Ganzheitliche Bewertung von verschiedenen Dämmstoffalternativen

Endbericht

Forschungsprojekt, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (AZ 34426_01)
und dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Joachim Reinhardt, Corvin Veith, Julia Lempik, Florian Knappe, Peter Mellwig, Jürgen Giegrich, Nadine Muchow (ifeu)
Thomas Schmitz, Ilka Voß (natureplus)

Heidelberg / Neckargemünd, 2019

ifeu Im Weiher 10 D - 69121 Heidelberg Telefon +49 (0)6 221. 47 67 - 0 Telefax +49 (0)6 221. 47 67 - 19 E-Mail ifeu@ifeu.de www.ifeu.de

06/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Az	**34426_01**		

Antragstitel	**Ganzheitliche Bewertung von verschiedenen Dämmstoffalternativen**
Stichworte	Dämmstoffe; Ökobilanzierung; Entsorgung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
17 Monate	**01.05.2018**	**15.11.2019**	**1**

Zwischenberichte 1

Bewilligungsempfänger ifeu-Institut gGmbH
natureplus e.V.

Tel 06221 4767-0
Fax 06221 4767-19

Projektleitung
Florian Knappe

Bearbeiter
Joachim Reinhardt, Corvin Veith, Julia Lempik, Florian Knappe, Peter Mellwig, Jürgen Giegrich, Nadine Muchow (ifeu); Thomas Schmitz, Ilka Voß (natureplus)

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Mit dieser Studie wurde eine umfassende ökologische Bewertung von Dämmstoffalternativen insbesondere im Hinblick auf mögliche zukünftige Entsorgungswege der Dämmstoffe (von der „Wiege bis zur Bahre“) durchgeführt. Die Bewertung erfolgte für die gängigsten Dämmstofftypen im Baubereich, auf Basis mineralischer, synthetischer sowie nachwachsender Rohstoffe. Viele Entsorgungsoptionen der unterschiedlichen Dämmstoffe wurden erstmals aufgezeigt und modelliert. Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von Dämmstoffen erfolgte die Bilanzierung differenziert nach unterschiedlichen Anwendungsgebieten.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im ersten Schritt erfolgte die Auswahl der zu vergleichenden Dämmstoffe anhand gängiger marktrelevanter Dämmstofftypen. Anschließend wurden die Anforderungen bezüglich Kälte- und Wärmeschutz in unterschiedlichen Bauteilen festgelegt. Aus diesen Festlegungen ließen sich die Massen für die unterschiedlichen Dämmstoffe benennen, die jeweils zur Erfüllung dieser Funktion benötigt werden und die die zentrale Ausgangsgröße für den ökologischen Vergleich sind.

Die Produktionsdaten der Dämmstoffe zur ökologischen Bewertung wurden nach der Recherche verschiedener Datenbanken vom Institut für Bauen und Ökologie GmbH Wien übernommen. Parallel wurden mögliche Entsorgungswege aller Dämmstoffarten sowie der damit verbundene Aufwand und Nutzen eruiert. Dies stellte die Basis (Sachbilanz) der Ökobilanzen dar.

Für alle Entsorgungswege wurden im Nachgang die Ökobilanzen (Abfallökobilanzen) erstellt, in welcher neben den Aufbereitungslasten auch der unterschiedliche Nutzen durch die dadurch erzeugten Sekundärprodukte bzw. Energie quantifiziert wurden. Für jeden Dämmstoff erfolgte eine Ermittlung der aus ökologischer Sicht günstigsten Entsorgungsoption. Diese Entsorgungsoptionen wurden in die Produktökobilanzen nach der EN 15804 einbezogen. Zusätzlich erfolgte eine Erstellung von Produktökobilanzen nach dem 50:50-Ansatz, da nach der EN 15804 der Nutzen aus der Entsorgung nur informatorisch ausgewiesen und nicht eingerechnet wird. Im 50:50 Ansatz wurde der Nutzen aus der Entsorgung hälftig mit angerechnet und die endgültige Beseitigung des Dämmstoffmaterials berücksichtigt. Die Dämmstoffe wurden sowohl über die Ergebnisse nach der jeweils besten Entsorgungsoption als auch nach einer Beseitigung wie im Status Quo verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Aus den Abfallökobilanzen aller Dämmstoffe zeigen sich in den meisten Fällen die spezifischen Vorteile einer stofflichen Verwertung und damit der Sinn einer Rückführung der Abfallmassen in den Wirtschaftskreislauf. Eine Ausnahme bildet der Einsatz von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen in Zementwerken. Dies ist aus Sicht des Klimaschutzes vorteilhaft, solange dort stattdessen Steinkohle verfeuert wird. Insbesondere die stoffliche Verwertung von synthetischen und manchen mineralischen Dämmstoffen haben Vorteile.

