-1,9	0,0	kg	-26,3	-4,0	-0,3	-4,3	-4,0	-0,3	-4,3	-4,0	-0,3	-4,3
9	Baustahl	0,1	-0,2		kg	0,0	2,0	-2,7	-0,7	2,0	-2,7	-0,7	2,0	-2,7	-0,7
10	Baustahl	0,1	-0,2		kg	0,0	0,4	-0,5	-0,1	0,4	-0,5	-0,1	0,4	-0,5	-0,1
11	min. Öl												-	-	-
12	Abfälle												-	-	-
13	Energie [kWh/m²]												-	-	-
14	Transport [tkm]												-	-	-
	Summe						-138,03	-6,63	-144,67	-138,0	-6,6	-144,7	-138,0	-6,6	-144,7

Holzrahmenbau	Entsorgungsstadium	H4
----------------------	---------------------------	-----------

Pos.	Material	Ökobau.dat [III]							Entsorgungsstadium			Entsorgungsstadium			
		N.E MJ/BE	E. MJ/BE	S. MJ/B	BE kg	Σ MJ/BE	P.N.E MJ	P.E MJ	P.T MJ	einmalig			für 50 Jahre		
										M.P.N.E MJ	M.P.E MJ	M.P.N.E +M.P.E. MJ	M.P.N.E MJ	M.P.E MJ	M.P.N.E +M.P.E. MJ
1	mineralischer Putzmörtel	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2	
2	Farbe und Grundierung	0,8	0,0	0,0	kg	0,9	0,2	0,0	0,3	0,0	0,3	0,5	0,0	0,5	
3	mineralischer Putzmörtel	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	0,5	0,0	0,5	
4	Textilglas	0,8	0,0	0,0	kg	0,9	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,4	0,0	0,4	
5	Holzwoleleichbauplatte	1,5	0,7		kg	2,2	28,1	12,6	40,7	28,1	12,6	40,7	56,2	25,2	81,4
6	PVC	-24,4	-1,9	0,0	kg	-26,3	-1,2	-0,1	-1,3	-1,2	-0,1	-1,3	-2,4	-0,2	-2,6
7	Gipsfaserplatte	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,8	0,0	0,8	
8	Holz	-11,9	-0,9	0,0	kg	-12,8	-107,4	-8,2	-115,6	-107,4	-8,2	-115,6	-107,4	-8,2	-115,6
9	Glaswolle	0,1	0,0	0,0	kg	0,0	0,2	-0,1	0,2	0,2	-0,1	0,2	0,2	-0,1	0,2
10	PE-bahn	-24,4	-1,9	0,0	kg	-26,3	-24,4	-1,9	-26,3	-24,4	-1,9	-26,3	-48,8	-3,9	-52,7
11	Gipsfaserplatte	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	1,3	0,1	1,4	1,3	0,1	1,4	2,6	0,1	2,7
12	Kalk-Gipsputz	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	1,1	0,0	1,2	1,1	0,0	1,2	2,3	0,1	2,3
13	Stahl	0,1	-0,2		kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	Energie [kWh/m²]														
15	Transport [tkm]														
	Summe					-100,59	2,35	-98,23	-100,59	2,35	-98,23	-94,8	13,0	-81,8	

Ziegelmauerwerk	Entsorgungsstadium	24
-----------------	--------------------	----

Pos.	Material	Ökobau.dat [III]							Entsorgungsstadium			Entsorgungsstadium			
		N.E	E.	S.	BE	Σ	P.N.E	P.E	P.T	einmalig			für 50 Jahre		
										M.P.N.E	M.P.E	M.P.N.E	M.P.N.E	M.P.E	M.P.N.E
		MJ/BE	MJ/BE	MJ/B	- MJ/BE	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]
1	Wärmedämmputz	0,829	0,021	0,0	kg	0,9	7,3	0,2	7,5	7,3	0,2	7,5	14,6	0,4	15,0
2	keram. Hochlochziegel	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	16,3	0,7	16,9	16,3	0,7	16,9	16,3	0,7	16,9
3	Dünnbettmörtel	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	0,5	0,0	0,6	0,5	0,0	0,6	0,5	0,0	0,6
4	Kalk-Gipsputz	0,1	0,0	0,0	kg	0,1	1,1	0,0	1,2	1,1	0,0	1,2	2,3	0,1	2,3
5	Energie [kWh/m²]														
6	Transport [tkm]														
	Summe						25,26	0,90	26,16	25,26	0,90	26,16	33,7	1,1	34,8

