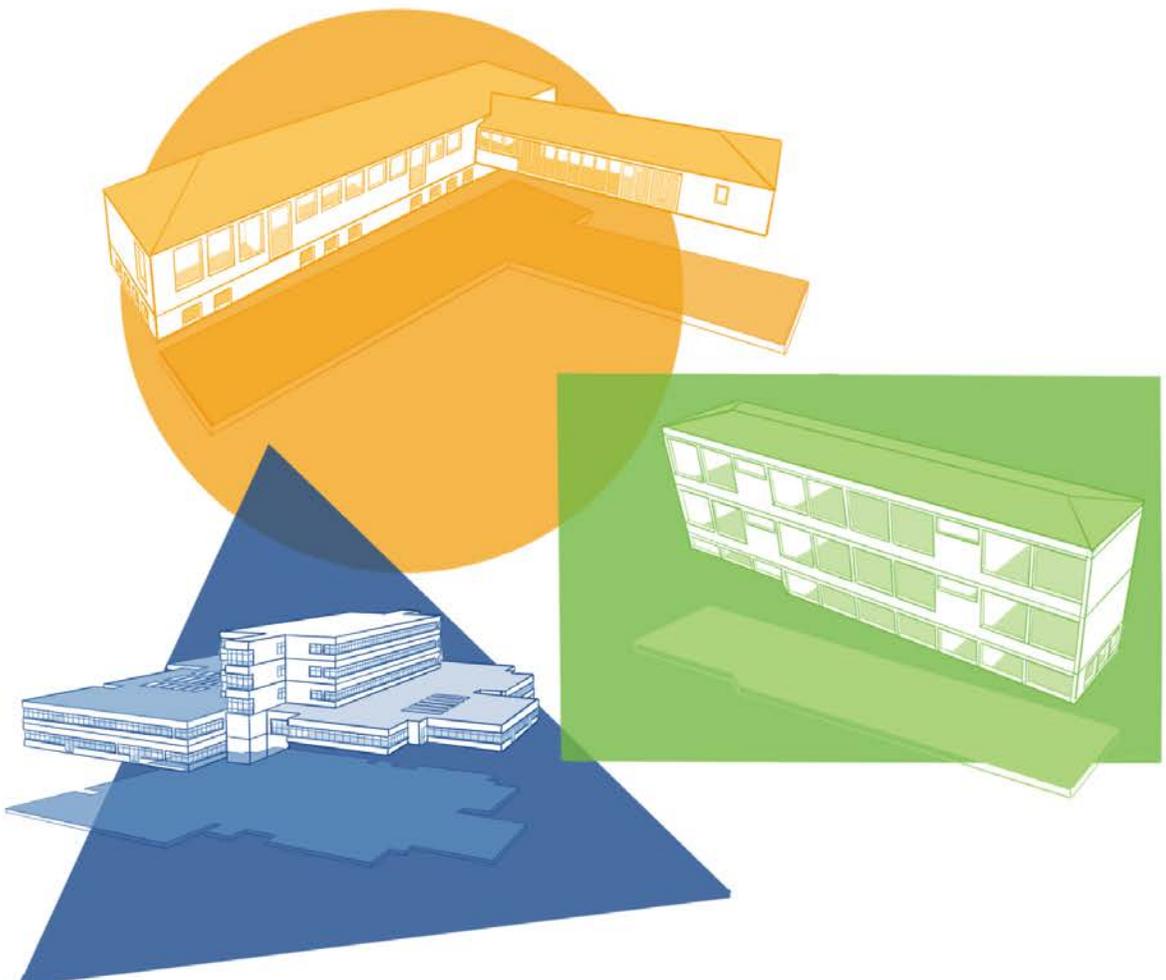


Hochschule Trier – Umwelt-Campus Birkenfeld

Institut für angewandtes Stoffstrommanagement

MEILENSTEINBERICHT M 1.2

BERICHT ZUR POTENZIALBETRACHTUNG
GEBÄUDESPEZIFISCHER MODELLE BEI DER NUTZUNG
ZIRKULÄRER BAUPRODUKTE UND
BAUSERVICEDIENSTLEISTUNGEN



Kontakte:

Prof. Dr. Peter Heck (Institutsleitung/Geschäftsführung) *Tel.: 06782 / 12-1221*
E-Mail: p.heck@umwelt-campus.de

Dipl.-BW (FH), Thomas Anton, M.Sc. (Projektleitung) *Tel.: 06782 / 17-1571*
E-Mail: m.mueller@umwelt-campus.de

Dipl.-BW (FH), Manuel Schaubt, M.Sc. (Projektmanagement) *Tel.: 06782 / 17-1488*
E-Mail: m.schaubt@umwelt-campus.de

Johannes Dietz, M.Sc. (Projektmitarbeit) *Tel.: 06782 / 17-2660*
E-Mail: j.dietz@umwelt-campus.de

Louis Kunz, B.Sc. (Projektmitarbeit) *Tel.: 06782 / 17-2638*
E-Mail: l.kunz@umwelt-campus.de

Birkenfeld, November 2023

Institut für angewandtes Stoffstrommanagement

Institute for applied Material Flow Management

Postbox 1380

55761 Birkenfeld

Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	III
II	Abkürzungsverzeichnis	V
III	Tabellenverzeichnis.....	VI
IV	Abbildungsverzeichnis.....	VIII
V	Einführung	X
1	<u>Analyse GWP, Graue Energie und Zirkularität der Bestandsgebäude</u>	1
1.1	Gebäudemasse der Bestandsgebäude	2
1.2	Graue Energie der Bestandsgebäude	5
1.3	Treibhauspotenzial der Bestandsgebäude	9
1.4	Zirkularität in Zusammenhang mit den Bestandsgebäuden	12
2	<u>Analyse der Umweltwirkung von Wand/Fassadenaufbauten für unterschiedliche Dämmungs-Optionen</u>	20
2.1	Beschreibung der Dämmungs-Optionen	20
2.2	Analyse-Ergebnisse der Dämmungs-Optionen.....	23
2.3	WDVS-Systeme 1a bis c	24
2.3.1	Konventionelles WDVS-System (1a)	26
2.3.2	Ökologisches WDVS-System (1b).....	27
2.3.3	Zirkuläres WDVS-System (1c)	29
2.4	Porenbeton.....	31
2.5	Zellulose-Einblasdämmung	32
2.5.1	Zellulose-Einblasdämmung mit Alu-Vorhangfassade (3a)	32
2.5.2	Zellulose-Einblasdämmung mit mineralischem Putz (3b)	35
2.6	Fenster (2-Fach-Verglasung ggü. 3-Fach-Verglasung)	37
2.6.1	Fenster (2-Fach-Glas).....	38
2.6.2	Fenster (3-Fach-Glas).....	38
2.7	Kurzüberblick – Variantenbewertung.....	39

3 <u>Synthese der Ergebnisse – Darstellung der Umweltwirkungen der Fasadensanierungs-Optionen auf Gebäudeebene</u>	41
4 <u>Anhang – Energetische Sanierungskonzepte der drei Modellgebäude</u>	51

I **Abkürzungsverzeichnis**

a	Annum / Jahr
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
FFB	Felix-Fechenbach-Berufskolleg
GWP	Global Warming Potential
HBK	Hanse-Berufskolleg
IWS	Irmela-Wendt-Schule
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
PENRE	Primary Energy Non-Renewable Energy
PENRM	Primary Energy Non-Renewable Material
PENRT	Primary Energy Non-Renewable Total
PERE	Primary Energy Renewable Energy
PERM	Primary Energy Renewable Material
PERT	Primary Energy Renewable Total
TGA	Technische Gebäude-Ausrüstung
WDVS	Wärme-Dämm-Verbund-System(e)

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: WDVS-Aufbau – konvent. mit Mineralfaser – Phys. Größen, GWP & PE	26
Tabelle 2: WDVS-Aufbau – konvent. mit Mineralfaser – Zirkularität.....	27
Tabelle 3: WDVS-Aufbau – ökologisch mit Holzfaser – Phys. Größen, GWP & PE	28
Tabelle 4: WDVS-Aufbau – ökologisch mit Holzfaser – Zirkularität.....	29
Tabelle 5: WDVS-Aufbau – zirkulär mit Mineralfaser – Phys. Größen, GWP & PE	30
Tabelle 6: WDVS-Aufbau – zirkulär mit Mineralfaser – Zirkularität.....	30
Tabelle 7: Porenbeton-Aufbau – Phys. Größen, GWP & PE	31
Tabelle 8: Porenbeton-Aufbau – Zirkularität	32
Tabelle 9: Zellulose-Einblasd. mit Alu-Vorhangfassade – Phys. Größen, GWP & PE	33
Tabelle 10: Zellulose-Einblasdämmung mit Alu-Vorhangfassade – Zirkularität	33
Tabelle 11: Zellulose-Einblasd. mit Alu-Vorhangfassade – Zirkularität (Potenzial)	35
Tabelle 12: Zellulose-Einblasdämmung mit mineral. Putz – Phys. Größen, GWP & PE	36
Tabelle 13: Zellulose-Einblasdämmung mit mineral. Putz – Zirkularität ...	36
Tabelle 14: Zellulose-Einblasdämmung mit mineral. Putz – Zirkularität (Potenzial)	37
Tabelle 15: Fenster pro m ² (2-Fach-Glas) – Phys. Größen, GWP & PE	38
Tabelle 16: Fenster pro m ² (2-Fach-Glas) – Zirkularität (Potenzial).....	38
Tabelle 17: Fenster pro m ² (3-Fach-Glas) – Phys. Größen, GWP & PE...	38
Tabelle 18: Fenster pro m ² (3-Fach-Glas) – Zirkularität (Potenzial).....	39

Tabelle 19: Kurzüberblick – Phys. Größen, GWP & PE	39
Tabelle 20: Kurzüberblick – Zirkularität (Potenzial)	40
Tabelle 21: Bauteilflächen und U-Werte der drei Modellgebäude.....	42
Tabelle 22: Umweltwirkungen der Dämmungs-Optionen im Kontext der Modellgebäude	44
Tabelle 23: Prognostische Endenergie-Einsparungen bei den Modellgebäuden nach Bauteilen	47
Tabelle 24: Ergebnisse der Umweltwirkung und Zirkularität für die Modellgebäude.....	49

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lebenswegmodule des Produkt-Lebenszyklus	XII
Abbildung 2:	Aufteilung der Masse des FFB (Geb. 4) nach Baustoff- Kategorien	3
Abbildung 3:	Aufteilung der Masse des HBK (Trakt B) nach Baustoff-Kategorien	4
Abbildung 4:	Aufteilung der Masse des Altbaus der IWS nach Baustoff- Kategorien	5
Abbildung 5:	Aufteilung der Grauen Energie des FFB (Geb. 4) nach Baustoff-Kategorien	6
Abbildung 6:	Aufteilung der Grauen Energie des HBK (Trakt B) nach Baustoff-Kategorien	7
Abbildung 7:	Aufteilung der Grauen Energie des Altbaus der IWS nach Baustoff-Kategorien	8
Abbildung 8:	Aufteilung des GWP des FFB (Geb. 4) nach Baustoff- Kategorien	9
Abbildung 9:	Aufteilung des GWP des HBK (Trakt B) nach Baustoff- Kategorien	10
Abbildung 10:	Aufteilung des GWP der IWS (Trakt B) nach Baustoff- Kategorien	11
Abbildung 11:	Ermittelte Zirkularität für die in den Modellgebäuden verbauten Baustoffe (Verhältnis des Betrages des Lebenswegmoduls D zur Summe aller anderen vorhandenen Lebenswegmodule)	13

Abbildung 12:	Ermittelter Anteil an Erneuerbarer Energie (PERE) am gesamten Aufwand an Grauer Energie der in den Modellgebäuden verbauten Baustoffe	15
Abbildung 13:	PERE (relativ) und Zirkularität (relativ) der in den Modellgebäuden verbauten Baustoffe	16
Abbildung 14:	Komplexe Darstellung der Zirkularität anhand mehrerer Parameter	18
Abbildung 15:	WDVS-Aufbau für Dämmungs-Varianten 1 a bis c	21
Abbildung 16:	Ausschnitt – Alu-Vorhangfassade mit Zellulose-Einblasdämmung	22
Abbildung 17:	Darstellung der Dämmvarianten für die Modellgebäude...	23



IV Einführung

Gegenstand dieses Berichtes ist die lebenszyklische Betrachtung der umfassenden Arbeiten der energetischen Analysen mitsamt Sanierungskonzepten der drei Modellgebäude aus Arbeitsschritt 3 des Arbeitspakets 1.

Bei den Gebäuden handelt es sich um das Felix-Fechenbach-Berufskolleg (Gebäude 4) in Detmold, das Hanse-Berufskolleg (Trakt B) in Lemgo und den Altbau der Irmela-Wendt-Schule in Lage.

Im Fokus der detailliert ausgeführten energetischen Sanierungskonzepte für die drei Modellgebäude stehen u. a. die Einsparungsmöglichkeiten an Energie bzw. Transmissionswärmeverlusten und damit auch Treibhausgasemissionen im laufenden Gebäudebetrieb. Diesbezüglich wird der Zustand im Bestand detailliert dargestellt und auf dieser Grundlage Sanierungsmaßnahmen für Gebäudehülle und Anlagentechnik entwickelt. Die Sanierungsmaßnahmen werden einzeln und in ihrer Kombination zu verschiedenen Gesamtmaßnahmen aufgezeigt, mit der Zielsetzung der Erreichung des Passivhaus-Energiestandards. Für jede Maßnahme und Maßnahmenkombination werden die resultierenden Energie- und CO₂-Einsparungen berechnet, sowie die Investitionskosten und Amortisationszeiten ermittelt.

Der hier vorliegende Bericht baut auf den Ergebnissen der energetischen Sanierungskonzepte auf. Hierbei wird ebenso zunächst der Bestandszustand analysiert, wobei die in der Gebäudemasse gebundene Graue Energie, das Treibhausgaspotenzial und weitere LCA-Parameter ermittelt werden. Anschließend werden die möglichen Optionen einer Fassaden-Sanierung in spezifischer Weise ökobilanziell betrachtet und ausgewertet. Im letzten Abschnitt werden diese spezifischen Ergebnisse der lebenszyklischen Betrachtung von Optionen der Fassadensanierung mit den Ergebnissen der energetischen Sanierungskonzepte zusammengeführt um LCA-Ergebnisse auf Gebäudeebene zu generieren.



Der Bericht gliedert sich somit in drei Teile, untergliedert in die Überpunkte 1 bis 3.

Der erste Teil unter Überpunkt 1 behandelt hierbei die Darstellung der ökobilanziellen Betrachtung der Bestandsgebäude. Aus Relevanzgründen werden hierbei nur die für den Projektbezug wichtigsten Umweltwirkungen dargestellt. Hierbei handelt es sich um folgende:

- Primärenergieaufwand, nicht-erneuerbar (PENRE) und erneuerbar (PERE), wobei das kumulierte Ergebnis aus beiden betrachtet wird, und
- Treibhausgaspotenzial bzw. Global Warming Potential (GWP)
- Recyclingfähigkeit bzw. Zirkularität

Um einen angemessenen Bezug zu gewährleisten wird jedoch außerdem eingangs die Masse der Bestandsgebäude aufgezeigt. Die Darstellung der Gebäudemasse, des Primärenergieaufwands und des Treibhauspotenzials für alle drei Gebäude erfolgt in Kreisdiagrammen nach acht Baumaterialkategorien, angefangen mit der Masse in t (Gebäudemasse), gefolgt vom Primärenergieaufwand für die Gebäudemasse in MWh und schließlich den CO₂-Emissionen in t in Zusammenhang mit der Gebäudemasse.

Während für das GWP und für PENRE sowie PERE die Energiemenge über Umrechnung aus der ÖKOBAUDAT-Datenbank (OBD) bestimmt werden können, ist die Ermittlung der Recyclingfähigkeit bzw. Zirkularität ein wenig komplexer. Die Ergebnisfindung erfolgt hier indirekt über die Ressourcenparameter PERE und PENRE, indem der Betrag für das Lebenswegmodul D zu den anderen Lebenswegmodulen (A1 bis C4) in der OBD ins Verhältnis gesetzt wird. Im Ergebnis ergibt sich ein Prozentwert, der die relative Zirkularität des jeweils untersuchten Baumaterials ausdrückt. Wird dieser Wert, zusammen mit dem absoluten spezifischen Primärenergieaufwand und den erneuerbaren Anteilen daran, dargestellt, können aus der kombinativen Betrachtung informative Rückschlüsse bezüglich der Zirkularität von Baumaterialien gewonnen werden.



Die nächste Abbildung 1 zeigt diesbezüglich die Aufteilung des Lebenszyklus der einzelnen Bauprodukte in die relevanten Lebenswegmodule.

Die DIN EN 15804 unterteilt den Lebensweg von Bauprodukten in Module A bis D

Herstellungsphase		Errichtungsphase			Nutzungsphase					Entsorgungsphase				Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze
Rawstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Bau/Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Umbau/Erneuerung	Abbruch	Transport	Abfallbewirtschaftung	Deponierung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recyclingpotential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
					B6 Betriebl. Energieeinsatz									
					B7 Betriebl. Wassereinsatz									

Abbildung 1: Lebenswegmodule des Produkt-Lebenszyklus¹

Je nach Art eines Bauproduktes ist diesem nicht zwingend jedes Modul zuzuordnen. So sind die Untermodule des Lebenswegmodul B (Nutzungsphase) nur für Produkte relevant, welche eine Betriebsphase aufweisen. Als Beispiel kann hier die Technische Gebäude Ausrüstung (TGA) genannt werden. Hierbei handelt es sich um Systeme zur Gebäudeheizung und Trinkwasseraufbereitung, zur Belüftung, die Aufzugtechnik, Stromversorgungsanlagen etc. Auch die Errichtungsphase (A4 & A5) und die Entsorgungsphase (C) muss nicht für jedes Bauprodukt zutreffend sein. Zuweilen werden auch Effekte außerhalb der Systemgrenze (D) nicht immer mitbetrachtet.

Der zweite Teil unter Überpunkt 2 behandelt die Untersuchung der innerhalb der Energieberatung, in enger Zusammenarbeit mit dem Technischen Gebäudemanagement (TGM) des Kreis Lippe, entwickelten Fassadenaufbauten bezüglich der angedachten Optionen für die Dämmung. Insgesamt werden sechs verschiedene Varianten, welche sich in drei Kategorien aufteilen, beleuchtet. Die Betrachtung erfolgt ab dem tragenden Mauerwerk, ohne dieses miteinzuschließen. Als Benchmark dient der Passivhaus-Energiestandard. Der Fokus liegt dabei auf den in Überpunkt 1

¹ Abbildung nach BBSR (2018), ÖKOBAUDAT-Handbuch, S. 13



genannten Umweltindikatoren (PENRE + PERE, GWP & Zirkularität), der zum Einsatz angedachten Baustoffe.

Im Rahmen der Ergebnisdarstellung werden für jede Option zwei Tabellen gezeigt. Die erste zeigt die Masse, die Schichtdicke, das GWP und die Primärenergie pro m². Die zweite weist die relative Zirkularität sowie die nicht zirkulär genutzte Primärenergie und Masse aus. Die nicht zirkulär genutzte Primärenergie und Masse werden hierbei wie folgt berechnet:

- Nicht zirkulär genutzte PE = (PENRE + PERE) x (1 - Zirkularität in %)
- Nicht zirkulär genutzte Masse = Masse x (1 - Zirkularität in %)

Anstelle der „nicht zirkulär genutzten PE/Masse“ könnten auch die Gegenstücke, die „zirkulär genutzte PE/Masse“ ausgewiesen werden. Allerdings variieren Baumaterialien bzgl. ihrer physikalischen Eigenschaften sowie der Ressourcenparameter und Umweltwirkungen mitunter sehr stark. Würde nun nur die zirkulär genutzte Primärenergie oder Masse ausgewiesen, so würde nicht sehr prägnant herausgeprägt werden, in welcher Höhe die nicht zirkulären Ressourcen vorliegen. Die Angabe der übrigen, nicht zirkulär genutzten Primärenergie und Masse ist daher, v. a. bei einer Betrachtung von Produkten mit äquivalentem Nutzen, aussagekräftiger. Die zirkulär genutzte Primärenergie kann indessen auch aus der Differenz von Primärenergieaufwand und nicht zirkulär genutzter Primärenergie ermittelt werden.