Die Produktökobilanzen zeigen folgende Ergebnisse, wenn eine vom Status Quo abweichende stoffliche **Verwertung** der Dämmstoffe am Lebensende erfolgt:

- Für die Bauteile, in denen alle Dämmstofftypen eingesetzt werden können, schneiden Holzfasereinblasdämmung und Hanf- sowie Jutematten am besten ab, solange Hanf- und Jutematten auf Restbiomasse bzw. sekundäre Rohstoffe zurückgreifen können. Darauf folgen Zelluloseeinblasdämmstoff, EPS-Platten und Holzmatten und darauf die weiteren Dämmstoffe in Platten- und Mattenform (PU-, XPS-Platten, trocken produzierte Holzfaserdämmplatten, Mineralfaserplatten (Steinwolle), Glaswollematten, Mineralschaumplatten).
- In den Bauteilen, in denen nur Dämmstoff - Platten eingesetzt werden können, schneidet EPS damit am vorteilhaftesten ab, gefolgt von den weiteren o.g. Dämmstoffen in Plattenform. Voraussetzung dafür ist, dass EPS derart stofflich verwertet wird, dass in einer Folgeanwendung EPS-Kügelchen eingespart werden und dass EPS im Bauteil eingesetzt werden kann.

Wenn die **Entsorgung wie im Status Quo** stattfindet und der energetische Nutzen angerechnet wird, verbessern sich Holzfaserdämmplatten relativ und verschlechtern sich EPS-Platten:

- EPS-Platten und trocken produzierte Holzfaserdämmplatten sind dann in der Bewertung ähnlich zwischen den besseren nicht-plattenförmigen Dämmstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen und einer schlechteren Gruppe aus den o.g. weiteren Dämmstoffen in Platten- und Mattenform sowie nass produzierten Holzfaserdämmplatten anzusiedeln. EPS-Platten haben dann im Treibhauseffekt und fossilem kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) etwas schlechtere Werte auch als Mineralfaserplatten (Steinwolle) und teilweise Glaswollematten. Der (zukünftige) energetische Nutzen aus der Verbrennung der Dämmstoffe wird ggf. überschätzt, weil dafür u.a. der aktuelle deutsche Netzstrommix zugrunde gelegt wird.

Ohne Anrechnung des energetischen Nutzens verschlechtern sich EPS- und Holzfaserdämmplatten:

- Trocken produzierte Holzfaserdämmplatten sind nicht mehr und EPS-Platten kaum besser als die weiteren o.g. Dämmstoffe in Platten- und Mattenform. EPS-Platten haben im Treibhauseffekt und KEA fossil schlechtere Werte als Mineralfaserplatten (Steinwolle) und Glaswollematten.

Aufgrund der Anrechnung des Nutzens liefert der 50:50-Ansatz im Vergleich zur EN 15804 für Dämmstoffe aus primärem Material bessere Ergebnisse. Dies betrifft insbesondere die synthetischen Dämmstoffe, Mineralschaum-, Schaumglasplatten und nass produzierte Holzfaserdämmplatten, bei denen der Nutzen aus der Entsorgung eine größere Rolle spielt. Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen, die nicht stoffgleich verwertet werden, verschlechtern sich hingegen. Für die stoffliche Verwertung synthetischer Dämmstoffe ergibt sich gleichzeitig eine Verschlechterung durch die hälftige Anlastung der endgültigen Beseitigung in der MVA, wobei der fossile Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid freigesetzt wird.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Auswahl der Dämmstoffe, die bezüglich Kälte- und Wärmeschutz zu stellenden Anforderungen, die Methodik zur ökologischen Bewertung und die Ergebnisse wurden auf drei Projektbeiratstreffen zu Beginn, in der Mitte und zum Ende des Projektzeitraums diskutiert und verifiziert. Im Projektnachgang werden die Ergebnisse auf entsprechenden Symposien vorgestellt werden.

Fazit

Neben der Produktion hat die Entsorgung und potenziell mögliche Wiederverwertung von Dämmstoffen insbesondere bei synthetischen und manchen mineralischen Dämmstoffen einen deutlich positiven Einfluss auf deren Produktökobilanz. Die stoffliche Verwertung der Dämmstoffe mittels Rückführung in die Produktion oder als Sekundärrohstoffe wird in der Praxis erst vereinzelt oder zu Forschungszwecken praktiziert. Daher sollte die Forschung und Entwicklung möglicher stofflicher Verwertungen in der Industrie und im Bereich der Abfallentsorgung vorangetrieben werden.