PROGRESS Thermowand®	Zusammenfassung gesamter Lebenszyklus	T5
-----------------------------	--	-----------

Pos.	Material	Produktionsstadium				Entsorgungsstadium				Cradle to Grave			
		für 50 Jahre				für 50 Jahre				für 50 Jahre			
		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E	
		M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	
1	Beton	189,9	7,9	203,3	12,7%	12,3	0,5	12,8	-8,9%	202,2	8,4	216,2	14,8%
2	Ortbeton	341,8	14,3	366,0	22,8%	22,2	0,9	23,1	-16,0%	364,0	15,2	389,1	26,6%
3	PUR	470,8	10,3	450,3	28,0%	-137,0	-1,8	-138,8	95,9%	333,8	8,5	311,5	21,3%
4	PVC	2,4	0,1	2,6	0,2%	-1,0	-0,1	-1,1	0,7%	1,5	0,0	1,5	0,1%
5	Kunststoff mit GFK	59,3	2,6	65,9	4,1%	-20,0	-1,6	-21,6	14,9%	39,3	1,0	44,3	3,0%
6	Kunststoff mit GFK	2,9	0,1	3,2	0,2%	-1,0	-0,1	-1,1	0,7%	1,9	0,0	2,2	0,1%
7	Kunststoff mit GFK	35,6	1,6	39,6	2,5%	-12,0	-1,0	-13,0	9,0%	23,6	0,6	26,6	1,8%
8	PVC	9,9	0,5	10,4	0,7%	-4,0	-0,3	-4,3	2,9%	5,9	0,1	6,2	0,4%
9	Baustahl	217,1	20,2	236,7	14,7%	2,0	-2,7	-0,7	0,5%	219,0	17,5	236,0	16,2%
10	Baustahl	43,7	4,1	47,6	3,0%	0,4	-0,5	-0,1	0,1%	44,1	3,5	47,5	3,2%
11	min. Öl	1,7	0,0	1,7	0,1%	-	-	-		1,7	0,0	1,7	0,1%
12	Abfälle	0,0	0,0	0,0	0,0%	-	-	-		0,0	0,0	0,0	0,0%
13	Energie [kWh/m²]	127,8	14,0	141,8	8,8%	-	-	-		127,8	14,0	141,8	9,7%
14	Transport [tkm]	35,1	1,1	36,3	2,3%	-	-	-		35,1	1,1	36,3	2,5%
	Summe	1537,9	76,7	1605,5	100,0%	-138,0	-6,6	-144,7	100,0%	1399,9	70,1	1460,8	100,0%

Holzrahmenbau	Zusammenfassung gesamter Lebenszyklus	H5
----------------------	--	-----------

Pos.	Material	Produktionsstadium				Entsorgungsstadium				Cradle to Grave			
		für 50 Jahre				für 50 Jahre				für 50 Jahre			
		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E	
		M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	
1	mineralischer Putzmörtel	7,6	1,0	8,5	0,5%	0,2	0,0	0,2	-0,3%	7,8	1,0	8,7	0,6%
2	Farbe und Grundierung	7,5	0,0	7,6	0,5%	0,5	0,0	0,5	-0,6%	8,0	0,1	8,1	0,5%
3	mineralischer Putzmörtel	35,4	1,0	36,4	2,2%	0,5	0,0	0,5	-0,7%	35,9	1,0	36,9	2,4%
4	Textilglas	30,1	3,1	33,2	2,0%	0,4	0,0	0,4	-0,5%	30,4	3,1	33,6	2,2%
5	Holzwoleleichbauplatte	215,8	222,5	413,5	25,4%	56,2	25,2	81,4	-99,5%	272,1	247,6	494,9	31,9%
6	PVC	7,6	0,5	7,8	0,5%	-2,4	-0,2	-2,6	3,2%	5,2	0,3	5,2	0,3%
7	Gipsfaserplatte	73,1	2,6	80,9	5,0%	0,8	0,0	0,8	-1,0%	73,9	2,7	81,7	5,3%
8	Holz	25,3	176,4	224,0	13,7%	-107,4	-8,2	-115,6	141,3%	-82,1	168,2	108,4	7,0%
9	Glaswolle	128,6	8,8	131,6	8,1%	0,2	-0,1	0,2	-0,2%	128,8	8,8	131,8	8,5%
10	PE-bahn	181,9	3,1	201,6	12,4%	-48,8	-3,9	-52,7	64,4%	133,1	-0,8	148,9	9,6%
11	Gipsfaserplatte	243,7	8,8	269,5	16,5%	2,6	0,1	2,7	-3,3%	246,3	8,9	272,2	17,6%
12	Kalk-Gipsputz	76,5	4,6	80,6	4,9%	2,3	0,1	2,3	-2,9%	78,8	4,7	82,9	5,4%
13	Stahl	2,8	0,3	3,1	0,2%	0,0	0,0	0,0	0,0%	2,8	0,2	3,1	0,2%
14	Energie [kWh/m²]	89,6	1,7	91,3	5,6%					89,6	1,7	91,3	5,9%
15	Transport [tkm]	40,3	1,3	41,6	2,6%					40,3	1,3	41,6	2,7%
	Summe	1165,8	435,7	1631,1	100,0%	-94,8	13,0	-81,8	100,0%	1070,9	448,7	1549,3	100,0%