Der dritte Teil unter Überpunkt 3 widmet sich anschließend der Verschmelzung der spezifischen Ergebnisse für die Umweltwirkung aus Überpunkt 2 und den relevanten Teilergebnissen aus den energetischen Sanierungskonzepten für das Felix-Fechenbach-Berufskolleg (Gebäude 4) in Detmold, das Hanse-Berufskolleg (Trakt B) in Lemgo und den Altbau der Irmela-Wendt-Schule in Lage. Als Resultat wird das Ausmaß der Umweltwirkungen (GWP, PENRT + PERT, Zirkularität) für jedes der Modellgebäude festgehalten.



1 Analyse des GWP, der Grauen Energie und der Zirkularität der Bestandsgebäude

Die Analyse der Bestandsgebäude erfolgte über Datenmaterial zu Baustoffen und zugehörigen verbauten Volumina, welches durch den Kreis Lippe erhoben und in Madaster eingepflegt wurde. Die Daten wurden demnach aus Madaster entnommen und dabei revalidiert. Um Daten zu den Umweltwirkungen der verwendeten Baustoffe zu erhalten, wurden die Daten anschließend passenden Baustoffdatensätzen in der Ökobaudat-Datenbank (OBD) zugeordnet. Bei Bedarf, d. h., falls keine verwertbaren Informationen dazu in der OBD vorhanden waren, wurde auch die entsprechende Rohdichte des Baustoffs über andere Quellen recherchiert.

Bezüglich der Materialdaten finden sich folgende Informationen zu den drei Modellgebäuden in den entsprechenden Zwischenstands-Tabellen in Madaster wieder:



Für das Felix-Fechenbach-Berufskolleg (FFB) handelt es sich um 546 Datenzeilen zu Bauelementen, welche sich insgesamt zu 18 Baustoffen zuordnen lassen.



Für das Hanse-Berufskolleg (HBK) finden sich 243 Datenzeilen zu Bauelementen, welche sich zusammengenommen 27 Baustoffen zuordnen lassen.



Für die Irmela-Wendt-Schule (IWS) handelt es sich um 122 Datenzeilen zu Bauelementen, welche sich in Summe 34 Baustoffen zuordnen lassen.



Insgesamt handelt es sich um 61 durch Benennung identifizierte eindeutige Baustoffe. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten, werden diese Baustoffe den folgenden Kategorien zugeordnet:

1. Metall
2. Holz, Holzwerkstoffe & Nachwachsende Rohstoffe
3. Stahlbeton
4. Anderer Beton, Mörtel und Zement
5. Ton, Lehm und Keramik (z. B. Ziegel)
6. Sonstige mineralische Baustoffe (z. B. Mineralwolle)
7. Glas (auch: Schaumglas)
8. Kunststoffe und sonstige Stoffe auf Mineralölbasis

1.1 Gebäudemasse der Bestandsgebäude

Für die Bestimmung der Massen von Materialteilen bzw. Bauelementen aus den in Madaster vorhanden Volumenangaben ist noch nicht zwangsläufig eine Allokation der verwendeten Baustoffe zu OBD-Datensätzen notwendig. Die genaue Kenntnis über die Art des Baustoffs und dessen Rohdichte reicht hier bereits aus. Ungeachtet dessen finden sich in den Informationen und Umweltproduktdeklarationen (EPD) zu den entsprechenden Baustoff-Datensätzen in der OBD meist hilfreiche Angaben, wenn nicht sogar direkte Angaben zur Rohdichte der entsprechenden Baumaterialien. Im Folgenden werden nun Darstellungen bezüglich der Massen des Bestands der drei Modellgebäude und die Aufteilung der Baustoffe, aus welchen diese bestehen, in entsprechende Baustoff-Kategorien aufgezeigt.

Für das **FFB (Geb. 4)** ergibt sich dabei eine Gesamtmasse von rund 12.000 t und folgende Aufteilung der Masse nach Baustoff-Kategorien (siehe Abbildung 2):

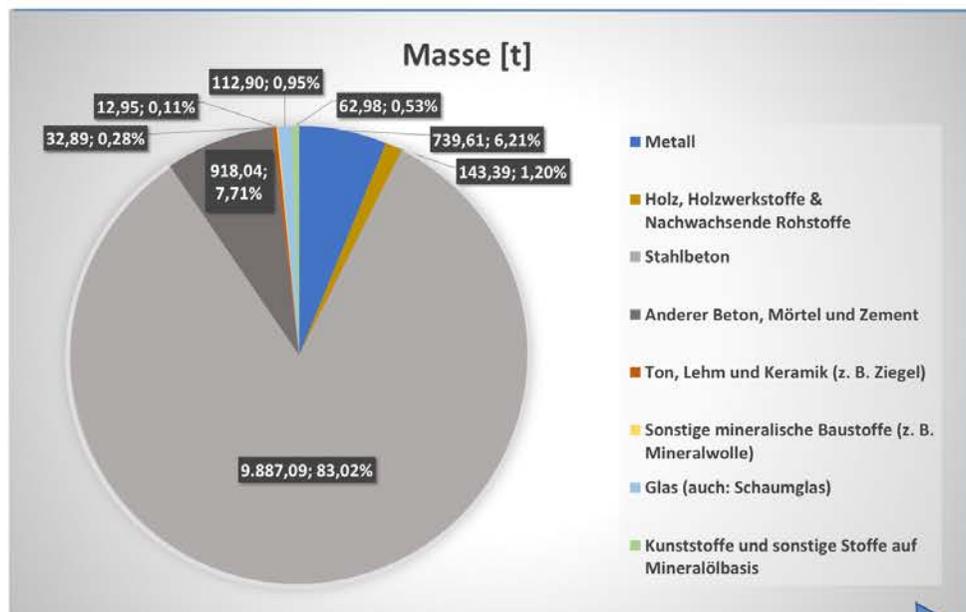
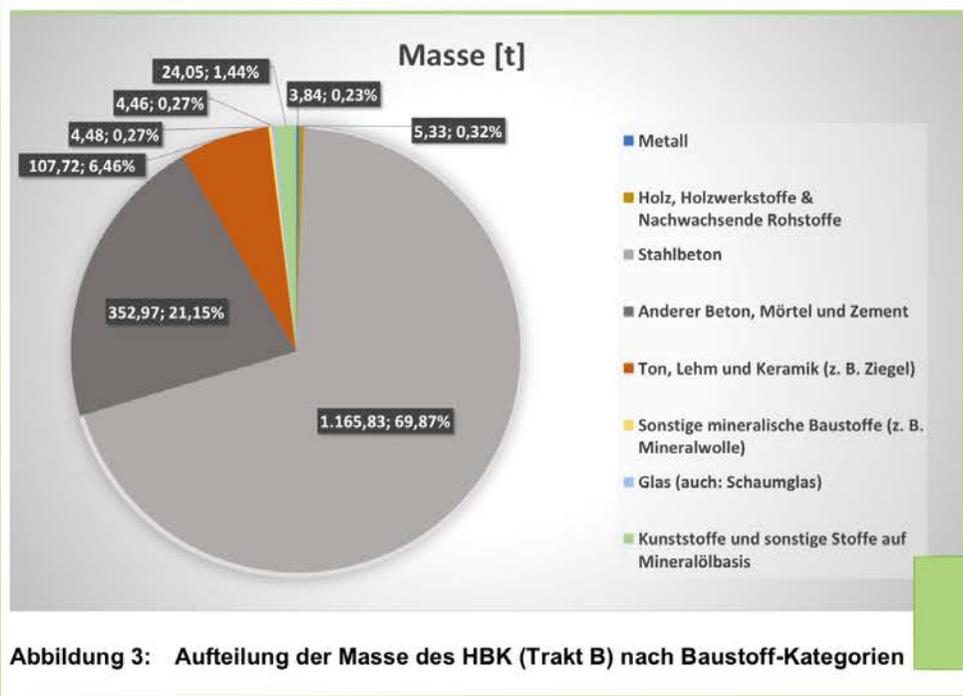


Abbildung 2: Aufteilung der Masse des FFB (Geb. 4) nach Baustoff-Kategorien

Gut erkennbar, wird der überwiegende Teil der Baustoffmasse durch Beton-, Mörtel und Zementprodukte dargestellt, davon ca. 83 % alleine durch Stahlbeton, weitere rund 8 % entfallen zudem auf die Kategorie Anderer Beton, Mörtel und Zement, repräsentiert durch Estrich. Insgesamt handelt es sich demnach um einen Anteil der betonartigen Gebäudemasse von über 90 %. Weitere rund 6 % entfallen auf Metalle, v. a. auf Stahl (ca. 530 t) und Aluminium (ca. 200 t). Nur etwa 3 % der Masse werden durch die fünf anderen Baustoff-Kategorien dargestellt.

Für das **HBK (Trakt B)** ergibt sich indessen eine Gesamtmasse von rund 1.700 t und folgende Aufteilung der Masse nach Baustoff-Kategorien (siehe Abbildung 3):



Abermals wird der überwiegende Teil der Baustoffmasse durch Beton-, Mörtel und Zementprodukte dargestellt, davon ca. 70 % durch Stahlbeton. Weitere rund 21 % entfallen zudem auf die Kategorie Anderer Beton, Mörtel und Zement, darunter größtenteils Zementestrich (ca. 135 t), Sichtbeton (ca. 100 t) und Kantstein (ca. 70 t). Wieder handelt es sich insgesamt um einen Anteil der betonartigen Gebäudemasse von knapp über 90 %. Weitere rund 6,5 % entfallen auf Ton, Lehm und Keramik, repräsentiert durch Mauerwerk. Etwa 1,5 % werden durch Kunststoffprodukte dargestellt, davon der überwiegende Teil Kunststein (ca. 20 t). Nur rund 1 % der Masse werden durch die anderen vier Baustoff-Kategorien dargestellt.

Für den **Altbau der IWS** ergibt sich eine Gesamtmasse von rund 1.200 t und folgende Aufteilung der Masse nach Baustoff-Kategorien (siehe Abbildung 4):

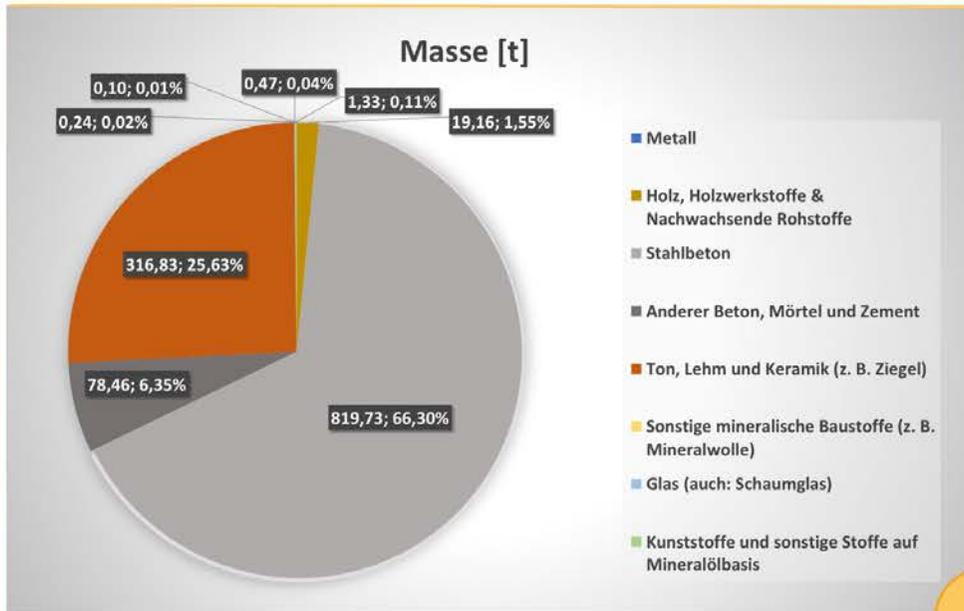


Abbildung 4: Aufteilung der Masse des Altbaus der IWS nach Baustoff-Kategorien

Auch hier wird der überwiegende Teil der Baustoffmasse durch Beton-, Mörtel und Zementprodukte dargestellt, davon ca. 66 % durch Stahlbeton. Weitere rund 6 % entfallen auf die Kategorie Anderer Beton, Mörtel und Zement, darunter größtenteils Zementestrich (ca. 67 t) und Magnesitestrich (ca. 8 t). Der Anteil der betonartigen Gebäudemasse erreicht so noch zwischen 70 und 75 %. Zudem entfallen rund 25 % auf die Kategorie Ton, Lehm und Keramik, davon hauptsächlich auf Mauerziegel (ca. 280 t) und Dachziegel (ca. 30 t). Rund 1,5 % werden durch die Kategorie Holz, Holzwerkstoffe und NaWaRo dargestellt, davon hauptsächlich Linoleum (rund 8 t) und Zellulose (ca. 3,5 t), die nächstgrößeren Positionen werden durch Spannplatten und Konstruktionsvollholz (jeweils ca. 2,5 t) abgebildet. Lediglich etwa 0,2 % der Masse werden durch die anderen vier Baustoff-Kategorien dargestellt.

1.2 Graue Energie der Bestandsgebäude

Um die Graue Energie der Bestandsgebäude darzustellen ist bereits die Allokation der Madaster-Daten zu OBD-Datensätzen notwendig. Die hierzu zu betrachtenden Ressourcenparameter sind der nicht-erneuerbare (PENRE) und der erneuerbare Primärenergieaufwand (PERE).

Für das **FFB (Geb. 4)** ergibt sich dabei ein gesamter Primärenergieaufwand von rund 13.000 MWh und folgende Aufteilung der Grauen Energie nach Baustoff-Kategorien (siehe Abbildung 5):

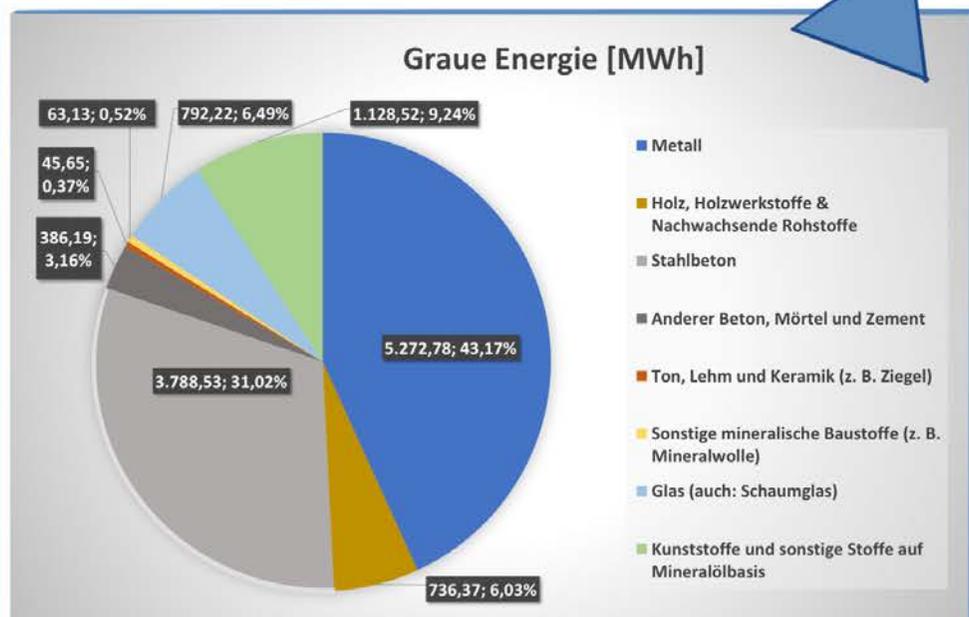


Abbildung 5: Aufteilung der Grauen Energie des FFB (Geb. 4) nach Baustoff-Kategorien

Obwohl Metalle nur etwa 6 % der Gebäudemasse darstellen (siehe Abbildung 2) haben diese über 40 % Anteil an der Grauen Energie des Gebäudes. Der Grund liegt hierbei in der energieintensiven Bearbeitung, welche bei der Bereitstellung von Metallen nötig ist (Schmelzprozesse etc.). An zweiter Stelle steht der Stahlbeton mit über 30 %, hierbei ist v. a. die hohe Masse ein Haupttreiber. Dahinter folgt, obwohl diese nur ca. 0,5 % der Gebäudemasse darstellt (siehe Abbildung 2), die Kategorie Kunststoffe und sonstige Stoffe auf Mineralölbasis mit etwa 9 %. Die größten Positionen sind hierbei PVC (ca. 400 MWh), Abdichtungen (ca. 380 MWh) und Dampfsperren (ca. 160 MWh). Darauf folgt die Kategorie Glas mit etwa 6,5 %, repräsentiert durch durch 2-Scheiben-Isolierglas (ca. 800 MWh). Die Kategorie Holz, Holzwerkstoffe & NaWaRos, hauptsächlich vertreten durch die Spannplatte (ca. 650 MWh), bildet noch rund 6 % ab. Auf die Kategorie Anderer Beton, Mörtel und Zement, repräsentiert durch Estrich, entfallen noch ca. 3 %.

Auf die beiden übrigen Kategorien entfällt schließlich nicht mehr ganz 1 % der Grauen Energie.

Für das **HBK (Trakt B)** ergibt sich unterdessen ein gesamter Primärenergieaufwand von rund 1.000 MWh und folgende Aufteilung der Grauen Energie nach Baustoff-Kategorien (siehe Abbildung 6):

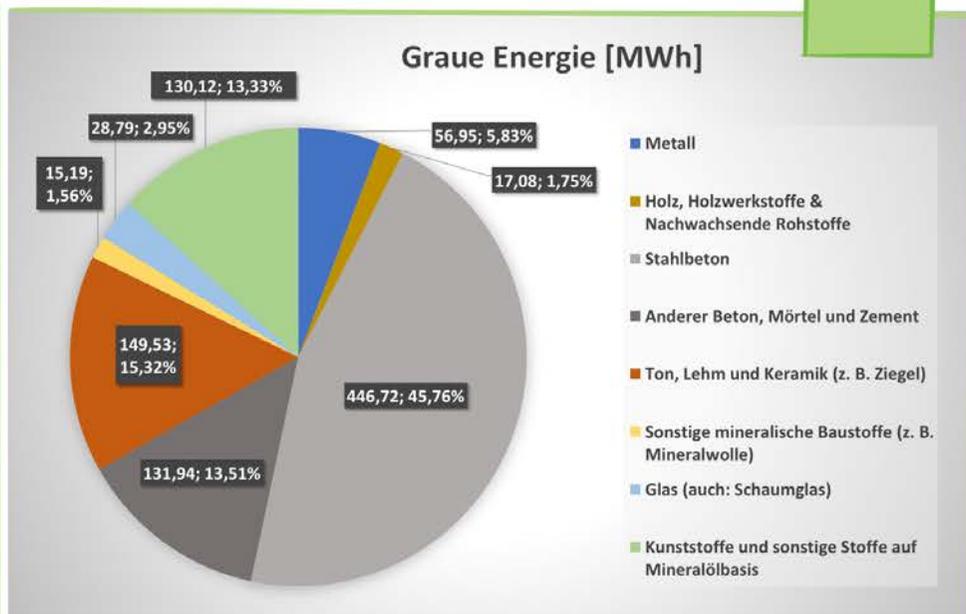


Abbildung 6: Aufteilung der Grauen Energie des HBK (Trakt B) nach Baustoff-Kategorien

Hauptsächlich aufgrund der schieren Masse stellt der Stahlbeton mit über 45 % den größten Anteil an der Grauen Energie dar. Auch auf die Kategorie Ton, Lehm und Keramik entfällt massebedingt ein hoher Anteil von über 15 %. Zudem erreicht die Kategorie Anderer Beton, Mörtel und Zement einen Anteil von beinahe 14 %, davon überwiegend Zementstrich (ca. 65 MWh) und Sichtbeton (ca. 35 MWh). Gefolgt von der Kategorie Kunststoffe und sonstige Stoffe auf Mineralölbasis mit rund 13 %, hauptsächlich zurückzuführen auf Kunststeinplatten (rund 90 MWh). Dahinter liegt Metall mit rund 6 %, davon überwiegend Aluminium (rund 55 MWh). Darauf folgt die Kategorie Glas mit rund 3 %, in Form von 2-Scheiben-Isolierglas und dahinter schließlich die Kategorie Holz, Holzwerkstoffe & NaWaRos mit knapp 2 %, darunter hauptsächlich Konstruktionsvollholz (ca. 16 MWh).