Damit sollte auch die zugehörige Datenlage verbessert werden. In dieser Studie mussten Annahmen getroffen werden, die zu Unsicherheiten der Ergebnisse führen.
Im Ergebnis zeigen sich Vorteile für die nicht-plattenförmigen Dämmstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen, wenn genügend Restbiomasse vorhanden ist. Unter den plattenförmigen Dämmstoffen ergeben sich leichte Vorteile für EPS-Platten, wenn diese im Bauteil eingesetzt werden können, und in manchen Bauteilen für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten. Diese leichten Vorteile hängen aber davon ab, ob eine stoffliche Verwertung aller Dämmstoffe stattfindet (dann keine Vorteile für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten) oder eine Entsorgung wie im Status Quo erfolgt (leichte Vorteile für EPS-Platten werden dann noch kleiner) und ob der energetische Nutzen aus der Beseitigung in der MVA angerechnet wird (ohne Anrechnung kaum noch Vorteile für EPS-Platten, keine Vorteile für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten).
Die angesetzten Produktionsdaten bilden die aktuell schlechteren Fälle ab und sind als entsprechend konservativ zu bewerten. Mit Produktionsdaten aus anderen Datenbanken können auch in Abhängigkeit vom Produktionsstandort insbesondere für energieintensive Prozesse andere Ergebnisse herauskommen. Für Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen und Restbiomassen würde die Bewertung hingegen schlechter ausfallen, wenn diese Rohstoffe nicht zur Verfügung stehen. Die Produktionsdaten müssen fortlaufend aktualisiert und an die Randbedingungen angepasst werden. Eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Daten sollte gegeben sein.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis **9**
Tabellenverzeichnis **18**
Abkürzungsverzeichnis/Glossar **20**

Zusammenfassung **22**

1 Einleitung **24**

2 Verwendung der Dämmstoffe in den einzelnen Bauteilen **26**
2.1 Vorgehensweise 26
2.2 Nutzengleichheit: Sommerfall 27
2.2.1 Sommerlicher Wärmeschutz in der Normung 27
2.2.2 Literaturrecherche 28
2.2.3 Simulation 29
2.2.4 Einsatz von Dämmung für den sommerlichen Wärmeschutz 31
2.3 Nutzengleichheit: Winterfall 32
2.3.1 Anforderungen 32
2.3.2 Berechnung 33
2.4 Zusammenführung der Nutzengleichheit in Sommer und Winter 34
Ansatz zur Berechnung 34
2.5 Ergebnisse 34

3 Dämmstoffe - Prozessdaten **40**
3.1 Die Produktion der Dämmstoffe 40
3.2 Dämmstoffe – Einsatz und Rückbau 43
3.2.1 Lose (trocken) 44
3.2.2 Mechanisch (trocken) 44
3.2.3 Verklebt (nass) 45
3.3 Aktuelle Entsorgungswege 46
3.3.1 Müllverbrennungsanlage (MVA) 46
3.3.2 Einsatz im Zementwerk 49
3.3.3 Biomasseheizkraftwerk 49
3.3.4 Deponie 49
3.3.5 Herstellung von Baustoffen 50
3.3.6 Rückführung in den Herstellungsprozess 51
3.4 Mögliche zukünftige Entsorgungswege 52
3.4.1 Rückführung in den Herstellungsprozess 52

Inhalt

3.4.2 Herstellung von Sekundärrohstoffen 60
3.4.3 Herstellung von Pflanzenkohle |Zellulose- / Holzfasereinblasdämmung 63
3.5 Ökobilanzdaten für die Abbildung der Entsorgungswege 64
3.6 Belastbarkeit der Daten zu den Entsorgungswegen 64
3.7 Rahmenbedingungen der Kreislaufwirtschaft 65

4 Methodik Ökobilanzierung 67
4.1 Abfallökobilanzen und Bilanzrahmen 67
4.2 Produktökobilanzen und Bilanzrahmen 68
4.2.1 Darstellung der Methoden 69
4.2.2 Einordnung der betrachteten Methoden in die hier vorzunehmende ökologische Bewertung verschiedenster Dämmstoffe und Fazit 72
4.2.3 Umgang mit biogenem Kohlenstoff 74
4.3 Charakterisierung und Interpretation 75
4.4 Betrachtete Szenarien und Prozesse 76

5 Entsorgung der Dämmstoffalternativen aus ökologischer Sicht - Abfallökobilanz 79
5.1 Entsorgungsoptionen für den Zellulosedämmstoff 80
5.2 Entsorgungsoptionen für den Hanfdämmstoff 83
5.3 Entsorgungsoptionen für den Jutedämmstoff 85
5.4 Entsorgungsoptionen für die Holzfasereinblasdämmung 87
5.5 Entsorgungsoptionen für die Holzfasermatten 89
5.6 Entsorgungsoptionen für Holzfaserdämmplatten 91
5.7 Entsorgungsoptionen für Mineralfaserplatten (Steinwolle) 94
5.8 Entsorgungsoptionen für die Glaswolle 97
5.9 Entsorgungsoptionen für die Schaumglasplatte 99
5.10 Entsorgungsoptionen für die Mineralschaumplatte 101
5.11 Entsorgungsoptionen für EPS-Platten 103
5.12 Entsorgungsoption für XPS-Platten 105
5.13 Entsorgungsoptionen für PU-Platten 107
5.14 Beste Entsorgungswege nach der Abfallökobilanz 109