Ziegelmauerwerk	Zusammenfassung gesamter Lebenszyklus	Z5
------------------------	--	-----------

Pos.	Material	Produktionsstadium				Entsorgungsstadium				Cradle to Grave			
		für 50 Jahre				für 50 Jahre				für 50 Jahre			
		M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	M.P.N.E	
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]		[MJ]	[MJ]	[MJ]		
1	Wärmedämmputz	509,6	10,8	520,5	31,9%	14,6	0,4	7,5	28,6%	524,2	11,2	535,4	32,2%
2	keram. Hochlochziegel	612,9	78,9	733,3	45,0%	16,3	0,7	16,9	64,7%	629,2	79,5	750,3	45,1%
3	Dünnbettmörtel	39,8	2,5	37,6	2,3%	0,5	0,0	0,6	2,1%	40,3	2,5	38,2	2,3%
4	Kalk-Gipsputz	71,8	4,6	76,7	4,7%	2,3	0,1	1,2	4,5%	74,0	4,7	79,0	4,7%
5	Energie [kWh/m²]	50,9	6,1	57,0	3,5%					50,9	6,1	57,0	3,4%
6	Transport [tkm]	200,6	4,0	204,6	12,6%					200,6	4,0	204,6	12,3%
	Summe	1485,6	106,9	1629,7	100,0%	33,7	1,1	26,2	100,0%	1519,3	108,0	1664,5	100,0%