Auf die übrige Kategorie Sonstige mineralische Baustoffe entfallen nur etwa 1,5 %, drunter hauptsächlich Eternitprodukte (ca. 9 MWh) und Mineralwolle (ca. 6 MWh).

Für den **Altbau der IWS** ergibt sich derweil ein gesamter Primärenergieaufwand von rund 1.100 MWh und folgende Aufteilung der Grauen Energie nach Baustoff-Kategorien (siehe Abbildung 7):

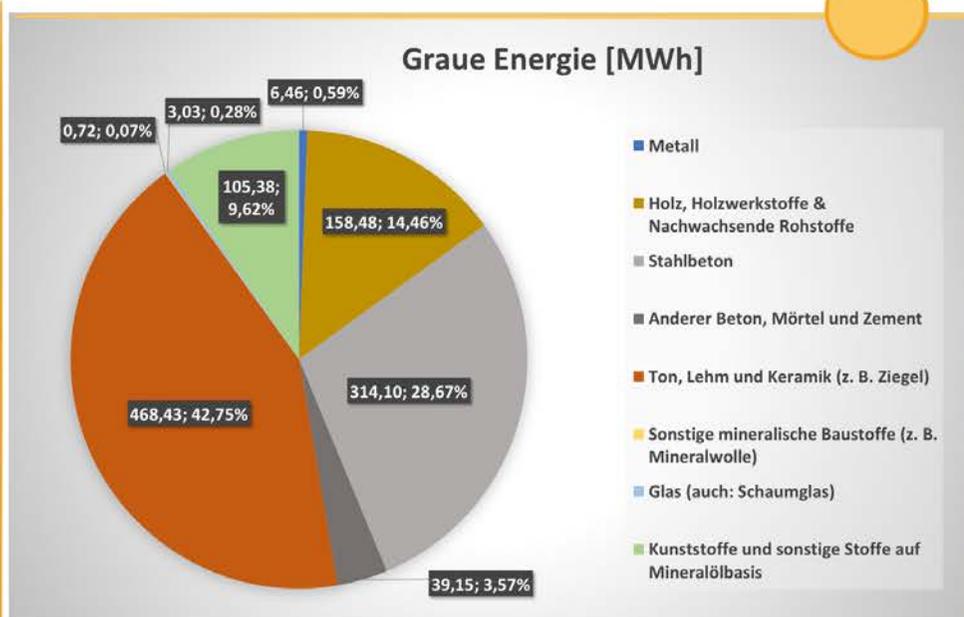


Abbildung 7: Aufteilung der Grauen Energie des Altbaus der IWS nach Baustoff-Kategorien

Der, mit über 40 %, größte Anteil an Grauer Energie in der Masse des Altbaus der IWS wird durch die Kategorie Ton, Lehm und Keramik verkörpert, überwiegend repräsentiert durch Mauerziegel (rund 400 MWh). Der Primärenergieaufwand bei der Herstellung liegt dabei bei mehr als dem 4-Fachen dessen von Stahlbeton. Dies ist v a. der Tatsache geschuldet, dass die Ziegel viele Stunden bei hohen Temperaturen um die 1.000 Grad gebrannt werden. Auf den Zementanteil im Beton trifft ähnliches zu, jedoch liegt der Gewichtsanteil des Zements am Beton gewöhnlicherweise nur bei ungefähr 20 %, wodurch das Gros des Unterschiedes im Primärenergieaufwand erklärt werden kann. Ungeachtet dessen liegt der Stahlbeton mit knapp 30 % Anteil an der Grauen Energie an zweiter Stelle. Darauf folgt die Kategorie Holz,



Holzwerkstoffe & NaWaRos, hauptsächlich dargestellt durch Linoleum (ca. 100 MWh), gefolgt von Spannplatten (ca. 18 MWh) und Konstruktionsvollholz (ca. 12 MWh). An nächster Stelle steht die Kategorie Kunststoffe und sonstige Stoffe auf Mineralölbasis mit rund 10 %, größtenteils dargestellt durch Teppichboden (ca. 100 MWh). Die Kategorie Anderer Beton, Mörtel und Zement nimmt unterdessen noch etwa 3,5 % ein, darunter hauptsächlich Zementestrich (ca. 33 MWh). Die drei übrigen Kategorien nehmen zusammen nicht mehr ganz 1 % ein.

1.3 Treibhauspotenzial der Bestandsgebäude

Auch das Treibhauspotenzial kann durch die Allokation der Madaster-Daten zu OBD-Datensätzen ermittelt werden. Der hierzu betrachtete Umweltindikator ist das Global Warming Potential (GWP).

Für das **FFB (Geb. 4)** ergibt sich dabei ein gesamtes GWP von rund 3.400 t und folgende Aufteilung nach Baustoff-Kategorien (siehe Abbildung 8):

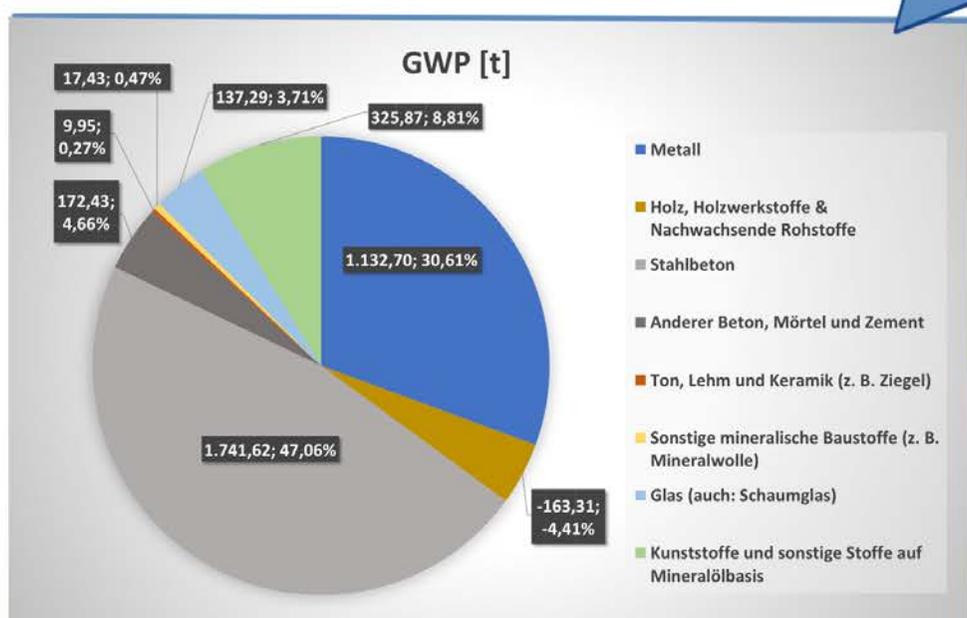


Abbildung 8: Aufteilung des GWP des FFB (Geb. 4) nach Baustoff-Kategorien

Bezüglich des GWP steht der Stahlbeton für fast 50 % der Emissionen. Dahinter folgt Metall mit einem Anteil von gut 30 %, überwiegend vertreten durch Aluminium (ca. 620 t CO₂), gefolgt von Stahl (ca. 290 t CO₂) und Stahl-



Trapezblech (ca. 225 t CO₂). An dritter Stelle liegt die Kategorie Kunststoffe und sonstige Stoffe auf Mineralölbasis mit rund 9 %, hauptsächlich repräsentiert durch PVC (ca. 135 t CO₂) und Abdichtung (ca. 100 t CO₂). Die Kategorie Anderer Beton, Mörtel und Zement, repräsentiert durch Estrich, steht für weitere rund 5 %. Die Kategorie Glas, dargestellt durch 2-Fach-Isolierglas, liegt noch bei rund 4 %. Die Kategorie Holz, Holzwerkstoffe & NaWaRos sorgt dagegen für eine CO₂-Gutschrift von etwa 160 t CO₂. Dies beruht auf der sogenannten Allokationsmethode für CO₂-Emissionen, welche die Emissionen dem Hauptprodukt aus einem Produktionsprozess zuordnet. Sämtliche Nebenprodukte aus solchen Prozessen erhalten dabei in Bezug auf entstehende Emissionen nicht nur den Wert 0, sondern bekommen sogar eine Gutschrift in Höhe der Emissionen, welche im Zuge der Bereitstellung eines stattdessen herzustellenden Substitut-Produktes angefallen wären. Die beiden übrigen Kategorien liegen derweil zusammen unter 1 % der CO₂-Emissionen, welche im Zuge des Lebenszyklus des FFB (Geb. 4) anzusetzen sind.

Für das **HBK (Trakt B)** ergibt sich unterdessen ein gesamtes GWP von rund 350 t und folgende Aufteilung nach Baustoff-Kategorien (siehe Abbildung 9):

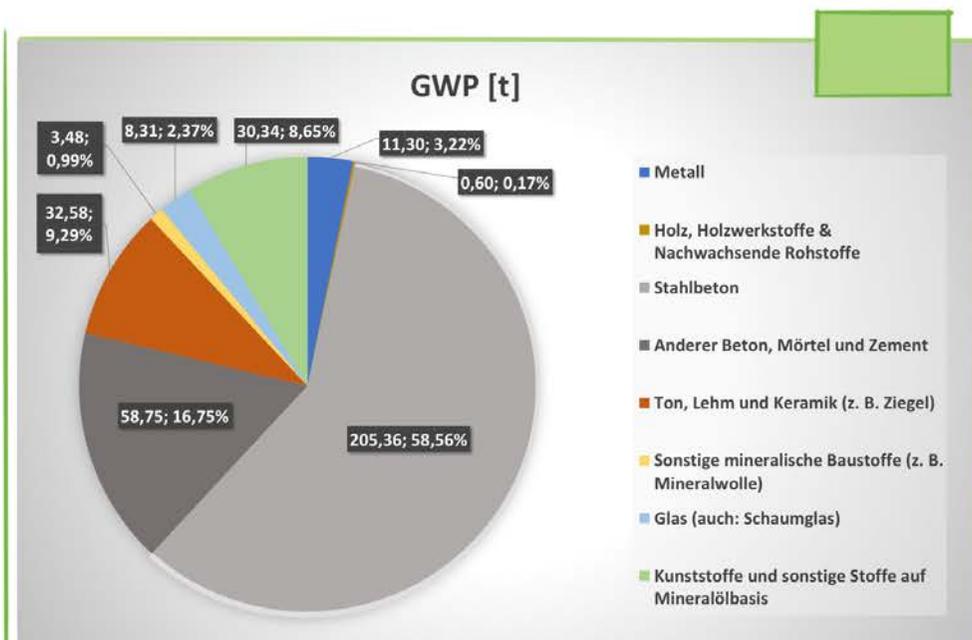


Abbildung 9: Aufteilung des GWP des HBK (Trakt B) nach Baustoff-Kategorien



Bezüglich des GWP steht der Stahlbeton hier für fast 60 % der Emissionen. Gefolgt von der Kategorie Anderer Beton, Mörtel und Zement mit ca. 17 %, darunter hauptsächlich Zementestrich (ca. 27 t CO₂), Sichtbeton (ca. 16 t CO₂) und Kantstein (ca. 9 t CO₂). Darauf folgt die Kategorie Ton, Lehm und Keramik mit annähernd 10 %, repräsentiert durch Mauerwerk. Dicht dahinter liegt die Kategorie Kunststoffe und sonstige Stoffe auf Mineralölbasis mit knapp 9 %, größtenteils dargestellt durch Kunststeinplatten (18 t CO₂) und PVC (7 t CO₂). Die Kategorie Metall stellt noch etwa 3 % der CO₂-Emissionen, darunter hauptsächlich Aluminium (ca. 11 t CO₂). Die Kategorie Glas, dargestellt durch 2-fach-Isolierglas, steht für weitere rund 2,5 % der CO₂-Emissionen. Die beiden übrigen Kategorien stellen nur etwa 1 % der CO₂-Emissionen dar.

Für den **Altbau der IWS** ergibt sich hingegen ein gesamtes GWP von rund 290 t und folgende Aufteilung nach Baustoff-Kategorien (siehe Abbildung 9):

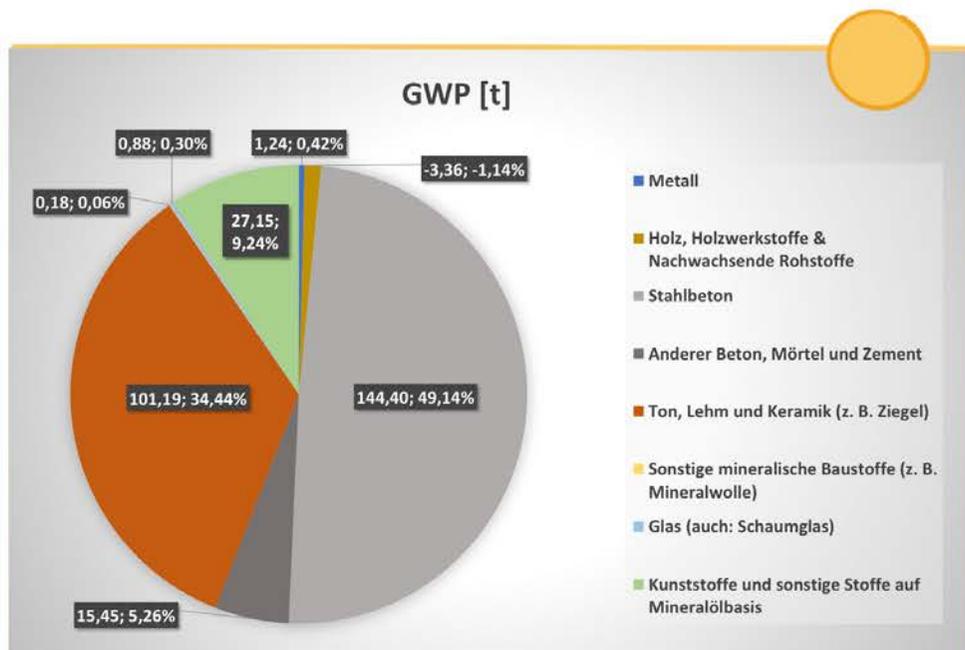


Abbildung 10: Aufteilung des GWP der IWS (Trakt B) nach Baustoff-Kategorien

Auch hier nimmt der Stahlbeton mit rund 50 % das Gros des GWP ein. Es folgt die Kategorie Ton, Lehm und Keramik mit rund 35 % der Emissionen, überwiegend dargestellt durch Mauerziegel (ca. 84 t CO₂) aber auch Dachziegel (ca. 11 t) und Fliesen (ca. 6 t CO₂).

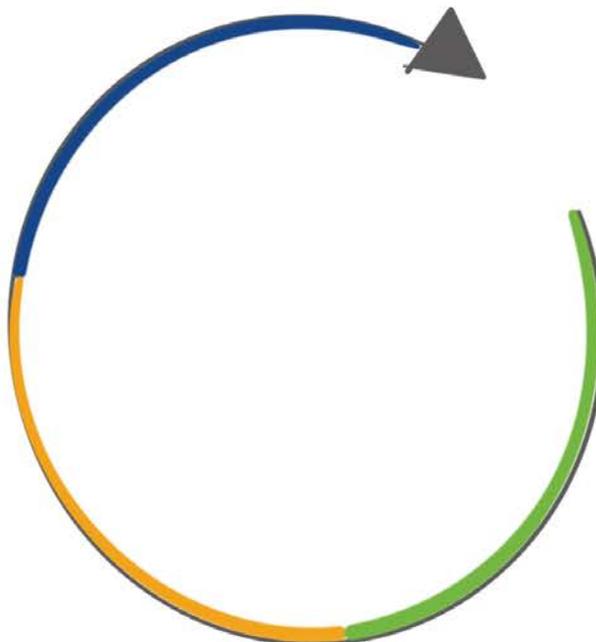


An dritter Stelle steht die Kategorie Kunststoffe und sonstige Stoffe auf Mineralölbasis mit gut 9 %, überwiegend vertreten durch Teppichboden (ca. 25 t CO₂). Darauf folgt die Kategorie Anderer Beton, Mörtel und Zement mit rund 5 %, darunter hauptsächlich Zementestrich (ca. 13 t CO₂). Die Kategorie Holz, Holzwerkstoffe & NaWaRos erhält eine CO₂-Gutschrift von rund 3 t CO₂. Die drei übrigen Kategorien bilden zusammen nur weniger als 1 % der Emissionen ab.

Die Ermittlung der Zirkularität ist etwas komplexer, da diese nicht direkt durch die Allokation der Madaster-Daten zu OBD-Datensätzen ermittelt werden kann. Die Ergebnisfindung erfolgt hier, wie in der Einführung bereits erwähnt, indirekt, über die Ressourcenparameter PERE und PENRE, indem der Betrag für das Lebenswegmodul D zu den anderen Lebenswegmodulen (A1 bis ggf. C4) in der OBD ins Verhältnis gesetzt wird.

1.4 Zirkularität in Zusammenhang mit den Bestandsgebäuden

Die nächste Abbildung 11 zeigt hierzu die Zirkularität aller Baustoffe (ohne Dopplungen), welche in Bezug auf die drei Modellgebäude aus Madaster gewonnen und verarbeitet werden konnten in alphabetischer Reihenfolge.



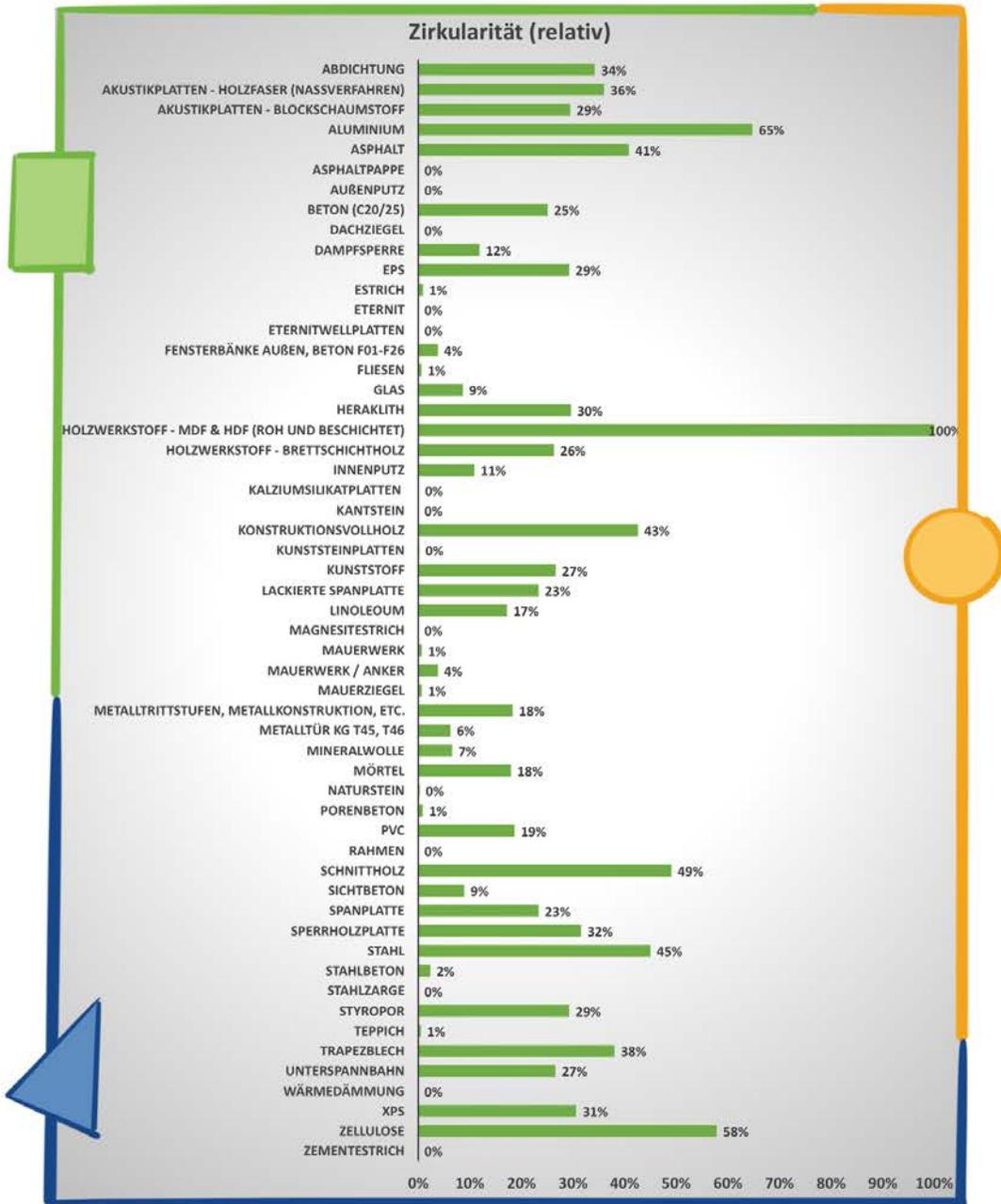


Abbildung 11: Ermittelte Zirkularität für die in den Modellgebäuden verbauten Baustoffe (Verhältnis des Betrages des Lebenswegmoduls D zur Summe aller anderen vorhandenen Lebenswegmodule)

Da die Zirkularität über die Summe aus PENRE und PERE ermittelt wurde kann einerseits der relative Anteil der Recyclingszenarios für die für den Bau der Modellgebäude verwendeten Baustoffe abgeschätzt werden.