6 Ganzheitliche Bewertung der Dämmstoffalternativen 111
6.1 Nach der EN 15804-Methode 111
6.1.1 Bedeutung von Rückbau und Reinheit für das Ergebnis 111

Inhalt

6.1.2 Beste Entsorgungswege nach der EN 15804 112
6.1.3 Ergebnisse für das Steildach 113
6.1.4 Ergebnisse für die Außenwand 119
6.1.5 Ergebnisse für die weiteren Bauteile und Fazit 124
6.2 Nach dem 50:50-Ansatz 126
6.2.1 Beste Entsorgungswege nach dem 50:50-Ansatz 126
6.2.2 Ergebnisse für das Steildach 127
6.2.3 Ergebnisse für die Außenwand 136
6.2.4 Ergebnisse für die weiteren Bauteile 141

7 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung 144

Literaturverzeichnis 148

8 Anhang 1
8.1 Vergleich der Entsorgungswege nach verschiedenen Methoden 1
8.2 Treibhauseffekt mit biogenen Kohlenstoffflüssen 5
8.2.1 EN 15804 5
8.2.2 50:50-Ansatz 6
8.3 Nutzen aus den Entsorgungswegen und deren Anrechnung in den betrachteten Methoden 7
8.4 Überblick über die betrachteten Entsorgungswege 12
8.5 Ergebnisse für Steildach und Außenwand in Tabellenform 14
8.5.1 EN 15804 14
8.5.2 50:50-Ansatz 15
8.6 Ergebnisse für die weiteren Bauteile nach der EN 15804 17
8.7 Ergebnisse für die weiteren Bauteile nach dem 50:50-Ansatz 25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Zur Ermittlung der Nutzengleichheit der Dämmstoffe überprüfte Parameter (dunkelgrün: detailliert betrachtet) 26

Abbildung 2-2: Einflussparameter auf den Sonneneintragskennwert der DIN 4108-2 28

Abbildung 2-3: Einflussparameter auf Kühllast und Raumtemperatur nach VDI 2078 28

Abbildung 2-4: Schema des hypothetischen Raumes zur Berechnung der erforderlichen Dämmstärke 29

Abbildung 2-5: Musterberechnungen für einen Raum aus Dämmstoff (TheSim 3D) 30

Abbildung 2-6: Musterberechnungen für einen Raum aus Dämmstoff – angepasst auf die max. Temperatur 23 °C (TheSim 3D) 30

Abbildung 2-7: Erforderliche Dämmstoffdicke für einen U-Wert von 0,2 W/m²*K und entsprechende Raumtemperatur im Sommer sowie erforderliche Dämmstärke und -masse für eine maximlale Innentemperatur von 26 °C 31

Abbildung 2-8: Die betrachteten Bauteile und die dafür verwendeten Dämmstoffe; verklebt (v) = Dämmstoffe werden in diesem Bauteil verklebt eingesetzt 33

Abbildung 2-9: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für Außenwände mit Wärmedämmverbundsystem 35

Abbildung 2-10: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für leichte Außenwände (Holzständerbauweise) 35

Abbildung 2-11: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für Steildächer 36

Abbildung 2-12: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für leichte Flachdächer 36

Abbildung 2-13: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für schwere Flachdächer 37

Abbildung 2-14: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für leichte oberste Geschossdecken 37

Abbildung 2-15: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für schwere oberste Geschossdecken 38

Abbildung 2-16: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für Kellerdecken mit Dämmung von unten 38

Abbildung 2-17: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für Kellerwände mit Dämmung von außen (Perimeter) 39

Abbildung 3-1: Übersicht zur Rückbaubarkeit und dem damit verbundenen Massenverlust der betrachteten Dämmstoffe 46

Abbildung 3-2: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Mineralfaserplatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebautem Mineralfaserdämmstoff 52

Abbildung 3-3: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Holzfaserplatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebautem Holzfaserdämmstoff 54

Abbildung 3-4:Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Zelluloseeinblasdämmung unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebauter Zelluloseeinblasdämmung 55

Abbildung 3-5: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Hanf- und Jutedämmmatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebautem Hanf- und Jutedämmstoff 56

Abbildung 3-6: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Glaswolledämmmatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebautem Glaswolledämmstoff 57

Abbildung 3-7: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Mineralschaumdämmplatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebauter Mineralschaumdämmung 58

Abbildung 3-8: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Schaumglasplatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebauten Schaumglasplatten 59

Abbildung 3-9: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von EPS Dämmplatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebautem EPS Dämmstoff 60

Abbildung 4-1: Bilanzrahmen einer Abfallökobilanz; Vergleich verschiedener Verwertungswege 68

Abbildung 4-2: Separate Produktion von Holzmatten (HF) und Holzformteilen ohne stoffliche Verwertung der Holzmatten in Holzformteilen mit anschließender Entsorgung in der MVA 70

Abbildung 4-3: Kopplung der Produktion von Holzmatten (HF) über stoffliche Verwertung mit der Produktion von Holzformteilen; Aufteilung der jeweiligen Produktionslasten nach der Methodik der EN 15804 (Cut-Off-Ansatz) 70