Pos.	Material	Produktionsstadium			Entsorgungsstadium			Lebens- dauer [Jahre]	Zyklen je Jahr -	Produktionsstadium				Entsorgungsstadium				Cradle to Grave					
		einmalig			einmalig					pro Jahr				pro Jahr				pro Jahr					
		M.P.N.E			M.P.N.E					M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E	
		M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.			M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]			[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil			
1	Beton	189,9	7,9	203,3	12,3	0,5	12,8	70	0,014	2,7	0,1	2,9	11,6%	0,2	0,0	0,2	-7,6%	2,9	0,1	3,1	13,6%		
2	Ortbeton	341,8	14,3	366,0	22,2	0,9	23,1	70	0,014	4,9	0,2	5,2	20,9%	0,3	0,0	0,3	-13,8%	5,2	0,2	5,6	24,6%		
3	PUR	470,8	10,3	450,3	-137,0	-1,8	-138,8	60	0,017	7,8	0,2	7,5	30,0%	-2,3	0,0	-2,3	96,5%	5,6	0,1	5,2	22,9%		
4	PVC	2,4	0,1	2,6	-1,0	-0,1	-1,1	70	0,014	0,0	0,0	0,0	0,1%	0,0	0,0	0,0	0,6%	0,0	0,0	0,0	0,1%		
5	Kunststoff mit GFK	59,3	2,6	65,9	-20,0	-1,6	-21,6	70	0,014	0,8	0,0	0,9	3,8%	-0,3	0,0	-0,3	12,9%	0,6	0,0	0,6	2,8%		
6	Kunststoff mit GFK	2,9	0,1	3,2	-1,0	-0,1	-1,1	70	0,014	0,0	0,0	0,0	0,2%	0,0	0,0	0,0	0,6%	0,0	0,0	0,0	0,1%		
7	Kunststoff mit GFK	35,6	1,6	39,6	-12,0	-1,0	-13,0	70	0,014	0,5	0,0	0,6	2,3%	-0,2	0,0	-0,2	7,7%	0,3	0,0	0,4	1,7%		
8	PVC	9,9	0,5	10,4	-4,0	-0,3	-4,3	70	0,014	0,1	0,0	0,1	0,6%	-0,1	0,0	-0,1	2,5%	0,1	0,0	0,1	0,4%		
9	Baustahl	217,1	20,2	236,7	2,0	-2,7	-0,7	70	0,014	3,1	0,3	3,4	13,5%	0,0	0,0	0,0	0,4%	3,1	0,3	3,4	14,9%		
10	Baustahl	43,7	4,1	47,6	0,4	-0,5	-0,1	70	0,014	0,6	0,1	0,7	2,7%	0,0	0,0	0,0	0,1%	0,6	0,1	0,7	3,0%		
11	min. Öl	1,7	0,0	1,7				*50	0,020	0,0	0,0	0,0	0,1%					0,0	0,0	0,0	0,2%		
12	Abfälle	0,0	0,0	0,0				*50	0,020	0,0	0,0	0,0	0,0%					0,0	0,0	0,0	0,0%		
13	Energie [kWh/m²]	127,8	14,0	141,8				*50	0,020	2,6	0,3	2,8	11,3%					2,6	0,3	2,8	12,5%		
14	Transport [tkm]	35,1	1,1	36,3				*50	0,020	0,7	0,0	0,7	2,9%					0,7	0,0	0,7	3,2%		
Summe		1537,9	76,7	1605,5	-138,0	- 6,6	-144,7			24,0	1,2	25,0	100,0%	-2,3	-0,1	-2,4	100,0%	21,7	1,1	22,6	100,0%		

Legende

P.N.E Produkt nicht erneuerbar und Masse

P.E Produkt erneuerbar

M. Mittelwert

* Annahme

Holzrahmenbau	Sensitivitätsanalyse Zusammenfassung	H6
----------------------	---	-----------

Pos.	Material	Produktionsstadium			Entsorgungsstadium			Lebens- dauer [Jahre]	Zyklen je Jahr -	Produktionsstadium				Entsorgungsstadium				Cradle to Grave					
		einmalig			einmalig					pro Jahr				pro Jahr				pro Jahr					
		M.P.N.E			M.P.N.E					M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E	
		M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.			M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]				[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil		
1	mineralischer Putzmörtel	3,8	0,5	4,2	0,1	0,0	0,1	30	0,033	0,1	0,0	0,1	0,6%	0,0	0,0	0,0	-0,5%	0,1	0,0	0,1	0,6%		
2	Farbe und Grundierung	3,8	0,0	3,8	0,2	0,0	0,3	30	0,033	0,1	0,0	0,1	0,5%	0,0	0,0	0,0	-1,0%	0,1	0,0	0,1	0,6%		
3	mineralischer Putzmörtel	17,7	0,5	18,2	0,3	0,0	0,3	30	0,033	0,6	0,0	0,6	2,5%	0,0	0,0	0,0	-1,0%	0,6	0,0	0,6	2,6%		
4	Textilglas	15,0	1,6	16,6	0,2	0,0	0,2	30	0,033	0,5	0,1	0,6	2,3%	0,0	0,0	0,0	-0,7%	0,5	0,1	0,6	2,4%		
5	Holzwoleleichbauplatte	107,9	111,2	206,8	28,1	12,6	40,7	30	0,033	3,6	3,7	6,9	28,2%	0,9	0,4	1,4	-151,8%	4,5	4,1	8,2	35,1%		
6	PVC	3,8	0,2	3,9	-1,2	-0,1	-1,3	30	0,033	0,1	0,0	0,1	0,5%	0,0	0,0	0,0	4,8%	0,1	0,0	0,1	0,4%		
7	Gipsfaserplatte	73,1	2,6	80,9	0,8	0,0	0,8	50	0,020	1,5	0,1	1,6	6,6%	0,0	0,0	0,0	-1,8%	1,5	0,1	1,6	6,9%		
8	Holz	25,3	176,4	224,0	-107,4	-8,2	-115,6	70	0,014	0,4	2,5	3,2	13,1%	-1,5	-0,1	-1,7	184,8%	-1,2	2,4	1,5	6,6%		
9	Glaswolle	128,6	8,8	131,6	0,2	-0,1	0,2	60	0,017	2,1	0,1	2,2	9,0%	0,0	0,0	0,0	-0,3%	2,1	0,1	2,2	9,3%		
10	PE-bahn	90,9	1,6	100,8	-24,4	-1,9	-26,3	40	0,025	2,3	0,0	2,5	10,3%	-0,6	0,0	-0,7	73,7%	1,7	0,0	1,9	7,9%		
11	Gipsfaserplatte	121,9	4,4	134,8	1,3	0,1	1,4	50	0,020	2,4	0,1	2,7	11,0%	0,0	0,0	0,0	-3,0%	2,5	0,1	2,7	11,6%		
12	Kalk-Gipsputz	38,3	2,3	40,3	1,1	0,0	1,2	40	0,025	1,0	0,1	1,0	4,1%	0,0	0,0	0,0	-3,3%	1,0	0,1	1,0	4,4%		
13	Stahl	2,8	0,3	3,1	0,0	0,0	0,0	*50	0,020	0,1	0,0	0,1	0,3%	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,1	0,0	0,1	0,3%		
14	Energie [kWh/m²]	89,6	1,7	91,3				*50	0,020	1,8	0,0	1,8	7,5%					1,8	0,0	1,8	7,8%		
15	Transport [tkm]	40,3	1,3	41,6				*50	0,020	0,8	0,0	0,8	3,4%					0,8	0,0	0,8	3,5%		
Summe		729,5	336,3	1087,1	-100,59	2,35	-98,23			17,4	6,8	24,4	100,0%	-1,1	0,3	-0,9	100,0%	16,2	7,0	23,5	100,0%		