Die andererseits ebenfalls interessante Information, wie sich die Zirkularität auf Erneuerbare und Nicht-Erneuerbare Primärenergieaufwendungen aufteilt, kann dabei jedoch nicht konkret abgeleitet werden. Die nächste Abbildung 12 zeigt deswegen in diesem Zusammenhang den Anteil der Erneuerbaren Primärenergie (PERE) am Gesamten Primärenergieaufwand bzw. der gesamten Grauen Energie der in den Modellgebäuden verbauten Baustoffe.

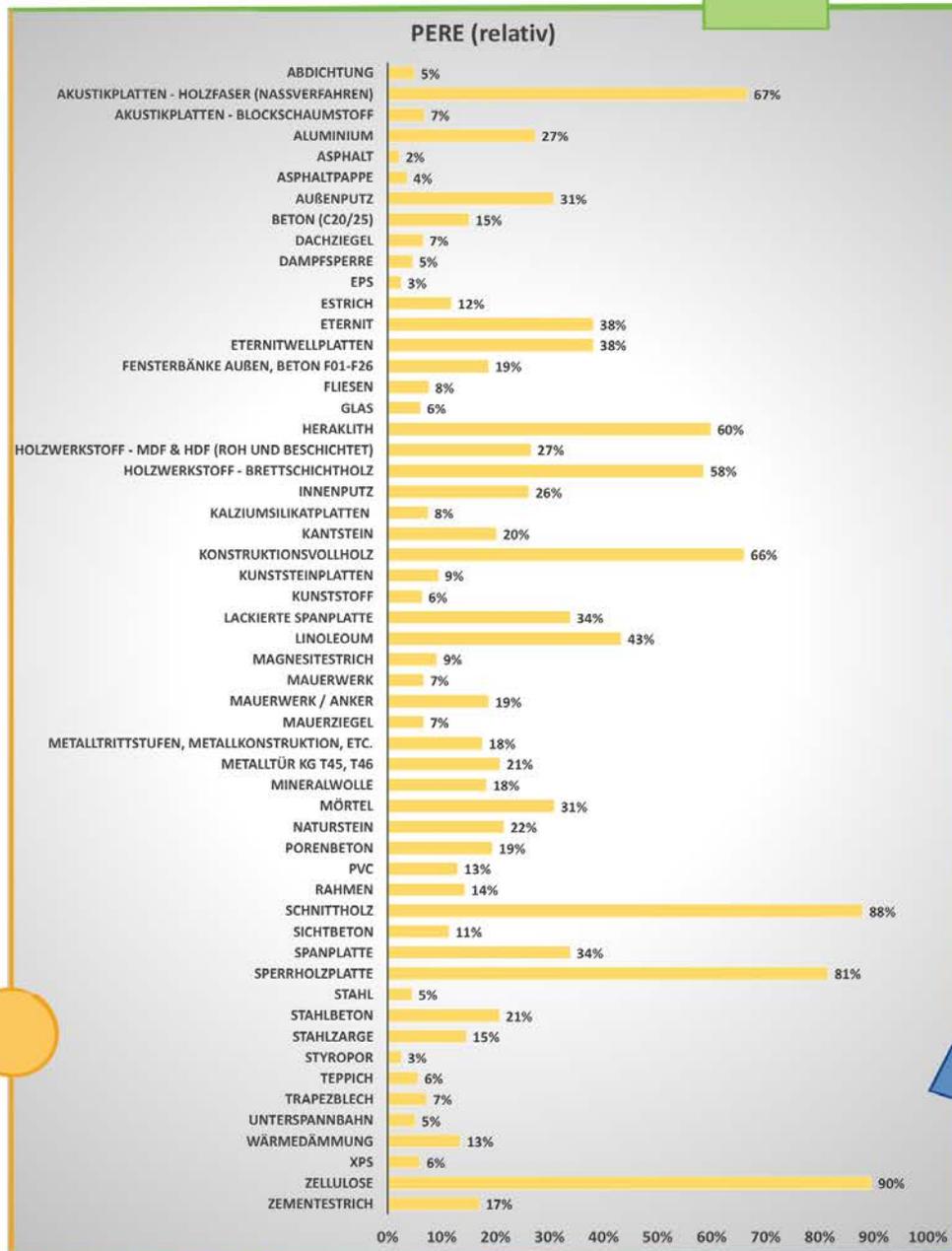


Abbildung 12: Ermittelter Anteil an Erneuerbarer Energie (PERE) am gesamten Aufwand an Grauer Energie der in den Modellgebäuden verbauten Baustoffe

Die folgende weitere Abbildung zeigt zudem die kombinierte Information aus Abbildung 11 und Abbildung 12:

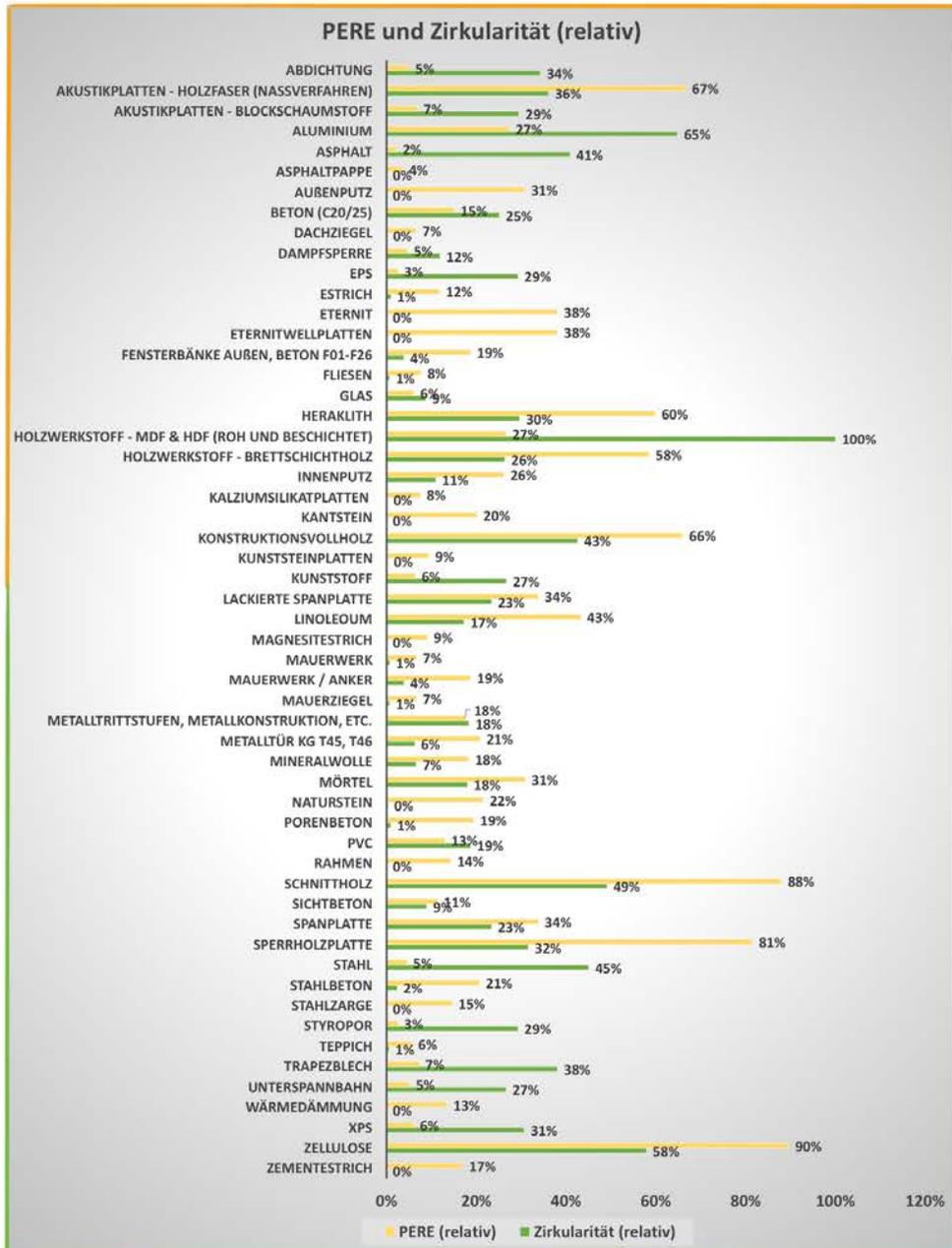


Abbildung 13: PERE (relativ) und Zirkularität (relativ) der in den Modellgebäuden verbauten Baustoffe

Die kombinierte Angabe aus PERE und Zirkularität gibt Aufschluss darüber, auf welchen Anteil für Erneuerbare Energie die Zirkularität fußt. Baustoffe mit hoher Zirkularität und PERE sind dabei gegenüber anderen Baustoffen in Bezug auf energetische Nachhaltigkeit und Recyclingfähigkeit im Vorteil.



In Bezug auf diese Kombination fallen einige Holz-Baustoffe, wie Holzfaserdämmplatten (Nassverfahren), Holzwerkstoffe wie MDF und HDF, Konstruktionsvollholz, Schnittholz, Sperrholz und Zellulose, besonders ins Auge. Jeder der genannten Baustoffe erreicht einen einfach gemittelten Prozentsatz aus PERE und Zirkularität von über 50%, die Zellulose bildet hierbei mit 74 % (90 % EE-Anteil der PE und 58 % Zirkularität) den Spitzenreiter der im Vergleich gezeigten Baustoffe ab. Die besten Werte von nicht-holzartigen Baustoffen werden von Aluminium (46 %), Linoleum (30 %) und Stahl (25 %) erreicht. Die beiden Metalle verdanken ihre Werte dabei hauptsächlich der Recyclingfähigkeit, während Linoleum durch den hohen Anteil an Erneuerbare Energie am Primärenergieaufwand profitiert.

Die Abbildung 14 zeigt eine noch prägnantere aber auch noch komplexere Betrachtung der Zirkularität am Beispiel von Baustoffen. Sie ist, um eine gewisse Übersichtlichkeit zu gewährleisten, auf 20 aus den insgesamt 61 identifizierten Baumaterialien begrenzt.

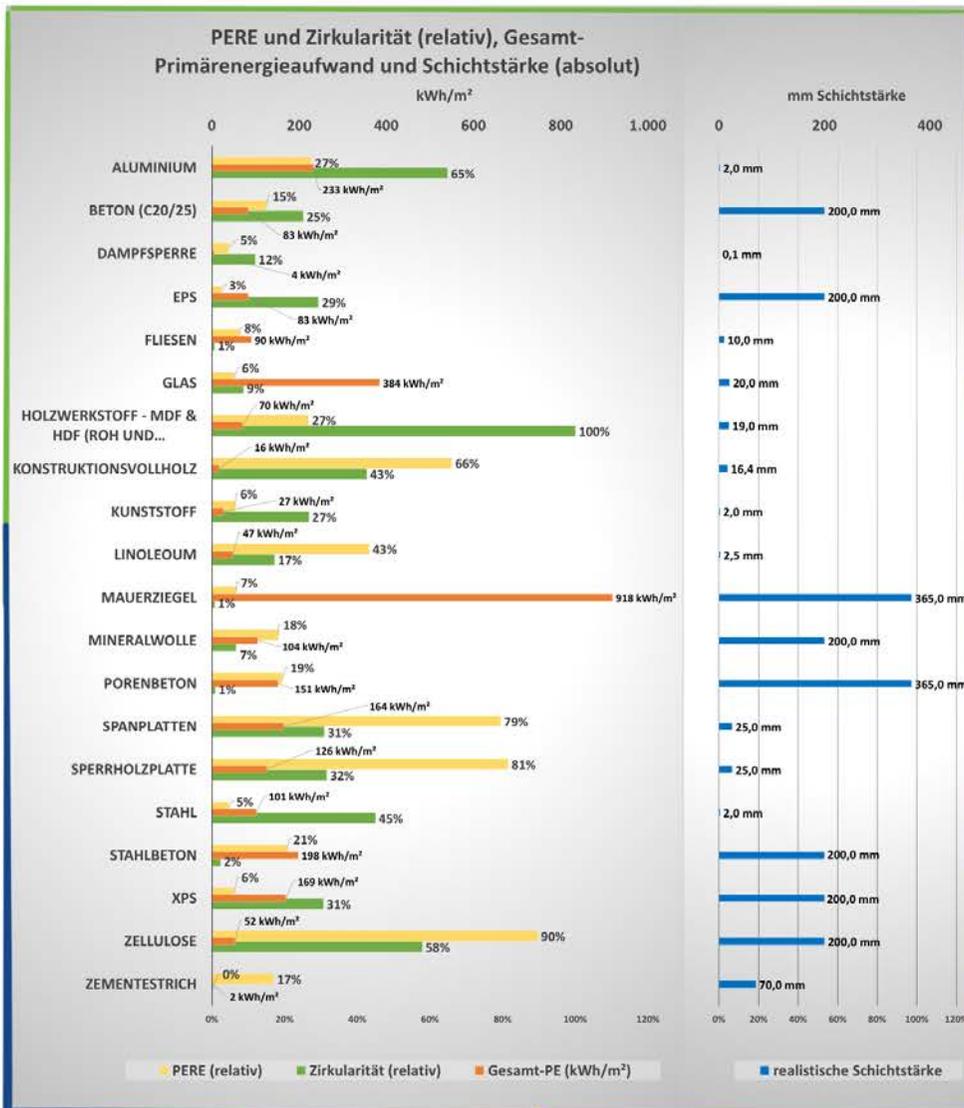


Abbildung 14: Komplexe Darstellung der Zirkularität anhand mehrerer Parameter

Die Abbildung 14 ergänzt dabei die Abbildung 13 noch weiter. Der hinzugefügte Balken (orange) zeigt zusätzlich den gesamten Primärenergieaufwand pro m² in kWh in Abhängigkeit einer postulierten realistischen Baumaterial-Schichtstärke (blauer Zusatz-Balken im rechten Sichtfeld der Abbildung). Ist dieser besonders hoch, wie z. B. beim Mauerziegel (918 kWh/m²), impliziert dies auch besonders hohe Umweltauswirkungen. Anwendungen oder Bauteilkonstruktionen mit Baustoffen solcher Art sollten, selbst wenn diese über eine hohe relative



Zirkularität verfügen und sofern der EE-Anteil (PERE) nicht überaus hoch liegt, hinsichtlich geeigneter Substitute überprüft werden.

Ein Baumaterial ist diesbezüglich vor allem dann besonders zirkulär, wenn der EE-Anteil (PERE) und die Zirkularität relativ hoch liegen und die Gesamt-PE in kWh/m² gleichzeitig möglichst gering ausfällt. Gute Beispiele sind hierbei erneut die Zellulose aber auch das Konstruktionsvollholz. Neben dem Mauerziegel sind v. a. Glas, Stahlbeton und Porenbeton, zumindest flächenbezogen pro m² und bei benannter Schichtstärke, Negativbeispiele. Eine Veränderung der Schichtstärke wirkt sich hierbei jedoch proportional auf die Gesamt-PE aus. Eine ggf. mögliche Reduktion der Schichtstärke kommt damit der Umweltverträglichkeit eines Baumaterials gleichwohl zugute. Eine Wandstärke beim Mauerziegel von z. B. 240 mm anstelle von 365 mm würde die Gesamt-PE demnach um etwa ein Drittel auf rund 610 kWh/m² senken. Dies würde aber dann dennoch den höchsten Wert innerhalb der aufgezeigten Baumaterialien repräsentieren. Der Porenbeton stellt sich hier, v. a. aufgrund seiner geringen Rohdichte, als vorteilhafter dar. Und selbst wenn der Unterschied der Rohdichten von 1.800 kg/m³ (Mauerziegel) und 380 kg/m³ (Porenbeton) herausgerechnet würde, so hätte der Porenbeton bezogen auf das kg noch einen Gesamt-PE-Vorteil von etwas mehr als 20 %. Der Stahlbeton würde bezogen auf das kg, verglichen mit Mauerziegel und Porenbeton, sogar die besten Gesamt-PE-Werte erzielen, erreicht aber in der Praxis durch seine hohe Rohdichte von rund 2.500 kg/m³ keine Oberhand gegenüber dem Porenbeton.

Es ist zusätzlich anzumerken, dass die reine Betrachtung von Grauer Energie und Zirkularität, zumindest beim Mauerwerk bzw. dem Bauteil Außenwand, ebenso nicht zielführend ist, da auch die U-Werte bzw. die unterschiedlichen Transmissionswärmeverluste der eingesetzten Materialien für die ganzheitliche energetische Betrachtung von großer Relevanz sind. Bei Baumaterialien, welche nicht für die Konstruktion und/oder Dämmung von Bauteilen der thermischen Gebäudehülle eingesetzt werden, ist die zusätzliche Betrachtung von U-Werten dagegen wenig entscheidend.

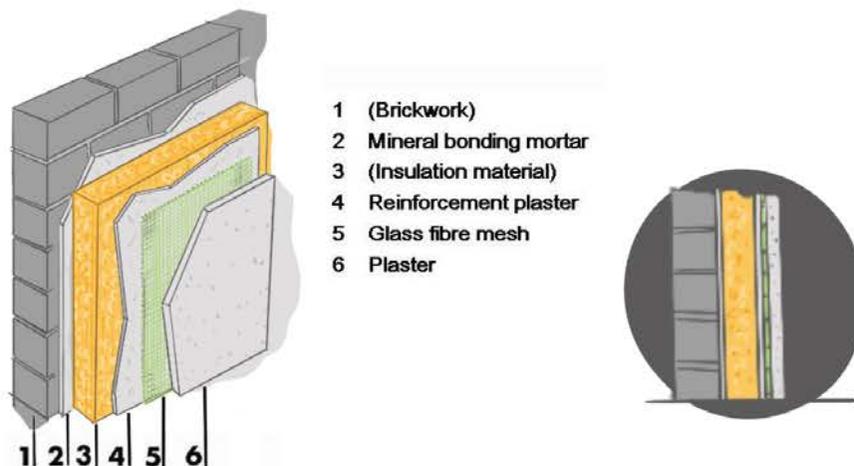
2 Analyse der Umweltwirkung von Wand- bzw. Fassadenaufbauten für unterschiedliche Dämmungs-Optionen

Die Entwicklung der Dämmungs-Optionen erfolgte in fachlichen Diskussionen und zusätzlichen Terminen im Rahmen des Arbeitspaket 1 (AP 1) innerhalb des Arbeitsschrittes 3 (AS 3) in enger Abstimmung zwischen der Energieberatung und Experten für Life Cycle Assessment (IfaS), der Projektleitung und der Leitung des Technischen Gebäudemanagement (TGM) des Kreis Lippe, ergänzt um weitere fachkundige Mitarbeiter des TGM. Die Basis bildeten hierbei bereits bestehende, zum Teil innovative, Varianten, welche um neue, auf Zirkularität ausgerichtete, Baustoffe und Produkte ergänzt wurden.