Abbildung 5-1: Erläuterung zur Darstellung der Ergebnissen aus der Abfallökobilanz; Z = Zelluloseeinblasdämmstoff 79

Abbildung 5-2: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege des Zellulosedämmstoffs; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 81

Abbildung 5-3: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz des Zellulosedämmstoffes; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 82

Abbildung 5-4: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege des Hanfdämmstoffs; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 84

Abbildung 5-5: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz des Hanfdämmstoffes; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 85

Abbildung 5-6: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege des Jutedämmstoffs; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 86

Abbildung 5-7: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz des Jutedämmstoffes; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 87

Abbildung 5-8: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Holzfasereinblasdämmung; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 88

Abbildung 5-9: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Holzfasereinblasdämmung; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 89

Abbildung 5-10: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Holzmattendämmung; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 90

Abbildung 5-11: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Holzmatten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 91

Abbildung 5-12: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der nass produzierten Holzfaserdämmplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 92

Abbildung 5-13: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der trocken produzierten Holzfaserdämmplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 93

Abbildung 5-14: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der nass (links) bzw. trocken (rechts) produzierten Holzfaserdämmplatten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 94

Abbildung 5-15: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Mineralfaserplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 95

Abbildung 5-16: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Mineralfaserplatten (Steinwolle); Referenz: Dämmung Flachdach leicht 96

Abbildung 5-17: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Glaswolledämmstoffe; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 98

Abbildung 5-18: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Glaswolle; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 99

Abbildung 5-19: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Schaumglasplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 100

Abbildung 5-20: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Schaumglasplatten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 101

Abbildung 5-21: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Mineralschaumplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 102

Abbildung 5-22: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Schaumglasplatten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 103

Abbildung 5-23: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der EPS-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 104

Abbildung 5-24: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der EPS-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 105

Abbildung 5-25: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der XPS-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 106

Abbildung 5-26: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der XPS-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 107

Abbildung 5-27: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der PU-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht 108

Abbildung 5-28: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der PU-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht 109

Abbildung 6-1: Erläuterung zur Darstellung der Ergebnissen aus der Produktökobilanz nach EN 15804 111

Abbildung 6-2: Bedeutung des Rückbau an den Ergebnissen im Treibhauseffekt für verklebtes EPS nach der EN 15804 112

Abbildung 6-3: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 114

Abbildung 6-4: Ergebnisse für den fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 115

Abbildung 6-5: Ergebnisse für das Versauerungspotenzial für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 115

Abbildung 6-6: Ergebnisse für das terrestrische Eutrophierungspotenzial für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 116

Abbildung 6-7: Ergebnisse für das PM 2,5-Risikopotenzial (Feinstaub) für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 117

Abbildung 6-8: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Steildach mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 118

Abbildung 6-9: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Steildach nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 119

Abbildung 6-10: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 120

Abbildung 6-11: Ergebnisse für den fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 120

Abbildung 6-12: Ergebnisse für das Versauerungspotenzial für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 121

Abbildung 6-13: Ergebnisse für das terrestrische Eutrophierungspotenzial für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 121

Abbildung 6-14: Ergebnisse für das PM 2,5-Risikopotenzial (Feinstaub) für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 122

Abbildung 6-15: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 123

Abbildung 6-16: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 124

Abbildung 6-17: Erläuterung zur Darstellung der Ergebnissen aus der Produktökobilanz nach dem 50:50-Ansatz 126

Abbildung 6-18: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 130

Abbildung 6-19: Ergebnisse für den fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 130

Abbildung 6-20: Ergebnisse für das Versauerungspotenzial für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 132

Abbildung 6-21: Ergebnisse für das terrestrische Eutrophierungspotenzial für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 133

Abbildung 6-22: Ergebnisse für das PM 2,5-Risikopotenzial (Feinstaub) für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 133

Abbildung 6-23: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Steildach nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 135

Abbildung 6-24: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Steildach nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 136

Abbildung 6-25: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 137

Abbildung 6-26: Ergebnisse für den fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 137

Abbildung 6-27: Ergebnisse für das Versauerungspotenzial für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 138

Abbildung 6-28: Ergebnisse für das terrestrische Eutrophierungspotenzial für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 138

Abbildung 6-29: Ergebnisse für das PM 2,5-Potenzial (Feinstaub) für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption 139

Abbildung 6-30: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 140

Abbildung 6-31: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 141

Abbildung 8-1: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen; Betrachtung auch der biogenen Kohlendioxidemissionen 5

Abbildung 8-2: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen; Betrachtung auch der biogenen Kohlendioxidemissionen 5

Abbildung 8-3: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption; Betrachtung auch der biogenen Kohlendioxidemissionen 6

Abbildung 8-4: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption; Betrachtung auch der biogenen Kohlendioxidemissionen 6