Legende
P.N.E Produkt nicht erneuerbar und Masse
P.E Produkt erneuerbar
M. Mittelwert
* Annahme

Ziegelmauerwerk	Sensitivitätsanalyse Zusammenfassung	Z6
------------------------	---	-----------

Pos.	Material	Produktionsstadium			Entsorgungsstadium			Lebens- dauer [Jahre]	Zyklen je Jahr -	Produktionsstadium				Entsorgungsstadium				Cradle to Grave					
		einmalig			einmalig					pro Jahr				pro Jahr				pro Jahr					
		M.P.N.E			M.P.N.E					M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E		M.P.N.E	
		M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.			M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E	+M.P.E.	+M.P.E.	M.P.N.E	M.P.E
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[MJ]				[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil	[MJ]	[MJ]	[MJ]	Anteil		
1	Wärmedämmputz	254,8	5,4	260,2	7,3	0,2	7,5	30	0,033	8,5	0,2	8,7	37,0%	0,2	0,0	0,2	52,7%	8,7	0,2	8,9	37,3%		
2	keram. Hochlochziegel	612,9	78,9	733,3	16,3	0,7	16,9	90	0,011	6,8	0,9	8,1	34,8%	0,2	0,0	0,2	39,8%	7,0	0,9	8,3	34,9%		
3	Dünnbettmörtel	39,8	2,5	37,6	0,5	0,0	0,6	90	0,011	0,4	0,0	0,4	1,8%	0,0	0,0	0,0	1,3%	0,4	0,0	0,4	1,8%		
4	Kalk-Gipsputz	35,9	2,3	38,3	1,1	0,0	1,2	40	0,025	0,9	0,1	1,0	4,1%	0,0	0,0	0,0	6,2%	0,9	0,1	1,0	4,1%		
5	Energie [kWh/m²]	50,9	6,1	57,0				*50	0,020	1,0	0,1	1,1	4,9%					1,0	0,1	1,1	4,8%		
6	Transport [tkm]	200,6	4,0	204,6				*50	0,020	4,0	0,1	4,1	17,5%					4,0	0,1	4,1	17,1%		
Summe		1194,9	99,1	1331,1	25,26	0,90	26,16			21,7	1,3	23,4	100,0%	0,5	0,0	0,5	100,0%	22,1	1,4	23,9	100,0%		

Legende
P.N.E Produkt nicht erneuerbar und Masse
P.E Produkt erneuerbar
M. Mittelwert
* Annahme