Insgesamt wurden sechs Varianten für den Fassaden- bzw. Wandaufbau, mit drei unterschiedlichen Aufbau-Arten für die Dämmung, festgehalten. Das tragende Mauerwerk ist bei der Analyse ausgeklammert, so dass der Fokus des Vergleichs, unabhängig vom Mauermaterial, auf der Dämmung liegt.

2.1 Beschreibung der Dämmungs-Optionen

Die ersten drei Varianten ähneln sich hierbei insofern stark, dass es sich bei der Aufbau-Art um sogenannte Wärme-Dämm-Verbund-Systeme (WDVS) handelt. Diese sind deswegen als Varianten 1 a bis c zusammengefasst.



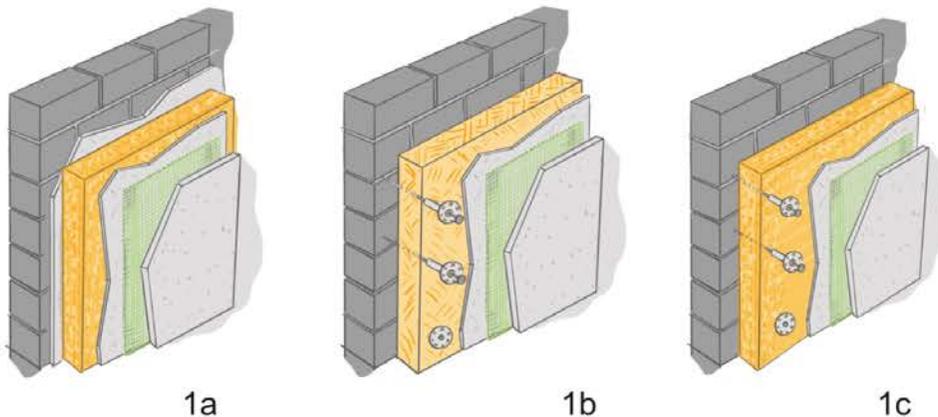


Abbildung 15: WDV-S-Aufbau für Dämmungs-Varianten 1 a bis c

Die erste Untervariante 1 a wird hierbei durch einen konventionellen verklebten und verdübelten Aufbau, mit Mineralfaser als Dämmmaterial, dargestellt.

Die zweite Untervariante 1 b ähnelt dem Aufbau der ersten, jedoch mit dem Unterschied, dass anstelle der Mineralfaser eine ökologische Holzfaser als Dämmmaterial Verwendung findet und auf mineralischen Kleber zwischen tragender Wand und Dämmung verzichtet wird. Stattdessen kommen mehr Dübel zum Einsatz.

Die Variante 1 c verfügt über den gleichen Aufbau wie 1 b, jedoch wird anstelle der Holzfaser eine zirkulär nutzbare Mineralfaser verwendet. Der Putz kann hier am Ende des ersten Lebenszyklus mechanisch von der Fassade geschält und der anschließend freiliegende Dämmstoff, durch lösen der Dübel-Verbindungen, abgenommen werden, ohne das größere Schäden an der

Dämmschicht entstehen. Hierdurch wird eine sortenreine Trennung gewährleistet, welche wiederum eine hohe Recyclingquote verspricht.

Die Variante 2 bildet eine vorgesetzte Mauerdämmung aus Porenbeton ab. Der Schichtaufbau ähnelt hier dem WDVS-System.

Bei den beiden letzten Varianten bzw. Unter-Varianten, zusammengefasst zu 3 (3 a und 3 b), handelt es sich um Fassaden-Aufbauten mit Zellulose-Einblasdämmung, einmal mit einer Alu-Vorhangfassade und einmal als verputzte Fassade.

Die folgende Abbildung 16 zeigt hierzu einen Beispiel-Ausschnitt des schematischen Aufbaus der Variante 2 a:

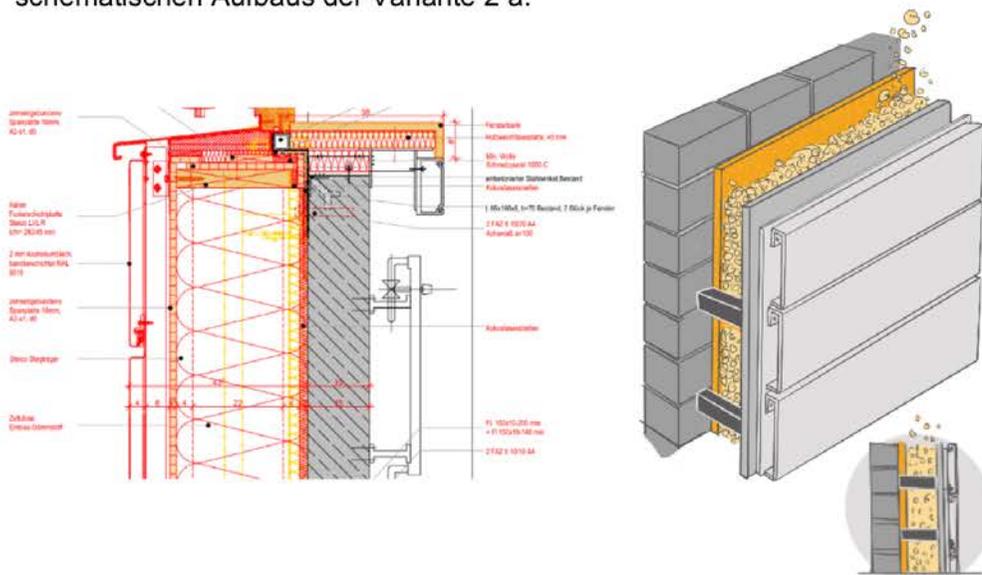


Abbildung 16: Ausschnitt – Alu-Vorhangfassade mit Zellulose-Einblasdämmung³

Die Abbildung zeigt den oberen Bereich eines Wandelementes.

Von außen (links) nach innen (rechts) sind im Wesentlichen das Aluminiumblech mit Profil für das Blech, die zementgebundene Spanplatte, der Holzfaserdämmstoff, Kokosfaserstreifen entlang der Betonwand und die Betonwand selbst zu erkennen, ganz rechts an der Innenwand ist ein Heizkörper angedeutet.

³ Vgl. Semke, Harald (2020), via TGM LK Lippe

An dieser Stelle sei noch einmal angemerkt, dass die LCA-Analyse für die unterschiedlichen Wandaufbauten das Mauerwerk und Elemente im Innenbereich nicht miteinbezieht. Im oberen Bereich sind zudem eine Furnierschichtplatte, welche als Befestigungsmaterial für die Verdübelung dient, und weitere Spanplatten- und Mineralfaserelemente erkennbar.

Die folgende Abbildung 17 visualisiert die beschriebenen Dämmungsvarianten für die Modellgebäude noch einmal in Form einer Schaubild-Übersicht.



Abbildung 17: Darstellung der Dämmvarianten für die Modellgebäude

2.2 Analyse-Ergebnisse der Dämmungs-Optionen

Die Darstellung der Analyse-Ergebnisse beschränkt sich aus Gründen der Übersichtlichkeit und Relevanz auf die wesentlichen physischen Daten, wie Schichtdicke in mm und Masse in kg/m^2 , sowie die Treibhauspotenzial bzw. GWP in $\text{kg CO}_2/\text{m}^2$ und die gebundene Graue Energie, unterteilt in nicht



erneuerbare (PENRE) und erneuerbare Primärenergie (PERE) in energetischer Form. Die energetische Form unterscheidet sich von der stofflich gebundenen Form hierbei insofern, dass diese bei der Herstellung von Baumaterialien und der Errichtung von Bauwerken verbraucht wurde. Die stofflich gebundene Primärenergie, ausgedrückt als PENRM und PERM bezieht sich dahingegen auf das energetische Potenzial der gegebenenfalls vorhandenen brennbaren Baumaterialien, welches durch kaskadische energetische Verwertung erschlossen werden kann.

Da in Bezug auf eine zirkuläre Kreislaufführung jedoch die stoffliche Verwertung im Fokus steht, wird auf die zusätzliche Darstellung der PENRM und PERM oder der Summe aus PENRE und PENRM (entspricht PENRT) bzw. PERE und PERM (entspricht PERT) verzichtet.

Ebenso werden auch weitere Umweltindikatoren, wie Versauerungspotenzial (AP), (Eutrophierungspotenzial) EP, (stratosphärisches Ozonabbaupotenzial) (ODP) oder troposphärisches Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP) etc. vorerst nicht aufgeführt.

Im Zuge der Darstellung der Ergebnisse wird, analog zur Beschreibung der Dämmungs-Optionen, bei den WDV-Systemen begonnen.

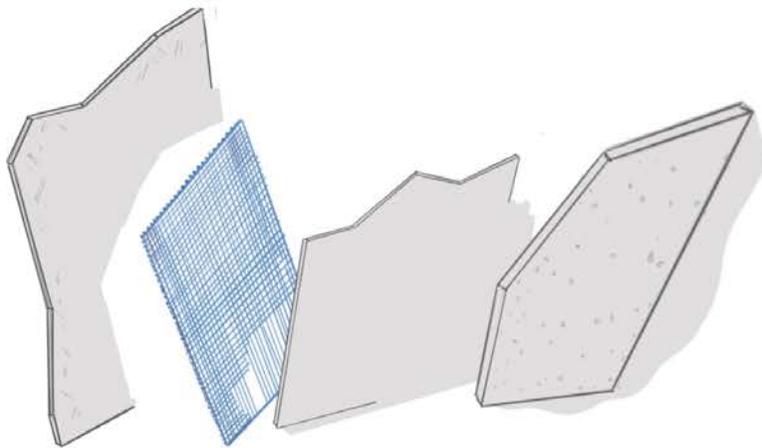
2.3 WDV-Systeme 1a bis c

Als Berechnungsbasis für die WDV-Systeme wurde der Datensatz mit der Bezeichnung „WDV Verklebung und Beschichtung Kratzputz mineralisch“ von der Sphera Solutions GmbH aus der OBD herangezogen. Der Datensatz enthält hierbei wichtige Informationen zur Art und Menge von Baustoff-Bestandteilen. Das Dämmmaterial und das Wandmaterial sind jedoch noch nicht im Prozess bzw. Datensatz berücksichtigt. Dies bietet den Vorteil, dass das Dämmmaterial variabel nach Bedarf hinzugefügt werden kann. Die Mauer oder Wand als Tragwerk der Dämmung bleibt ohnehin variabel bzw. wird für die Dämmungs-Optionen nicht direkt berücksichtigt.

Das bloße WDVS-System weist folgende Spezifikationen auf:

- Kleber (mineralisch) 4,0 kg/m²
- Glasgewebe 0,18 kg/m²
- Armierung (mineralisch) 8,0 kg/m²
- Kratzputz (mineralisch) 23,0 kg/m²

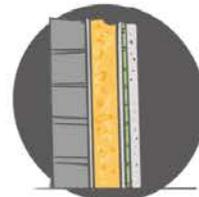
Der Datensatz umfasst weiterhin die Lebenswegabschnitte „cradle to gate“, d.h. die Herstellung von Vorprodukten und Verpackungen ist bereits berücksichtigt.



Um eine genaue Betrachtung der Einzelbaustoffe zu gewährleisten werden den vier genannten Baustoffen zudem folgende OBID-Datensätze zugeordnet:

- Kleber → Putzmörtel-Armierungsputz
- Glasgewebe → Glasarmierungsgitter
- Armierung → Putzmörtel-Armierungsputz
- Kratzputz → Kalkzement Putzmörtel

Lediglich zur Bestimmung des korrekten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) um den Passivhausstandard zu erreichen, wird für den Gesamtaufbau fiktiv eine Betonwand zugrunde gelegt. Da Beton relativ schlechte Dämmeigenschaften aufweist, kann die Stärke der Betonwand dabei relativ stark, zwischen 125 und 250 mm, variieren, ohne dass dadurch das Ergebnis für den U-Wert nennenswert beeinflusst wird.



2.3.1 Konventionelles WDVS-System (1a)

Die folgende Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen nun zuerst das konventionelle WDVS-System mit Mineralfaser als Dämmmaterial. Hierbei wurde der Datensatz „Mineralwoll-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich“ aus der OBD herangezogen. Um für den gesamten Wandaufbau einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und damit den Passivhausstandard zu erreichen sind mindestens 220 mm an Materialstärke erforderlich.

Tabelle 1: WDVS-Aufbau – konvent. mit Mineralfaser – Phys. Größen, GWP & PE

Schicht	Baumaterial	Menge	Schichtdicke	GWP	PENRE + PERE
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)	kg/m ²	mm	kg CO ₂ /m ²	kWh/m ²
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	variabel	z. B. 15 mm	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	4,00	2,5	1,49	6,87
3	Mineralwolle-Dämmstoff im mittleren Rohdichtebereich	22,00	220,0	30,90	114,84
4	Putzmörtel-Armierungsputz	8,00	5,0	2,99	13,73
5	Glasarmierungsgitter	0,18	liegt in 4	0,60	3,31
6	Kalkzement Putzmörtel	23,00	12,8	4,98	13,48
Σ		57,18	242,8	40,95	152,22
-	Befestigungssysteme für WDVS	0,306	-	1,09	4,97
Σ (tot.)		57,49	242,8	42,04	157,19

Aus den Mengenangaben für Kleber (mineralisch), Glasgewebe, Armierung (mineralisch) und Kratzputz (mineralisch) können in Kombination mit den zugehörigen Rohdichten die Materialstärken ermittelt werden.

Da sich die Stärke des Dämmmaterials durch den zu erreichenden U-Wert bestimmt ist es hier umgekehrt. Hier kann durch die benötigte Materialstärke und die zugehörige Rohdichte die Masse ermittelt werden.



Hinzu kommen noch die Dübel als zusätzliches Befestigungsmittel für das Dämmmaterial. Hierfür wird der OBD-Datensatz „Befestigungssysteme für WDVS“ herangezogen. Die im Datensatz hinterlegte Dübel-Länge von 195 mm wird hierbei adaptiert. Es wird von einem Mindestbedarf von sechs Dübeln mit einer Gesamtlänge von 275 mm ausgegangen.

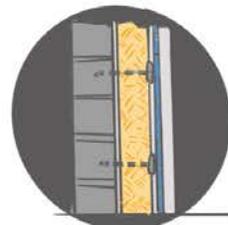
Zusammen mit dem Befestigungsmaterial (WDVS-Dübel) ergibt sich so insgesamt, für den Schichtaufbau der Dämmung inklusive Fassade, eine Masse von rund 57 kg/m², mit einer Stärke von 242,8 mm.

Das GWP beziffert sich rechnerisch auf etwa 42 kg CO₂/m² und die eingesetzte Primärenergie auf rund 160 kWh/m².

Tabelle 2: WDVS-Aufbau – konvent. mit Mineralfaser – Zirkularität

Schicht	Baumaterial	Zirkularität (relativ - einzeln)	nicht zirkulär genutzte Energie (kWh/m ²)	nicht zirkulär genutzte Masse
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)			
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	-	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	6,48	3,78
3	Mineralwolle-Dämmstoff im mittleren Rohdichtebereich	6,6%	107,26	20,55
4	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	12,96	7,55
5	Glasarmierungsgitter	1,2%	3,28	0,18
6	Kalkzement Putzmörtel	0,0%	13,48	23,00
Σ		5,8%	143,45	53,88
-	Befestigungssysteme für WDVS	14%	4,28	0,26
Σ (tot.)		6,0%	147,73	54,03

Aus den relevanten Datensätzen lässt sich zudem, bezogen auf den Primärenergieeinsatz, ein Recyclingpotenzial von ca. 6 % berechnen. Die nicht zirkulär genutzte Energie liegt damit bei rund 150 kWh/m². Die nicht zirkulär genutzte Masse bei rund 54 kg/m². Somit wird für etwa 94 % der Baustoffe kein Zirkularitäts-Szenario unterstellt.



2.3.2 Ökologisches WDVS-System (1b)

Die folgende Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen das ökologische WDVS-System mit Holzfaser als Dämmmaterial. Hierbei wird einerseits der OBD-Datensatz „Mineralwoll-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich“ durch den OBD-Datensatz „Holzfaserdämmstoffe im Trockenverfahren 110-200 kg/m³“ ausgetauscht (siehe grün ausgefüllte Zeile).



Um für den gesamten Wandaufbau einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und damit den Passivhausstandard zu erreichen sind abermals mindestens 220 mm an Materialstärke erforderlich. Andererseits wird, um eine sortenreine Trennbarkeit zu ermöglichen, die Klebemörtelschicht zwischen Mauerwerk und Dämmung nicht ausgeführt (siehe lila ausgefüllte Zeile), im Gegenzug jedoch im Mittel acht anstelle von sechs Dübeln pro m^2 angesetzt (siehe gelb ausgefüllte Zeile).

Zusätzlich wird, um eine sortenreine Trennung zu ermöglichen, eine weitere Schicht Armierungsgewebe zwischen Dämmmaterial und Armierungsputz erforderlich. Die Menge an benötigtem Gewebe verdoppelt sich dadurch.

Tabelle 3: WDVS-Aufbau – ökologisch mit Holzfaser – Phys. Größen, GWP & PE

Schicht	Baumaterial	Menge	Schichtdicke	GWP	PENRE + PERE
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)	kg/m^2	mm	$\text{kg CO}_2/\text{m}^2$	kWh/m^2
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	variabel	z. B. 15 mm	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	0,00	0,0	0,00	0,00
3	Holzfaserdämmstoffe im Trockenverfahren $110\text{-}200 \text{ kg}/\text{m}^3$	44,00	220,0	19,17	185,15
4	Putzmörtel-Armierungsputz	8,00	5,0	2,99	13,73
-	Glasarmerungsgitter	0,36	liegt in 4 & 6	1,20	6,63
5	Kalkzement Putzmörtel	23,00	12,8	4,98	13,48
Σ		75,36	237,8	28,33	218,98
-	Befestigungssysteme für WDVS	0,408	-	1,46	6,62
Σ (tot.)		75,77	237,8	29,79	225,61

Durch die Veränderung des Dämmmaterials und der Befestigung ergibt sich nun insgesamt, für den Schichtaufbau der Dämmung inklusive Fassade, eine Masse von rund $75 \text{ kg}/\text{m}^2$ (\uparrow ca. 32 % ggü. Option 1a), mit einer identischen Stärke von 242,8 mm.

Das GWP beziffert sich nun rechnerisch auf rund $30 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ (\downarrow ca. 29 % ggü. Option 1a) und die eingesetzte Primärenergie auf rund $225 \text{ kWh}/\text{m}^2$ (\uparrow ca. 44 % ggü. Option 1a).

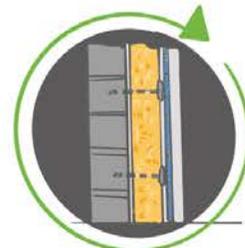
Das niedrigere GWP ist hierbei maßgeblich auf die CO_2 -Vorteile bei der Nutzung von erneuerbaren Rohstoffen zurückzuführen. Der hohe Primärenergiebedarf resultiert dagegen hauptsächlich aus der Energieaufwendung für das Trockenverfahren für Holzfaserstoffe und v. a. aus der höheren Rohdichte der Holzfaser (Rechenwert: $200 \text{ kg}/\text{m}^3$) gegenüber der Mineralfaser ($100 \text{ kg}/\text{m}^3$) und dem dadurch bedingt höheren Masseinsatz.