Abbildung 8-5: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Zelluloseeinblasdämmung und Holzfasereinblasdämmung 12

Abbildung 8-6: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Hanfdämmmatten und Jutedämmmatten 12
Abbildung 8-7: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Holzfaserdämmmatten und Holzfaserdämmplatten 12
Abbildung 8-8: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Mineralfaserdämmplatten und Glaswollematten 13
Abbildung 8-9: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Schaumglasplatten und Mineralschaumplatten 13
Abbildung 8-10: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für EPS-Dämmplatten und XPS-Dämmplatten 13
Abbildung 8-11: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege inkl. Erläuterung der Ergebnisse der Abfallökobilanz für PU Dämmplatten 13
Abbildung 8-12: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand, leicht, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 17
Abbildung 8-13: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, leicht, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 17
Abbildung 8-14: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, schwer, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 18
Abbildung 8-15: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, leicht, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 18
Abbildung 8-16: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, schwer, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 19
Abbildung 8-17: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerdecke, unten, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 20
Abbildung 8-18: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerwand, außen, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen 20
Abbildung 8-19: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand, leicht, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 21
Abbildung 8-20: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, leicht, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 21
Abbildung 8-21: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, schwer, nach der

EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 22

Abbildung 8-22: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, leicht, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 22

Abbildung 8-23: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, schwer, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 23

Abbildung 8-24: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerdecke, unten, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo 23

Abbildung 8-25: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerwand, außen, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo 24

Abbildung 8-26: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 25

Abbildung 8-27: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 25

Abbildung 8-28: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, schwer, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 26

Abbildung 8-29: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 26

Abbildung 8-30: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, schwer, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 27

Abbildung 8-31: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerdecke, unten, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 27

Abbildung 8-32: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerwand, außen, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 28

Abbildung 8-33: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand, leicht, nach

dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo 28

Abbildung 8-34: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo 29

Abbildung 8-35: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, schwer, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo 29

Abbildung 8-36: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo 30

Abbildung 8-37: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, schwer, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo 30

Abbildung 8-38: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerdecke, unten, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo 31

Abbildung 8-39: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerwand, außen, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo 31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Verwendete U-Werte für die Berechnung der Nutzengleichheit im Winterfall 32

Tabelle 3-1: Angesetzte Elementarzusammensetzung für die betrachteten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen in (g/kg); Hu = Heizwert 48

Tabelle 3-2: Angesetzte Elementarzusammensetzung für die Bindemittel (BM) der mineralischen Dämmstoffe und die synthetischen Dämmstoffe in (g/kg); Hu = Heizwert 48

Tabelle 4-1: Betrachtete Wirkungskategorien; grau: nicht in die Interpretation der Ergebnisse einbezogen 75

Tabelle 4-2: Jährliche Pro-Kopf-Lasten und ökologische Bedeutung für die Wirkungskategorien und Indikatoren 76

Tabelle 5-1: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen des Zellulosedämmstoffes (Z) 80

Tabelle 5-2: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen des Hanfdämmstoffes (Ha) 83

Tabelle 5-3: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen des Jutedämmstoffes (J) 85

Tabelle 5-4: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Holzfasereinblasdämmung (Hein) 87

Tabelle 5-5: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Holzfaserdämmmatte (HM) 89

Tabelle 5-6: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Holzfaserdämmplatte (nass und trocken produzier) (HPn bzw. HPt) 91

Tabelle 5-7: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Mineralfaserdämmplatte (Steinwolle) (St) 94

Tabelle 5-8: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen des Glaswolledämmstoffes (Gw) 97

Tabelle 5-9: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Schaumglasdämmplatte (Sc) 99

Tabelle 5-10: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Mineralschaumdämmplatte (Mi) 101

Tabelle 5-11: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der EPS-Dämmplatte (EPS) 103

Tabelle 5-12: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der XPS-Dämmplatte (XPS) 105

Tabelle 5-13: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der PU-Dämmplatte (PU) 107

Tabelle 6-1: Zusammenfassende bauteilabhängige Einordnung der Dämmstoffe mit dem jeweils nach EN 15804 besten Entsorgungsweg in Cluster, entsprechend der ökologischen Bewertung nach der EN 15804 125

Tabelle 6-2: Zusammenfassende bauteilabhängige Einordnung der Dämmstoffe mit dem jeweils nach dem 50:50-Ansatz besten stofflichem Verwertungsweg in Cluster, entsprechend der ökologischen Bewertung nach dem 50:50-Ansatz 142

Tabelle 6-3: Zusammenfassende bauteilabhängige Einordnung der Dämmstoffe mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo in Cluster, entsprechend der ökologischen Bewertung nach dem 50:50-Ansatz 142

Tabelle 8-1: Ergebnisse der Entsorgungswege für die jeweiligen Dämmstoffe im Treibhauseffekt (kg CO_2-Äq.) nach Abfallökobilanz, EN 15804 und 50:50; Bezug: 1 m² Dämmung Flachdach, leicht 1

Tabelle 8-2: Ergebnisse der Entsorgungswege für die jeweiligen Dämmstoffe im Versauerungspotenzial (kg SO_2-Äq.) nach Abfallökobilanz, EN 15804 und 50:50 3

Tabelle 8-3: Angesetzter Nutzen aus den verschiedenen Entsorgungs- und Verwertungswege und dessen Anrechnung in den betrachteten Methoden; Quellen der benutzten Datensätze zur Abbildung des Nutzens in Klammern; FSM = Flammschutzmittel; NaWaRo = aus nachwachsenden Rohstoffen 7

Tabelle 8-4: Ergebnisse für das Steildach nach der EN 15804 mit den danach jeweils besten Entsorgungswegen 14

Tabelle 8-5: Ergebnisse für das Steildach nach der EN 15804 mit Entsorgung wie im Status Quo 14

Tabelle 8-6: Ergebnisse für die Außenwand nach der EN 15804 mit den danach jeweils besten Entsorgungswegen 14

Tabelle 8-7: Ergebnisse für die Außenwand nach der EN 15804 mit Entsorgung wie im Status Quo 15

Tabelle 8-8: Nettoergebnisse für das Steildach nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 15

Tabelle 8-9: Nettoergebnisse für das Steildach nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung wie im Status Quo 15

Tabelle 8-10: Nettoergebnisse für die Außenwand nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen 16

Tabelle 8-11: Nettoergebnisse für die Außenwand nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung wie im Status Quo 16

Abkürzungsverzeichnis/Glossar

Allgemein:

Abfallökobilanz: Ökologische Bewertung der Entsorgungswege alleine, ohne Vorketten
AVV: Abfallverzeichnis-Verordnung
CaO: Calciumoxid
EBS: Ersatzbrennstoff
EI: ecoinvent
el: elektrisch
th: thermisch
IBO: Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH
HBCD: Hexabromcyclododecan
HKW: Heizkraftwerk
M-%: Masseprozent
MVA: Müllverbrennungsanlage
O. oder Opt. x: Option
O. Geschossdecke: Oberste Geschossdecke
PS: Polystyrol
PU: Polyurethan
RC: Recycling
WDVS: Wärmedämmverbundsystem

Dämmstoffe:

EPS: Expandierte Polystyrol-Dämmplatte
Gw: Glaswolle-Dämmmatte
Ha: Hanfmattedämmstoff
Hein: Holzfasereinblasdämmung
HM: Holzmattedämmstoff
HPn: nass produzierte Holzfaserdämmplatte
HPt: trocken produzierte Holzfaserdämmplatte
J: Jutemattedämmstoff
Mi: Mineralschaumdämmplatte
NaWaRo: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen
PU: Polyurethan-Dämmplatte
Sc: Schaumglasdämmplatte
St: Mineralfaserdämmplatte (= Steinwolle)
XPS: Extrudierter Polystyrol-Hartschaum-Dämmplatte
Z: Zelluloseeinblasdämmstoff

Entsorgungswege Dämmstoffe, zu kombinieren mit „Dämmstoffe“:

C-Aufnahme und -Weitergabe: In biogenen Produkten enthaltener Kohlenstoff durch die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre durch die Pflanzen abzüglich der Weitergabe an andere Produkte. Gleicht die

Kohlendioxidemissionen aus der Verbrennung biogener Produkte aus, so dass biogene Kohlendioxidemissionen neutral bewertet werden.

Creasolv: rohstoffliche Verwertung von EPS- und XPS-Platten durch das CreaSolv®-Verfahren
Deponie: Beseitigung auf der Deponie
Entsorgung wie im Status Quo: Beseitigung in Müllverbrennungsanlage, bei mineralischen Deponierung, bei Schaumglasplatten Entsorgung mit dem Bauschutt

Glyko: rohstoffliche Verwertung von PU-Platten durch Glykolyse
GS: Gutschrift
Rück: Rückführung in die Produktion
sto: Stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff
Sc Bau: stoffliche Verwertung der Schaumglasplatten über den Bauschutt
Sc Schall: stoffliche Verwertung der Schaumglasplatten in der Schallschutzplattenproduktion
Sc Schotter: stoffliche Verwertung der Schaumglasplatten in der Schaumglasschotterproduktion
Sc Leicht: stoffliche Verwertung der Schaumglasplatten als Leichtzuschläge
Mi sto min: mineralische stoffliche Verwertung der Mineralschaumplatten in der Porenbetonproduktion
Mi sto Leicht: stoffliche Verwertung der Mineralschaumplatten als Leichtzuschläge
Regran: stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff durch Regranulierung (EPS- und XPS-Platten)
Sekundär: stoffliche Verwertung als Sekundärmaterial (EPS- und PU-Platten)
v: verklebt vorliegender Dämmstoff
Zement: energetische bzw. bei Glaswolle und Mineralfaserplatten stoffliche Verwertung im Zementwerk