Tabelle 4: WDVS-Aufbau – ökologisch mit Holzfaser – Zirkularität

Schicht	Baumaterial	Zirkularität	nicht zirkulär genutzte	nicht zirkulär
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)	(relativ - einzeln)	Energie (kWh/m ²)	genutzte Masse
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	-	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	0,00	0,00
3	Holzfaserdämmstoffe im Trockenverfahren 110-200 kg/m ³	100,0%	0,00	0,00
4	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	12,96	7,55
-	Glasarmierungsgitter	1,2%	6,55	0,36
5	Kalkzement Putzmörtel	0,0%	13,48	23,00
Σ		84,9%	32,99	11,35
-	Befestigungssysteme für WDVS	14%	5,70	35
Σ (tot.)		82,9%	38,69	12,35

Aus den relevanten Datensätzen lässt sich zudem, bezogen auf den Primärenergieeinsatz, ein hohes Recyclingpotenzial von ca. 83 % berechnen. Die nicht zirkulär genutzte Energie liegt damit nur bei rund 39 kWh/m² (↓ ca. 74 % ggü. Option 1a).

Die nicht zirkulär genutzte Masse bei rund 13 kg/m² (↓ ca. 76% ggü. Option 1a). Somit wird für nur etwa 17 % der Baustoffe kein Zirkularitäts-Szenario unterstellt.



2.3.3 Zirkuläres WDVS-System (1c)

Die folgende Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigen das zirkuläre WDVS-System. Die Ausführung ist jener aus Option 1b ähnlich. Demnach wird auf die Klebemörtelschicht zwischen Mauerwerk und Dämmmaterial verzichtet (siehe lila ausgefüllte Zeile) und im Gegenzug finden im Mittel acht anstelle von sechs Dübel pro m² Verwendung (siehe gelb ausgefüllte Zeile). Als Material für die Dämmung wird nun abermals Mineralfaser eingesetzt. Zudem wird erneut der OBD-Datensatz „Mineralwoll-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich“ herangezogen, jedoch mit der Annahme einer 95 %igen stofflichen Verwertbarkeit. Um für den gesamten Wandaufbau einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,14 W/(m²K) und damit den Passivhausstandard zu erreichen sind wie für Option 1a & b wieder mindestens 220 mm an Materialstärke erforderlich.



Tabelle 5: WDVS-Aufbau – zirkulär mit Mineralfaser – Phys. Größen, GWP & PE

Schicht	Baumaterial	Menge	Schichtdicke	GWP	PENRE + PERE
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)	kg/m ²	mm	kg CO ₂ /m ²	kWh/m ²
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	variabel	z. B. 15	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	0,00	0,0	0,00	0,00
3	Mineralwolle-Dämmstoff im mittleren Rohdichtebereich	22,00	220,0	30,90	114,84
4	Putzmörtel-Armierungsputz	8,00	5,0	2,99	13,73
-	Glasmierungsgitter	0,36	liegt in 4 & 6	1,20	6,63
5	Kalkzement Putzmörtel	23,00	12,8	4,98	13,48
Σ		53,36	237,8	40,06	148,67
-	Befestigungssysteme für WDVS	0,408	-	1,46	6,62
Σ (tot.)		53,77	237,8	41,51	155,29

Es ergibt sich nun insgesamt, für den Schichtaufbau der Dämmung inklusive Fassade, eine Masse von rund 54 kg/m² (↓ ca. 6,5 % ggü. Option 1a), mit einer Stärke von 237,8 mm.

Das GWP beziffert sich nun rechnerisch auf ca. 42 kg CO₂/m² (↓ ca. 1,3 % ggü. Option 1a) und die eingesetzte Primärenergie auf rund 155 kWh/m² (↓ ca. 1,2 % ggü. Option 1a). Die marginal niedrigeren Werte für GWP und Primärenergie können hier durch den Wegfall von 4 kg Armierungskleber erklärt werden, während nur ca. 120 g an Masse durch Dübel hinzukommen.

Tabelle 6: WDVS-Aufbau – zirkulär mit Mineralfaser – Zirkularität

Schicht	Baumaterial	Zirkularität	nicht zirkulär genutzte	nicht zirkulär
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)	(relativ - einzeln)	Energie (kWh/m ²)	genutzte Masse
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	-	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	0,00	0,00
3	Mineralwolle-Dämmstoff im mittleren Rohdichtebereich	95,0%	5,74	1,10
4	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	12,96	7,55
-	Glasmierungsgitter	1,2%	6,55	0,36
5	Kalkzement Putzmörtel	0,0%	13,48	23,00
Σ		74,0%	38,73	13,90
-	Befestigungssysteme für WDVS	14%	5,70	0,35
Σ (tot.)		71,4%	44,43	15,38

Aus den Datensätzen und Annahmen lässt sich zudem, bezogen auf den Primärenergieeinsatz, ein Recyclingpotenzial von ca. 73 % ermitteln. Die nicht zirkulär genutzte Energie liegt damit rechnerisch bei rund 44 kWh/m² (↓ ca. 70 % ggü. Option 1a). Die nicht zirkulär genutzte Masse bei 15,38 kg/m² (↓ ca. 72% ggü. Option 1a). Beide Werte erreichen damit annähernd die Werte der ökologischen WDVS-Option 1b. Insgesamt wird aber, aufgrund der unterschiedlichen Rohdichten bzw. benötigten Massen von Holzfaser und Mineralfaser, für etwa 27 % der Baustoffe kein Zirkularitäts-Szenario unterstellt.

2.4 Porenbeton

Die folgenden Tabelle 7 und Tabelle 8 zeigen die Option Porenbeton. Diese ähnelt im Aufbau der WDVS-Option 1a. Auch hier wird zwischen Mauerwerk und Dämmmaterial eine Mörtelklebeschicht benötigt. Eine weitere dient zudem als Unterputz um Glasarmierungsgewebe einzubetten, darauf folgt eine Leichtputzschicht (siehe lila ausgefüllte Zeilen). Als Dämmmaterial kommen jedoch, anstelle von flexiblen Materialien, mineralische Multipor-Wärmedämmplatten (siehe apricotfarbene ausgefüllte Zeile) mit sehr geringer Rohdichte zum Einsatz. Ein Befestigungssystem auf der Basis von Dübeln wird dagegen nicht benötigt (siehe gelb ausgefüllte Zeile).

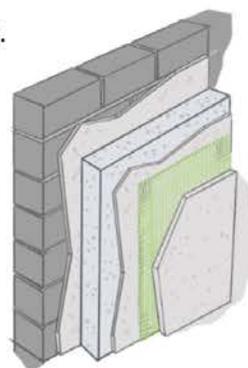
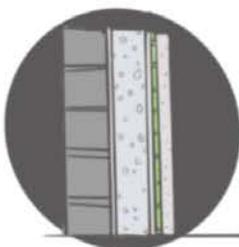


Tabelle 7: Porenbeton-Aufbau – Phys. Größen, GWP & PE

Schicht Nr.	Baumaterial	Menge kg/m ²	Schichtdicke mm	GWP kg CO ₂ /m ²	PENRE + PERE kWh/m ²
1	Mauerwerk - z. B. Kalksandstein (ρ 2,0)	variabel	z. B. 240	-	-
2	Mauermörtel-Leichtmauermörtel	4,00	4,0	1,90	6,37
3	Multipor Wärmedämmplatte (Xella Baustoffe GmbH)	30,00	300,0	39,78	138,83
4	Mauermörtel-Leichtmauermörtel	4,00	4,0	1,90	6,37
5	Glasarmierungsgitter	0,18	liegt in 4	0,60	3,31
6	Putzmörtel-Leichtputz	23,00	17,7	6,36	24,97
Σ		61,18	321,7	50,55	179,84
-	Befestigungssysteme für WDVS	0	-	0,00	0,00
Σ (tot.)		61,18	321,7	50,55	179,84

Insgesamt ergibt sich eine Masse von ca. 61 kg/m². Die Gesamtstärke der Porenbetonwand beträgt 321,7 mm, wobei 300 mm Porenbeton benötigt werden um einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,14 W/(m²K) und damit den angestrebten Passivhausstandard zu erreichen.

Das GWP bezieht sich rechnerisch auf rund 50 kg CO₂/m² und die eingesetzte Primärenergie auf ca. 180 kWh/m². Damit liegt das GWP, u. a. bedingt durch die höhere benötigte Schichtstärke an Porenbeton, etwas höher als bei den WDVS-Optionen. Die Primärenergie liegt dagegen zwischen jenen der Optionen 1a & c und 1b.

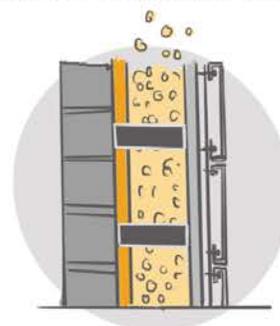
Tabelle 8: Porenbeton-Aufbau – Zirkularität

Schicht	Baumaterial	Zirkularität (relativ - einzeln)	nicht zirkulär genutzte Energie (kWh/m ²)	nicht zirkulär genutzte Masse
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)			
1	Mauerwerk - z. B. Kalksandstein (p 2,0)	-	-	-
2	Mauermörtel-Leichtmauermörtel	4,0%	6,11	3,84
3	Multipor Wärmedämmplatte (Xella Baustoffe GmbH)	15,6%	117,14	25,31
4	Mauermörtel-Leichtmauermörtel	4,0%	6,11	3,84
5	Glasarmierungsgitter	1,2%	3,28	0,18
6	Putzmörtel-Leichtputz	7,8%	23,02	21,20
Σ		13,4%	155,66	52,95
-	Befestigungssysteme für WDVS	14%	0,00	0,00
Σ (tot.)		13,4%	155,66	52,95

Aus den Datensätzen lässt sich zudem, bezogen auf den Primärenergieeinsatz, ein Recyclingpotenzial von nur ca. 13 % ermitteln. Die nicht zirkulär genutzte Energie liegt damit rechnerisch bei rund 155 kWh/m². Die nicht zirkulär genutzte Masse unterdessen bei etwa 53 kg/m². Beide Werte liegen in etwa so hoch wie bei der WDVS-Option 1a. Dies ist jedoch nicht zuletzt auch den Annahmen für die Zirkularität geschuldet.

2.5 Zellulose-Einblasdämmung

Für die Zellulose-Einblasdämmung wurde die vom Architekten Harald Semke und vom Technischen Gebäudemanagement Lippe zur Verfügung gestellte technische Zeichnung für die Fassade des Kreishaus Lippe herangezogen. Hierbei wurden für die relevanten Einzelmaterialien jeweils Art und Maße analysiert und über Material- und Rohdichtezuordnung die sich ergebenden Volumina und letztlich Massen bestimmt, aus welchen wiederum die Umweltwirkungen abgeleitet werden können.



2.5.1 Zellulose-Einblasdämmung mit Alu-Vorhangfassade (3a)

Die folgende Tabelle 9 und Tabelle 10 Tabelle 9 zeigen den Aufbau bzw. die verbauten Materialien im Zellulose-Einblasdämmungs-System. Dazu wurden



die wesentlichen verbauten Materialien annäherungsweise nach ihrer Verortung von innen nach außen angeordnet, da eine genaue Schichtanordnung aufgrund des komplexen dreidimensionalen Aufbaus hier nicht möglich ist. Die Stärke der Dämmschicht, um das Niveau des Passivhausstandard zu erreichen, liegt jedoch abermals bei 220 mm.

Tabelle 9: Zellulose-Einblasd. mit Alu-Vorhangfassade – Phys. Größen, GWP & PE

Schicht Nr.	Baumaterial Materialbezeichnung (OBD)	Menge kg/m ²	Schichtdicke mm	GWP kg CO ₂ /m ²	PENRE + PERE kWh/m ²
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	variabel	z. B. 15	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	0,00	0	0,00	0,00
-	Schwere Stahlplatten	5,47	-	14,22	37,00
3	Holzfaservereinbläsung STEICOzell	9,70	220	10,79	40,40
-	Holzfaserdämmstoffe im Trockenverfahren 110-200 kg/m ³	7,46	-	3,25	31,38
3	Furnierschichtholz (generisch)	9,88	220	9,16	136,08
4	STEICO joist/wall Stegträger	4,40	40	4,53	25,83
-	Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl	0,28	-	1,14	4,98
5	Zementgebundene Spanplatte	29,49	12,5	48,57	169,85
6	MAXI-TEC® CW- und UW-Profile	2,83	-	6,22	25,30
7	Eloxiertes Aluminiumblech	5,21	2	31,86	175,71
Σ		74,71	435	129,76	646,55

Aus der Volumen-Analyse der wesentlichen Bauteile können in Kombination mit den zugehörigen Rohdichten die Materialmassen ermittelt werden.

So ergibt sich insgesamt eine Masse von rund 75 kg/m², mit einer Stärke von 435 mm. Das GWP beziffert sich rechnerisch auf etwa 130 kg CO₂/m² und die eingesetzte Primärenergie auf rund 650 kWh/m².

Der Aufbau ist damit annähernd so schwer wie das ökologische WDVS-System (1b), liegt bezogen auf das GWP jedoch mehr als 4-mal höher und beim Primärenergieeinsatz immer noch beinahe 3-mal höher.

Tabelle 10: Zellulose-Einblasdämmung mit Alu-Vorhangfassade – Zirkularität

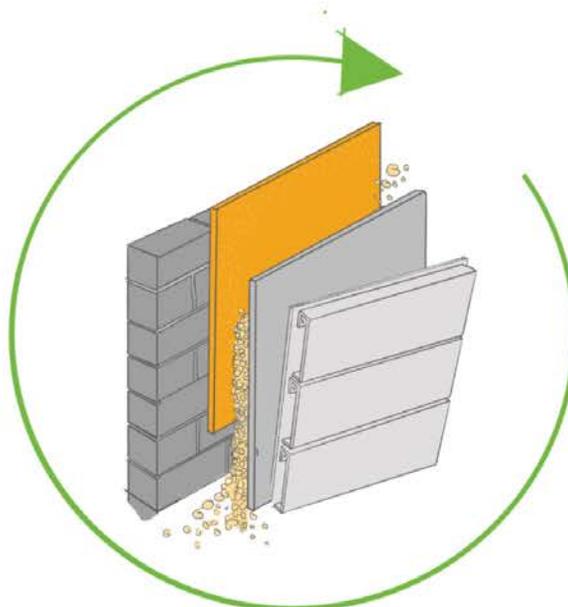
Schicht Nr.	Baumaterial Materialbezeichnung (OBD)	Zirkularität (relativ - einzeln)	nicht zirkulär genutzte Energie (kWh/m ²)	nicht zirkulär genutzte Masse
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	-	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	0,00	0,00
-	Schwere Stahlplatten	49,3%	18,77	2,77
3	Holzfaservereinbläsung STEICOzell	100,0%	0,00	0,00
-	Holzfaserdämmstoffe im Trockenverfahren 110-200 kg/m ³	100,0%	0,00	0,00
3	Furnierschichtholz (generisch)	22,3%	105,72	7,68
4	STEICO joist/wall Stegträger	76,5%	6,08	1,03
-	Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl	28,2%	3,58	0,20
5	Zementgebundene Spanplatte	6,1%	159,45	27,68
6	MAXI-TEC® CW- und UW-Profile	34,3%	16,61	1,86
7	Eloxiertes Aluminiumblech	0,0%	175,71	5,21
Σ		24,8%	485,91	56,15



Aus den Datensätzen und Annahmen lässt sich zudem, bezogen auf den Primärenergieeinsatz, ein Recyclingpotenzial von ca. 25 % ermitteln. Die nicht zirkulär genutzte Energie liegt damit rechnerisch bei sehr hohen rund 485 kWh/m². Der Wert liegt damit mehr als 3-mal so hoch als jener für Option 1a und über 12-mal höher als für Option 1b.

Die nicht zirkulär genutzte Masse liegt bei ca. 56 kg/m² und damit in etwa auf dem Niveau von Option 1a und 2. Dies ist jedoch erneut nicht zuletzt den Annahmen für die Zirkularität geschuldet. Besonders das Furnierschichtholz, die zementgebundenen Spanplatte und das eloxierte Aluminiumblech sind hierbei zu benennen (siehe rote Umrahmung in Tabelle 11).

Jedoch soll zumindest das Aluminiumblech der Vorhangfassade in der Planung einem Second-Life-Zyklus zugeführt und damit möglichst vollumfänglich wiederverwendet werden. Hier ist aufgrund des Zirkularitäts-Ansatzes eine Korrektur auf 95 % möglich. Sofern für das Furnierschichtholz und die zementgebundene Spanplatte geeignete Substitutionsprodukte verwendet würden, welche den Brandschutz und sonstigen baurechtlichen Bestimmungen noch genügen, wären hier ggf. ebenso hohe Werte von beispielsweise 70 % für die Zirkularität denkbar.



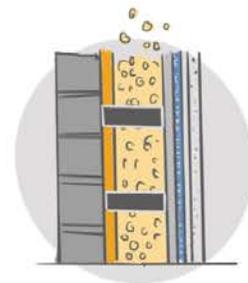


Wird hypothetisch davon ausgegangen, dass sich die drei genannten Materialien so substituieren lassen, dass sie wie angegeben stofflich wiederverwendet oder verwertet werden können, so ließe sich eine hohe Gesamtzirkularität von über 75 % erreichen (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Zellulose-Einblasd. mit Alu-Vorhangfassade – Zirkularität (Potenzial)

Schicht Nr.	Baumaterial	Zirkularität (relativ - einzeln)	nicht zirkulär genutzte Energie (kWh/m²)	nicht zirkulär genutzte Masse
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	-	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	0,00	0,00
-	Schwere Stahlplatten	49,3%	18,77	2,77
3	Holzfasern-Einblasdämmung STEICOzell	100,0%	0,00	0,00
-	Holzfaserdämmstoffe im Trockenverfahren 110-200 kg/m³	100,0%	0,00	0,00
3	Furnierschichtholz (generisch)	70,0%	40,82	2,96
4	STEICO joist/wall Stegträger	76,5%	6,08	1,03
-	Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl	28,2%	3,58	0,20
5	Zementgebundene Spanplatte	70,0%	50,95	8,85
6	MAXI-TEC® CW- und UW-Profile	34,3%	16,61	1,86
7	Eloxiertes Aluminiumblech	95,0%	8,79	0,26
Σ		77,5%	145,60	16,82

Die nicht zirkulär genutzte Energie würde damit von etwa 485 kWh/m² auf rund 145 kWh/m² sinken, die nicht zirkulär genutzte Masse von ca. 56 kg/m² auf rund 17 kg (beide ↓ ca. 70 %). Primärenergiebezogen würde dabei das Zirkularitäts-Niveau der Optionen 1a und 2 und erreicht werden. Massebezogen wird sogar das Niveau von 1b und 1c erreicht.



2.5.2 Zellulose-Einblasdämmung mit mineralischem Putz (3b)

Wird anstelle der Aluvorhangfassade ein Putzsystem als Außen-Fassade auf die äußere zementgebundene Spanplatte aufgetragen, so ergibt sich der Aufbau wie in Tabelle 12 und Tabelle 13 dargestellt. Die Datensätze für Stahlprofile und Aluminiumblech werden hierbei durch die Datensätze für Armierungsputz, Glasarmierungsgitter und Kalkzement Putzmörtel ersetzt.



Tabelle 12: Zellulose-Einblasdämmung mit mineral. Putz – Phys. Größen, GWP & PE

Schicht	Baumaterial	Menge	Schichtdicke	GWP	PENRE + PERE
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)	kg/m ²	mm	kg CO ₂ /m ²	kWh/m ²
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	variabel	z. B. 15	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	0,00	0	0,00	0,00
-	Schwere Stahlplatten	5,47	-	14,22	37,00
3	Holzfaser-Einblasdämmung STEICOzell	9,70	220	10,79	40,40
-	Holzfaserdämmstoffe im Trockenverfahren 110-200 kg/m ³	7,46	-	3,25	31,38
3	Furnierschichtholz (generisch)	9,88	220	9,16	136,08
4	STEICO joist/wall Stegträger	4,40	40	4,53	25,83
-	Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl	0,28	-	1,14	4,98
5	Zementgebundene Spanplatte	29,49	12,5	48,57	169,85
6	Putzmörtel-Armierungsputz	8,00	5,0	2,99	13,73
-	Glasarmierungsgitter	0,18	liegt in 6	0,60	3,31
7	Kalkzement Putzmörtel	23,00	12,8	4,98	13,48
Σ		97,85	351	100,24	476,05

Dabei ergibt sich nun insgesamt rechnerisch eine Masse von etwa 100 kg/m², mit einer Stärke von 351 mm.

Das GWP beziffert sich auf rund 100 kg CO₂/m² und die eingesetzte Primärenergie auf rund 480 kWh/m². Durchaus hohe Werte, jedoch geringer als jene für das System mit Alu-Vorhangsfassade. Die Einsparungen kommen hierbei maßgeblich durch die Vermeidung der energieintensiv herzustellenden Metalle, v. a. Aluminium, zustande.

Tabelle 13: Zellulose-Einblasdämmung mit mineral. Putz – Zirkularität

Schicht	Baumaterial	Zirkularität	nicht zirkulär genutzte	nicht zirkulär
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)	(relativ - einzeln)	Energie (kWh/m ²)	genutzte Masse
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	-	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	0,00	0,00
-	Schwere Stahlplatten	49,3%	18,77	2,77
3	Holzfaser-Einblasdämmung STEICOzell	100,0%	0,00	0,00
-	Holzfaserdämmstoffe im Trockenverfahren 110-200 kg/m ³	100,0%	0,00	0,00
3	Furnierschichtholz (generisch)	22,3%	105,72	7,68
4	STEICO joist/wall Stegträger	76,5%	6,08	1,03
-	Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl	28,2%	3,58	0,20
5	Zementgebundene Spanplatte	6,1%	159,45	27,68
6	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	12,96	7,55
-	Glasarmierungsgitter	1,2%	3,28	0,18
7	Kalkzement Putzmörtel	0,0%	13,48	23,00
Σ		32,1%	323,30	66,45

Aus den Datensätzen und Annahmen lässt sich zudem, bezogen auf den Primärenergieeinsatz, ein Recyclingpotenzial von ca. 32 % ermitteln.

Die nicht zirkulär genutzte Energie liegt damit rechnerisch bei rund 320 kWh/m² (↓ ca. 33 % ggü. Option 3 a). Die nicht zirkulär genutzte Masse bei etwa 66 kg/m² (↑ ca. 18 % ggü. Option 3 a).



Wir nun analog zur Vorhangfassade argumentiert und hypothetisch davon ausgegangen, dass sich alle drei Materialien so substituieren lassen, dass sie vergleichbar stofflich wiederverwendbar oder verwertbar werden, so ließe sich eine hohe Gesamtzirkularität von nahezu 70 % erreichen (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Zellulose-Einblasdämmung mit mineral. Putz – Zirkularität (Potenzial)

Schicht	Baumaterial	Zirkularität (relativ - einzeln)	nicht zirkulär genutzte Energie (kWh/m ²)	nicht zirkulär genutzte Masse
1	Mauerwerk - z. B. Beton (2% armiert)	-	-	-
2	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	0,00	0,00
-	Schwere Stahlplatten	49,3%	18,77	2,77
3	Holzfasern-Einblasdämmung STEICOzell	100,0%	0,00	0,00
-	Holzfaserdämmstoffe im Trockenverfahren 110-200 kg/m ³	100,0%	0,00	0,00
3	Furnierschichtholz (generisch)	70,0%	40,82	2,96
4	STEICO joist/wall Stegträger	76,5%	6,08	1,03
-	Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl	28,2%	3,58	0,20
5	Zementgebundene Spanplatte	70,0%	50,95	8,85
6	Putzmörtel-Armierungsputz	5,6%	12,96	7,55
-	Glasarmerungsgitter	1,2%	3,28	0,18
7	Kalkzement Putzmörtel	0,0%	13,48	23,00
Σ		68,5%	149,91	30,81

Die nicht zirkulär genutzte Energie würde damit rechnerisch von rund 320 kW/m² auf ca. 150 kWh/m² sinken, die nicht zirkulär genutzte Masse von ca. 66 kg/m² auf rund 31 kg/m² (beide ↓ ca. 54 %).

Primärenergiebezogen würde dabei das Zirkularitäts-Niveau der Optionen 1a, 2 und 3a erreicht werden. Massebezogen würde das Niveau zwischen jenem der Optionen 1a, 2 und 3a und dem der Optionen 1b und 1c liegen.

Um die LCA-Betrachtung der Fassaden in Bezug auf die Gebäude-Oberfläche möglichst vollständig zu gewährleisten werden nicht nur die verschiedenen Optionen für die Dämmung, sondern auch zusätzlich die Graue Energie, das GWP und die Zirkularität der Fenster-Elemente bei der hier vorliegenden Analyse berücksichtigt.

2.6 Fenster (2-Fach-Verglasung ggü. 3-Fach-Verglasung)

Die Betrachtung der Fensterfläche erfolgt vereinfacht über OBD-Datensätze zu Blendrahmen, Flügelrahmen und Mehrscheibenverglasung. Dabei wurden die Werte pro m² von einem fiktiven Fenster-Element von 2 m² Fläche abgeleitet.



2.6.1 Fenster (2-Fach-Glas)

Es wird davon ausgegangen, dass pro m² 2-fach verglastem Fenster 2,85 m Blendrahmen, 2,8 m Flügelrahmen und 0,72 m² Fensterglas verbaut werden. Für die m-Werte werden hierbei Rahmenstärken von 80 mm (Blendrahmen) bzw. 65 mm (Flügelrahmen) angesetzt.

Tabelle 15: Fenster pro m² (2-Fach-Glas) – Phys. Größen, GWP & PE

Schicht	Baumaterial	Menge	Stärke	GWP	PENRE + PERE
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)	divers	mm	kg CO ₂ /m ²	kWh/m ²
1	Blendrahmen PVC-U	2,85 m	80	12,39	45,95
2	Flügelrahmen PVC-U	2,80 m	65	12,71	47,89
3	Mehrscheibenisoliertglas ? PRESS GLASS Holding SA ? Mehrscheibenisoliertglas 2-fach-Aufbau	0,72 m ²	26	1,37	6,90
Σ				26,47	100,74

Das GWP beziffert sich hierbei rechnerisch auf rund 26 kg CO₂/m² und die eingesetzte Primärenergie auf rund 100 kWh/m².

Tabelle 16: Fenster pro m² (2-Fach-Glas) – Zirkularität (Potenzial)

Schicht	Baumaterial	Zirkularität (relativ - einzeln)	nicht zirkulär genutzte Energie (kWh/m ²)	nicht zirkulär genutzte Menge
1	Blendrahmen PVC-U	19,1%	37,20	2,31
2	Flügelrahmen PVC-U	18,2%	39,19	2,29
3	Mehrscheibenisoliertglas ? PRESS GLASS Holding SA ? Mehrscheibenisoliertglas 2-fach-Aufbau	7,6%	6,37	0,67
Σ		17,8%	82,76	

Aus den Datensätzen und Annahmen lässt sich zudem, bezogen auf den Primärenergieeinsatz, ein Recyclingpotenzial von ca. 18 % ermitteln. Die nicht zirkulär genutzte Energie liegt damit rechnerisch bei rund 83 kWh/m².

2.6.2 Fenster (3-Fach-Glas)

Für das 3-fach verglaste Fenster werden die m-Werte auf eine Rahmenstärke von 100 mm bzw. 80 mm hochgerechnet. Hierbei ergeben sich Äquivalenzmengen von 3,56 m für Blendrahmen und 3,45 m für Flügelrahmen.

Tabelle 17: Fenster pro m² (3-Fach-Glas) – Phys. Größen, GWP & PE

Schicht	Baumaterial	Menge	Stärke	GWP	PENRE + PERE
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)	divers	mm	kg CO ₂ /m ²	kWh/m ²
1	Blendrahmen PVC-U	3,56 m	100	15,49	57,44
2	Flügelrahmen PVC-U	3,45 m	80	15,64	58,94
3	Mehrscheibenisoliertglas ? PRESS GLASS Holding SA ? Mehrscheibenisoliertglas 3-fach-Aufbau	0,72 m ²	46	1,38	7,21
Σ				32,51	123,59

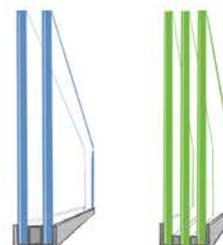
Das GWP beziffert sich hierbei nun rechnerisch auf rund 33 kg CO₂/m² und die eingesetzte Primärenergie auf rund 125 kWh/m². Das entspricht im Vergleich zur 2-Fach-Verglasung Aufschlägen von jeweils ca. 23 %.



Tabelle 18: Fenster pro m² (3-Fach-Glas) – Zirkularität (Potenzial)

Schicht	Baumaterial	Zirkularität (relativ - einzeln)	nicht zirkulär genutzte Energie (kWh/m ²)	nicht zirkulär genutzte Menge
Nr.	Materialbezeichnung (OBD)			
1	Blendrahmen PVC-U	19,1%	46,50	2,88
2	Flügelrahmen PVC-U	18,2%	48,23	2,82
3	Mehrscheibenisiererglas ? PRESS GLASS Holding SA ? Mehrscheibenisiererglas 3-fach-Aufbau	7,6%	6,66	0,67
Σ		18,0%	101,39	

Es lässt sich zudem, bezogen auf den Primärenergieeinsatz, ein Recyclingpotenzial von ca. 18 % ermitteln. Die nicht zirkulär genutzte Energie liegt damit rechnerisch bei rund 100 kWh/m². Es handelt sich hierbei ebenfalls um einen Aufschlag von rund 23%.



2.7 Kurzüberblick – Variantenbewertung

Im Überblick zeigt sich die Überlegenheit der Option 1b in Bezug auf das GWP. Dahinter folgen, fast gleichauf, die Optionen 1a und 1c. In Bezug auf die Primärenergie erscheint die Option 1c knapp besser als die Option 1a, gefolgt von Option 2.

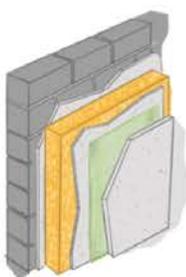
Tabelle 19: Kurzüberblick – Phys. Größen, GWP & PE

Variante	Baumaterial	Menge	Schichtdicke	GWP	PENRE + PERE
Nr.	Option bzw. Variante	kg/m ²	mm	kg CO ₂ /m ²	kWh/m ²
1a	Konventionell - Mineralfaser (geklebt und gedübelt)	57,49 kg	242,8 mm	42,04	157,19
1b	Eco - Holzweichfaser (geklebt und gedübelt)	75,77 kg	237,8 mm	29,79	225,61
1c	Zirkulär - Mineralfaser (gedübelt - vollständig sortenrein rückbaubar)	53,77 kg	237,8 mm	41,51	155,29
2	Porenbeton	61,18 kg	321,7 mm	50,55	179,84
3a	Holzfasern-Einblasdämmung - Aluminium-Vorhangfassade	74,71 kg	434,5 mm	129,76	646,55
	Modifiziert	74,71 kg	434,5 mm	129,76	646,55
3b	Holzfasern-Einblasdämmung - Putz	97,85 kg	350,5 mm	100,24	476,05
	Modifiziert	97,85 kg	350,5 mm	100,24	476,05
F1	Fenster (2-Fach-Glas)		100,0 mm	26,47	100,74
F2	Fenster (3-Fach-Glas)		120,0 mm	32,51	123,59

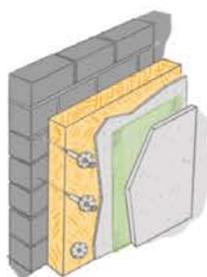
In Bezug auf die nicht genutzte zirkuläre Energie weist die Option 1b etwas bessere Eigenschaften als die Option 1c auf. Dahinter liegen die Optionen 1a und 2 sowie die modifizierten Versionen von 3a und 3b, alle in einem Bereich von 145 bis 160 kWh/m². Auch in Bezug auf die nicht zirkulär genutzte Masse stellt sich die Option 1b als am vorteilhaftesten heraus, jedoch relativ dicht gefolgt von der Option 1c und der modifizierten Option 3a.

Tabelle 20: Kurzübersicht – Zirkularität (Potenzial)

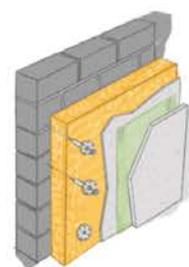
Variante	Baumaterial	Zirkularität (relativ - einzeln)	nicht zirkulär genutzte Energie (kWh/m ²)	nicht zirkulär genutzte Masse
1a	Konventionell - Mineralfaser (geklebt und gedübelt)	6,0%	147,73	54,03
1b	Eco - Holzweichfaser (geklebt und gedübelt)	82,9%	38,69	12,99
1c	Zirkulär - Mineralfaser (gedübelt - vollständig sortenrein rückbaubar)	71,4%	44,43	15,38
2	Porenbeton	13,4%	155,66	52,95
3a	Holzfaser-Einblasdämmung - Aluminium-Vorhangsfassade	24,8%	485,91	56,15
	Modifiziert	77,5%	145,60	16,82
3b	Holzfaser-Einblasdämmung - Putz	32,1%	323,30	66,45
	Modifiziert	68,5%	149,91	30,81
F1	Fenster (2-Fach-Glas)	17,8%	82,76	-
F2	Fenster (3-Fach-Glas)	18,0%	101,39	-



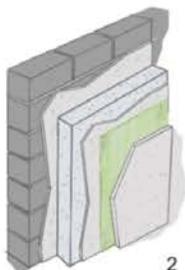
1a



1b



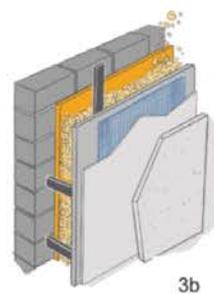
1c



2



3a



3b





3 Synthese der Ergebnisse – Darstellung der Umweltwirkungen der Fassadensanierungsoptionen auf Gebäudeebene

Für die Synthese der Ergebnisse der Analyse des Treibhauspotenzials bzw. Global Warming Potential (GWP), der Grauen Energie in Form von nicht-erneuerbarer und erneuerbarer Primärenergie (PENRE + PERE) und der Zirkularität unterschiedlicher Dämmungs-Optionen mit den Ergebnissen der Energetischen Sanierungskonzepte für das Felix-Fechenbach-Berufskolleg (FFB), das Hanse-Berufskolleg (HBK) und die Irmela-Wendt-Schule (IWS) werden die flächenspezifischen Resultate aus Teil A und die gebäudespezifischen Werte aus Teil B zusammengeführt.

Um die Ergebnisse für die Umweltwirkungen zu erhalten, müssen die Ergebnisse für die Dämmungs-Optionen pro Flächeneinheit (m²) mit den entsprechenden Bauteilflächen der Modellgebäude zusammengeführt werden.

Die nächste Tabelle 21 zeigt diesbezüglich die Bauteilflächen und zudem die zugehörigen Werte für die Wärmedurchgangskoeffizienten, die sogenannten U-Werte, welche die Wärmeleistung in Watt darstellen, die pro Grad Celsius bzw. Kelvin Temperaturunterschied auf beiden Seiten einer Wand auf der Fläche von einem Quadratmeter anliegt. Der Ist-Zustand ist farbig im Ampelsystem hervorgehoben und drückt die Relation zu den im Gebäudeenergiegesetz geforderten Werten aus. Rot hervorgehobene Werte sind hierbei weiter davon entfernt, während gelbe etwas näher liegen und grüne Werte bereits die Anforderungen erfüllen. Die Anforderungen an die U-Werte des Gebäudeenergiegesetz (GEG), der Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG) und dem Passivhausstandard sind zusätzlich aufgeführt.



Tabelle 21: Bauteilflächen und U-Werte der drei Modellgebäude

Felix-Fechenbach-Berufskolleg (FFB)

Bauteil	Fläche	U-Werte [W/m ² K]			
		Ist-Zustand	Anforderung Sanierung		
			GEG	BEG	Passivhaus
A Außenwand 25 cm	3.531 m ²	0,8	0,24	0,20	0,15
B Außenwand 8 cm	227 m ²	5,0	0,24	0,20	0,15
C Bodenplatte	6.039 m ²	1,2	0,30	0,25	0,15
D Dach EG	4.174 m ²	0,23	0,24	0,14	0,15
E Dach 3. OG	1.374 m ²	0,30	0,24	0,14	0,15
F Glasdächer	497 m ²	5,0	2,00	1,60	0,80
G Fenster	1.526 m ²	3,0	1,30	0,95	0,80
H Türen	125 m ²	3,0	1,80	1,30	0,80
Summe	17.493 m²				
davon Aussenwände und Fenster	5.284 m ²				

Hanse-Berufskolleg (HBK)

Bauteil	Fläche	U-Werte [W/m ² K]			
		Ist-Zustand	Anforderung Sanierung		
			GEG	BEG	Passivhaus
A Außenwand	604 m ²	1,0	0,24	0,20	0,15
B Bodenplatte	355 m ²	1,2	0,30	0,25	0,15
C Oberste Geschossdecke	348 m ²	1,2	0,24	0,14	0,15
D Fenster	306 m ²	3,2	1,30	0,95	0,80
E Innenwand gegen unbeheizt	70 m ²	1,7	0,30	0,25	0,15
Summe	1.683 m²				
davon Aussenwände und Fenster	910 m ²				

Irmela-Wendt-Schule (IWS)

Bauteil	Fläche	U-Werte [W/m ² K]			
		Ist-Zustand	Anforderung Sanierung		
			GEG	BEG	Passivhaus
A Bodenplatte	537 m ²	1,2	0,30	0,25	0,15
B Oberste Geschossdecke	537 m ²	0,2	0,24	0,14	0,15
C Außenwand	509 m ²	1,4	0,24	0,20	0,15
D Fenster Holzrahmen	155 m ²	2,7	1,30	0,95	0,80
E Fenster Kunststoffrahmen	34 m ²	3,0			
D Türen	20 m ²	2,7	1,80	1,30	0,15
Summe	1.791 m²				
davon Aussenwände und Fenster	697 m ²				

Da der Kreis Lippe für seine Gebäude freiwillig den Passivhausstandard umsetzt, wurden die Dämmungs-Optionen und die Betrachtung der Fenster (3-fach-Verglasung) in Teil A dieses Berichtes kohärent zu diesem Energiestandard ausgeführt. Die Umweltwirkungen wurden hierbei für die sechs verschiedenen Dämmungs-Optionen der Außenfassade (1a, 1b, 1c, 2, 3a & 3b) und für den Fenstertausch (3-fach-Verglasung) ermittelt.



Die folgende Aufzählung ruft den unter 2.1 beschriebenen Aufbau der verschiedenen Varianten noch einmal ins Gedächtnis:

- 1 a: WDVS – konventionelle verklebte und verdübelte Variante, mit Mineralfaser als Dämmmaterial (1a)
- 1 b: WDVS – Ökologische verdübelte Variante, anstatt der Mineralfaser wird eine ökologische Holzfaser als Dämmmaterial verwendet
- 1 c: WDVS – Zirkuläre verdübelte Variante mit sortenrein rückbaubarer Mineralfaser als Dämmmaterial
- 2: Porenbeton bzw. Multipor als vorgesetzte Mauerdämmung, der Schichtaufbau ähnelt hier dem WDVS-System.
- 3 a: Fassadenaufbau mit Zellulose-Einblasdämmung und einer Aluminium-Vorhangsfassade befestigt auf zementgebundener Spanplatte
- 3 b: Fassadenaufbau mit Zellulose-Einblasdämmung und mineralischem Putz auf zementgebundener Spanplatte

Aus Multiplikation der spezifischen Ergebnisse nach Dämmungs-Option bzw. Variante pro Flächeneinheit (m^2) und der Bauteilflächen für Außenfassaden, zuzüglich Fensterfläche und spezifische Ergebnisse für Dreifach-Glas-Fenster, können so die Ergebniswerte für die Umweltwirkungen der Fassaden-Sanierung der Modellgebäude berechnet werden.

Bezüglich der physischen Ausmaße der betrachteten Fassaden verfügt das HBK über rund 20 % mehr Fläche als die IWS, das FFB liegt sogar um mehr als den Faktor 7 darüber. Bezüglich der Fenster liegt das HBK sogar 60 % über dem Flächenwert für die IWS, während das FFB etwa um Faktor 8 darüber liegt. Diese Verhältnisse spiegeln sich so auch in den absoluten Zahlen für die Umweltwirkungen wider.

Die nächste Tabelle 22 zeigt diesbezüglich die Graue Energie als Primärenergieaufwand pro Dämmungs-Option (PENRE + PERE) unter Buchstabe A, außerdem den Anteil des Primärenergieaufwands davon, welcher keinem Recycling-Szenario unterliegt und damit nicht zirkulär genutzt wird, ausgedrückt als „Primärenergie – nicht zirkulär genutzt [kWh]“, unter Buchstabe B – sowie den Umweltindikator Treibhausgaspotenzial bzw. Global



Warming Potential (GWP) unter Buchstabe C, jeweils für jedes der drei Modellgebäude.

Tabelle 22: Umweltwirkungen der Dämmungs-Optionen im Kontext der Modellgebäude

Gebäude	Umweltindikator	Option								Fenster F (3xGlas)
		Fassaden-Dämmung								
		1a	1b	1c	2	3a	3b	3a (mod.)	3b (mod.)	
FFB	A Primärenergie [kWh]	590.671	847.766	583.548	675.795	2.429.545	1.788.863	2.429.545	1.788.863	188.650
	B Primärenergie - nicht zirkulär genutzt [kWh]	555.110	145.385	166.961	584.912	1.825.919	1.214.852	547.106	563.309	154.773
	C GWP [kg CO ₂]	157.991	111.930	155.993	189.962	487.611	376.665	487.611	376.665	49.626
HBK	A Primärenergie [kWh]	94.980	136.321	93.835	108.668	390.671	287.649	390.671	287.649	37.767
	B Primärenergie - nicht zirkulär genutzt [kWh]	89.262	23.378	26.847	94.054	293.608	195.348	87.975	90.580	30.985
	C GWP [kg CO ₂]	25.405	17.998	25.084	30.546	78.408	60.568	78.408	60.568	9.935
IWS	A Primärenergie [kWh]	80.011	114.836	79.046	91.541	329.100	242.315	329.100	242.315	23.268
	B Primärenergie - nicht zirkulär genutzt [kWh]	75.194	19.693	22.616	79.231	247.334	164.561	74.110	76.304	19.089
	C GWP [kg CO ₂]	21.401	15.162	21.130	25.732	66.051	51.022	66.051	51.022	6.121
Zirkularität der jeweiligen Option = 1 - (B / A)		6,0%	82,9%	71,4%	13,4%	24,8%	32,1%	77,5%	68,5%	18,0%

Die Tabelle 22 bringt zudem zum Ausdruck, dass vor allem die Fassaden-Dämmungs-Optionen 1b und 1c sich als relativ vorteilhaft erweisen. Während die Option 1c die geringsten Primärenergieaufwendungen nach sich zieht, schneidet die Recyclingfähigkeit bzw. der Anteil der nicht zirkulär genutzten Primärenergie bei der Option 1b am besten ab. Auch bei den Auswirkungen bezüglich des GWP hat die Option 1b den besten Wert vorzuweisen.

Dahinter folgen die Optionen 1a und 2, wobei sich die Option 2 hierbei noch leicht hinter der Option 1a einordnet. Die Optionen 3a und 3b sind dagegen aufgrund der relativ hohen Masse und der hohen Umweltauswirkungen einiger verwendeter Baustoffe weniger vorteilhaft. Hierbei wurde jedoch noch nicht berücksichtigt, ob die Optionen 3a und 3b gegebenenfalls vollständig wiederverwendbar sind. Stattdessen wurde für die Berechnungen das angegebene Niveau der Recyclingfähigkeit aus der OBD übernommen. Eine Bewertung unterschiedlicher Wertigkeiten von Zirkularität, wie die direkte Wiederverwendung für gleiche Zwecke, Wiederverwendung im Downcycling, Wiederverwertung mit hohem oder niedrigem Recyclingaufwand, etc. findet hierbei, aufgrund von fehlendem allgemeinem Regelwerk, (noch) nicht statt.

Zusätzlich aufgeführt sind die Optionen 3a (mod.) und 3 b (mod.). Hierbei handelt es sich um modifizierte Varianten der Optionen 3a und 3b, für welche die Annahmen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit für die Baustoffe mit den



größten Umweltwirkungen durch Werte von 70 % (Furnierschichtholz und zementgebundene Spanplatte) bzw. 95 % (Aluminiumblech) ersetzt wurden.

Der Wert von 95 % findet sich hierbei in entsprechenden Quellen zum Aluminiumrecycling im Bauwesen wieder, während die Werte von 70 % mit dem Technischen Gebäudemanagement im Kreis Lippe als ggf. max. ansetzbarer Wert für die entsprechenden Baumaterialien oder geeignete Substitute eruiert wurde.

Durch diese Annahmen werden die Optionen 3a und 3b hinsichtlich der zirkulär genutzten Energie mit den Optionen 1a, 1c und 2 konkurrenzfähig. Die, relativ gesehen, sehr guten Werte der Optionen 1b und 1c werden dabei jedoch nicht erreicht.

Aus den Unterschieden der U-Werte (siehe Tabelle 21) lässt sich bereits das jeweilige theoretische Einsparpotenzial erahnen, welches durch Sanierung erreicht werden kann. Dieses ergibt sich aus der Differenz der Bauteil-U-Werte hochgerechnet auf die Bauteilflächen in Kenntnis der zeitraumabhängigen Temperaturunterschiede, hauptsächlich bedingt durch die Jahreszeiten, zwischen Innen- und Außenflächen und dem Heizverhalten.

Der Grad der Abdeckung der betrachteten Bauteilflächen liegt hierbei zwischen etwa 30 % (FFB) und fast 55 % (HBK), die IWS liegt mit rund 40 % in zwischen FFB und IWS.

Da gerade die Außenwände und die Fenster einen relativ hohen Unterschied der U-Werte zwischen Ist-Zustand und Passivhausstandard aufweisen, liegt das bauteilbezogene Einsparpotenzial jedoch höher. Werden die U-Wert-Unterschiede miteinbezogen, so ergeben sich Werte zwischen mehr als 40 % (FFB) und rund 60 % (HBK und IWS). Es lässt sich vermuten, dass das tatsächliche Einsparpotenzial unterdessen noch höher liegen könnte. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass nicht alle Bauteile oberhalb der Geländeoberkante liegen (z. B. Bodenplatte) und im Erdreich im Winter mildere Temperaturen (Erdwärme in etwa in Höhe der Jahresdurchschnittstemperatur) vorherrschen und hier ggf. weniger geheizt werden muss um innen die notwendige Mindesttemperatur zu erreichen und



folglich weniger Energie durch die entsprechenden Bauteile hindurch verloren geht.

Genauere Werte lassen sich hier nur über Modellsimulationen ermitteln, welche die jahreszeitlich bedingten unterschiedlichen Temperaturen, welche an den Bauteilen anliegen, und das dazugehörige Heizverhalten, simulieren.

Durch diese Simulationen, welche im Nachgang zur Modellierung vollzogen wurden, lässt sich der Anteil der Transmissionswärmeverluste, welche auf Außenfassaden und Fenster entfallen beim FFB auf 53 %, beim HBK auf 69 % und bei der IWS auf 67 % festlegen. Dies bedeutet wiederum, dass nur mit der Betrachtung der Außenfassaden und der Fenster bereits die Hälfte bis über Zweidrittel der thermischen Einsparpotenziale abgedeckt werden können. Gleichzeitig sind energieeffiziente Aufwertungen dieser Bauteile in Bestandsgebäuden auch wirtschaftlich eher zu realisieren als z. B. eine nachträgliche Dämmung der Bodenplatte.

Die Simulationen zeigen zudem, dass hohe Mengen an Endenergie eingespart werden können (siehe Tabelle 23). Beim FFB handelt es sich um beinahe 1.000.000 kWh. Beim HBK sind es noch knapp 190.000 kWh während es sich bei der IWS noch um etwas weniger als 130.000 kWh handelt.

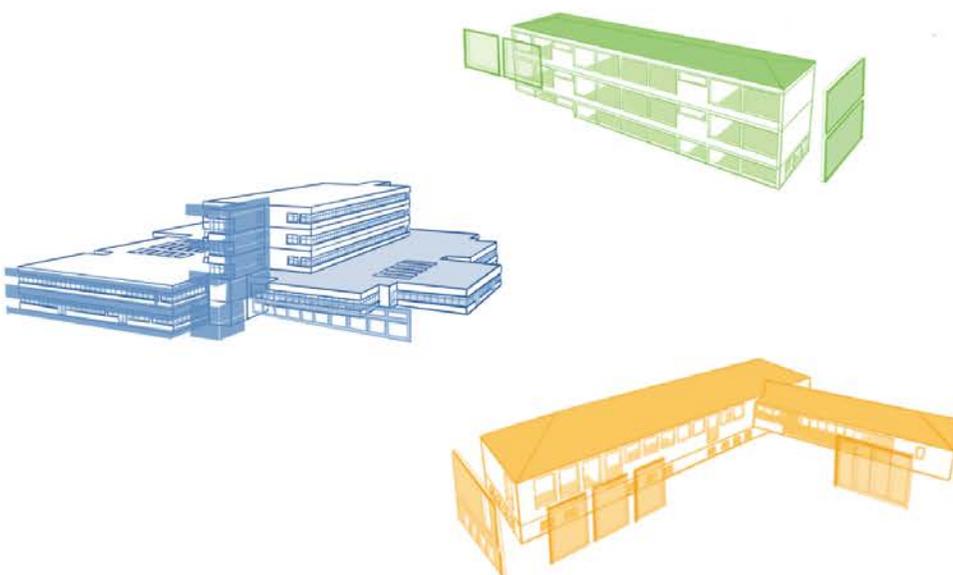




Tabelle 23: Prognostische Endenergie-Einsparungen bei den Modellgebäuden nach Bauteilen

Einzelmaßnahmen an der thermischen Gebäudehülle (FFB)		Einsparungen	
		Endenergie	
		[kWh/a]	relativ
1	Dämmung Außenwand	256.800	13%
2	Austausch Türen/Glasdächer	227.800	12%
3	Austausch Fenster	282.700	14%
4	Dämmung Dach	49.700	3%
5	Dämmung Bodenplatte	169.100	9%
Summe		986.100	50%
Dämmung Außenwand & Austausch Fenster		539.500	28%

Einzelmaßnahmen an der thermischen Gebäudehülle (HBK)		Einsparungen	
		Endenergie	
		[kWh/a]	relativ
1	Dämmung oberste Geschossdecke	32.406	11%
2	Dämmung Außenwand	45.639	16%
3	Austausch Fenster	79.019	28%
4	Dämmung Innenwand gegen unbeheizt	8.872	3%
5	Dämmung Bodenplatte	20.156	7%
Summe		186.092	65%
davon Außenwand und Fenster		124.658	43%

Einzelmaßnahmen an der thermischen Gebäudehülle (IWS)		Einsparungen	
		Endenergie	
		[kWh/a]	relativ
1	Dämmung Außenwand	56.088	24%
2	Austausch Fenster	37.294	16%
3	Austausch Türen	3.813	2%
4	Dämmung Bodenplatte	29.741	13%
Summe		126.936	55%
davon Außenwand und Fenster		93.382	40%

Auf die beiden betrachteten Bauteile Außenfassade und Fenster entfallen hierbei auf das FFB rund 540.000 kWh, auf das HBK rund 120.000 kWh und auf die IWS rund 90.000 kWh.



Betrachtet man die potenziellen Einsparungen zusätzlich zu den bereits gezeigten Umweltwirkungen und setzt diese ins Verhältnis zu den Ressourcenparametern für die Graue Energie, so ist es möglich eine primärenergetische Amortisation zu berechnen.

Die folgende Tabelle 24, welche auf der Tabelle 22 aufbaut und diese ergänzt, zeigt diesbezüglich die entsprechenden Werte für die jeweiligen Dämmungs-Option, etwa in der Mitte einer gedachten horizontalen Achse, und das jeweilige Modellgebäude in der Einheit Jahre (a) unter den Buchstaben D und E im linken Bereich der Abbildung auf einer gedachten vertikalen Achse.



Tabelle 24: Ergebnisse der Umweltwirkung und Zirkularität für die Modellgebäude

Gebäude	Umweltindikator	Option									Transmissionswärmeverluste der Außenfassade und Fensterfläche im Verhältnis zu den gesamten Transmissionswärmeverlusten
		Fassaden-Dämmung								Fenster F (3xGlas)	
		1a	1b	1c	2	3a	3b	3a (mod.)	3b (mod.)		
FFB	A Primärenergie [kWh]	590.671	847.766	583.548	675.795	2.429.545	1.788.863	2.429.545	1.788.863	188.650	Status Quo: 53 % (mögliche Einsparungen: ca. 540.000 kWh/a)
	B Primärenergie - nicht zirkulär genutzt [kWh]	555.110	145.385	166.961	584.912	1.825.919	1.214.852	547.106	563.309	154.773	
	C GWP [kg CO ₂]	157.991	111.930	155.993	189.962	487.611	376.665	487.611	376.665	49.626	
	D Energetische Amortisation nach A	2,30 a	3,30 a	2,27 a	2,63 a	9,46 a	6,97 a	9,46 a	6,97 a	0,67 a	
	E Energetische Amortisation nach B	2,16 a	0,57 a	0,65 a	2,28 a	7,11 a	4,73 a	2,13 a	2,19 a	0,55 a	
HBK	A Primärenergie [kWh]	94.980	136.321	93.835	108.668	390.671	287.649	390.671	287.649	37.767	Status Quo: 69 % (mögliche Einsparungen: ca. 120.000 kWh/a)
	B Primärenergie - nicht zirkulär genutzt [kWh]	89.262	23.378	26.847	94.054	293.608	195.348	87.975	90.580	30.985	
	C GWP [kg CO ₂]	25.405	17.998	25.084	30.546	78.408	60.568	78.408	60.568	9.935	
	D Energetische Amortisation nach A	2,08 a	2,99 a	2,06 a	2,38 a	8,56 a	6,30 a	8,56 a	6,30 a	0,48 a	
	E Energetische Amortisation nach B	1,96 a	0,51 a	0,59 a	2,06 a	6,43 a	4,28 a	1,93 a	1,98 a	0,39 a	
IWS	A Primärenergie [kWh]	80.011	114.836	79.046	91.541	329.100	242.315	329.100	242.315	23.268	Status Quo: 67 % (mögliche Einsparungen: ca. 90.000 kWh/a)
	B Primärenergie - nicht zirkulär genutzt [kWh]	75.194	19.693	22.616	79.231	247.334	164.561	74.110	76.304	19.089	
	C GWP [kg CO ₂]	21.401	15.162	21.130	25.732	66.051	51.022	66.051	51.022	6.121	
	D Energetische Amortisation nach A	1,43 a	2,05 a	1,41 a	1,63 a	5,87 a	4,32 a	5,87 a	4,32 a	0,62 a	
	E Energetische Amortisation nach B	1,34 a	0,35 a	0,40 a	1,41 a	4,41 a	2,93 a	1,32 a	1,36 a	0,51 a	
Zirkularität der jeweiligen Option = 1 - (B / A)		6,0%	82,9%	71,4%	13,4%	24,8%	32,1%	77,5%	68,5%	18,0%	

LEGENDE - X-Achse	
Zeichenkürzel	Kurzbeschreibung
1a	WDVS konventionell - Mineralfaser (geklebt und gedübelt)
1b	WDVS eco - Holzweichfaser (geklebt und gedübelt)
1c	WDVS zirkulär - Mineralfaser (gedübelt - vollständig sortenrein rückbaubar)
2	Porenbeton
3a	Holzfasen-Einblasdämmung - Aluminium-Vorhangfassade
3b	Holzfasen-Einblasdämmung - Putz
F (2xGlas)	Fenster pro m ² (2-Fach-Glas)
F (3xGlas)	Fenster pro m ² (3-Fach-Glas)

LEGENDE - Y-Achse	
Bezeichnung	Kurzbeschreibung
A Primärenergie [kWh]	Graue Energie, welche in Zusammenhang mit dem Lebenszyklus aufgewendet werden muss.
B Primärenergie - nicht zirkulär genutzt	Anteil der aufgewendeten Grauen Energie, welche in Zusammenhang mit dem Lebenszyklus aufgewendet werden muss und keinem Recycling-Szenario unterliegt.
C GWP [kg CO ₂]	CO ₂ -Emissionen, welche in Zusammenhang mit dem Lebenszyklus entstehen.
D Energetische Amortisation nach A	Das Ergebnis der Division von Grauer Energie, welche im Zusammenhang mit dem Lebenszyklus aufgewendet werden muss, und der erreichbaren Energieeinsparung p.a.
E Energetische Amortisation nach B	Das Ergebnis der Division von dem Teil der Grauen Energie (A), welcher keinem Recycling-Szenario unterliegt, und der erreichbaren Energieeinsparung p.a.



Während sich die Optionen 1b und 1c, energetisch gesehen, genau wie der Austausch der Fenster durch 3-Fach-Glas-Modelle, in extrem kurzer Zeit amortisieren, so ist die Amortisationszeit für die Optionen 1a, 2, 3a (mod.) und 3b (mod.) immer noch sehr gut, wobei die Aussage für die beiden letzteren lediglich in Bezug auf das Verhältnis zum nicht zirkulär genutzten Primärenergieanteil zutrifft. Die Varianten 3a und 3b weisen, mit knapp sieben Jahren – ebenfalls bezogen auf den nicht zirkulär genutzten Anteil des Primärenergieaufwands – bis zu knapp zehn Jahren – bezogen auf den Primärenergieaufwand – beim FFB, die höchsten energetischen Amortisationszeiten auf. Bei einer geschätzten Haltbarkeit von Außen-Vorhangfassaden von 30, 40 oder mehr Jahren, ist eine energetische Amortisation in jedem Fall jedoch trotzdem bei Weitem gewährleistet. Erreicht werden diese guten bis exzellenten Werte aber auch nicht zuletzt aufgrund der bisher insgesamt eher schlechten Dämmungssituation für die Gebäude und den gleichzeitig hohen Ansprüchen der Erreichung des Passivhausstandards im Falle der Sanierung. An dieser Stelle soll auch noch einmal kurz auf Tabelle 21 verwiesen werden, welche zeigt, dass lediglich das Dach im EG des FFB, und die oberste Geschossdecke der IWS bereits den aktuellen Anforderungen des GEG genügen würden. Bis auf die Türen und die Dachdämmung im 3. OG des FFB, welche wenigstens noch in die Nähe der GEG-Werte kommen, liegen darüber hinaus sämtliche U-Werte der weiterhin genannten Bauteile weit weg von den Werten des GEG, der BEG oder gar des Passivhausstandards.

Mit diesem Fazit und Überblick schließt der vorliegende Meilensteinbericht, welcher die Betrachtung der Umweltwirkungen der Modellgebäude bzw. im Speziellen des Treibhauspotenzials, der Primärenergie und der Recyclingfähigkeit bzw. der Zirkularität der Bestandsgebäude und verschiedener Gebäude-Dämmungs-Optionen zum Gegenstand hatte, ab.

Die im folgenden Anhang befindlichen Berichte stellen die Vorarbeiten zu den Arbeiten aus diesem Meilensteinbericht dar und befassen sich detailliert mit der energetischen Sanierung zum Zwecke der Betriebsenergieeinsparung.



Anhang – Energetische Sanierungskonzepte der drei Modellgebäude

- **Felix-Fechenbach Berufskolleg (FFB) in Detmold**
- **Hanse-Berufs-Kolleg (HBK) in Lemgo**
- **Irmela-Wendt-Schule (IWS) in Lage**