Umweltwirkungskategorien:

KEA fossil: fossiler kumulierter Energieaufwand
Eutrophierung t. oder Eutrophierung terr. oder Eutroph. t.: terrestrisches Eutrophierungspotenzial
Versau.: Versauerungspotenzial
PM 2,5: PM 2,5-Potenzial (Feinstaub)

Formeln:

C: Kohlenstoffgehalt in [kg/kg]
Cl: Chlorgehalt in [kg/kg]
F: Fluorgehalt in [kg/kg]
H: Wasserstoffgehalt in [kg/kg]
H2O: Wassergehalt in [kg/kg]
HGT: Heizgradtage
Hu: unterer Heizwert in [MJ/kg]
KGT: Kühlgradtage
N: Stickstoffgehalt in [kg/kg]
O: Sauerstoffgehalt in [kg/kg]
s^*, s_{Winter}, s_{Sommer}: charakteristische Dämmstärke in [m], Dämmstärke Winterfall [m], Dämmstärke Sommerfall [m]
S: Schwefelgehalt in [kg/kg]
U-Wert: Wärmdurchgangskoeffizient in W/m^2K
λ: Wärmeleitfähigkeit in [W/(m*K)]

Zusammenfassung

In dieser Studie werden Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, mineralischen Rohstoffen und synthetische Dämmstoffe aus ökologischer Sicht unter Einbezug des ganzen Lebensweges inkl. der Entsorgung am Lebensende miteinander verglichen. Über die jeweils ermittelte Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe und die Dichte werden die Dämmstoffmassen ermittelt, die jeweils für den Einsatz in den unterschiedlichen Bauteilen benötigt werden. Diese dienen als Referenzflüsse für den ökologischen Vergleich.

Für die Vielzahl an Dämmstoffen galt es zunächst, die Entsorgungsoptionen aufzuzeigen. Neben den klassischen Lösungen einer Entsorgung über Deponien oder Müllverbrennungsanlagen bzw. aufbereitet als Ersatzbrennstoff zur energetischen Verwertung bestehen für die Dämmstoffalternativen auch Möglichkeiten zum Recycling und zur stofflichen Verwertung. Diese Aufbereitung und Rückführung in den Wirtschaftskreislauf erfolgt in der Praxis derzeit meist noch nicht. In einem ersten Schritt galt es daher, die verschiedenen Entsorgungssysteme zu modellieren und Kenndaten zur Quantifizierung der einzelnen Prozesse zu erheben und abzuleiten. In einem ersten Schritt wurden diese eruierten Entsorgungswege aus ökologischer Sicht über Abfallökobilanzen dann miteinander verglichen, wobei auch die jeweiligen durch die dadurch erzeugten Sekundärprodukte bzw. Energie erreichten Nutzen quantifiziert und in die Bilanzierung einbezogen wurden. Es zeigt sich, dass die stoffliche Verwertung in vielen Fällen gut abschneidet, auch wenn bei vielen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen die energetische Verwertung in Zementwerken im Treibhauseffekt noch besser abschneidet. Dies ist alleine dem Sachverhalt geschuldet, dass in Zementwerken stattdessen Steinkohle verfeuert würde. Insbesondere die stoffliche Verwertung von synthetischen und manchen mineralischen Dämmstoffen haben große Vorteile. Die aufbereiteten Altmassen aus den Dämmstoffen können zu Produkten weiterverarbeitet oder auch als Rohstoff in die ursprüngliche Produktion zurückgeführt werden. Um die damit verbundenen Substitutionserfolge quantifizieren zu können, mussten die eigentlichen Produktionssysteme im Detail nachvollzogen werden. Daten und Informationen zur Dämmstoffproduktion wurden vom IBO-Institut Wien übernommen, aus Publikationen herausgearbeitet oder im Austausch mit der Industrie bzw. den Verbänden erarbeitet.

Im nächsten Schritt wurden die Produktionslasten im Zuge einer Produktökobilanz nach der EN 15804 mit einbezogen. In dem dieser Methodik zugrundeliegenden Cut-Off-Ansatz wird der Nutzen, der mit der Entsorgung generiert wird, nur informatorisch ausgewiesen und nicht angerechnet. Es werden jeweils die nach der EN 15804 besten Entsorgungswege betrachtet. Um einen ganzheitlichen Vergleich der Dämmstoffoptionen zu erreichen, darf aber die Entsorgung mit ihren Lasten und Substitutionserfolgen nicht ausgeblendet werden. Dazu dient die Produktökobilanz nach dem 50:50-Ansatz. Nach dieser Methode schneiden alle Dämmstoffe, die aus primären Rohstoffen bestehen, besser bzw. Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen, die nicht stoffgleich verwertet werden, schlechter ab als nach der EN 15804. Weiterhin wird auch bei stofflicher Verwertung stets die Hälfte der endgültigen Beseitigung getragen, so dass die Freisetzung von ggf. enthaltenem fossilem Kohlenstoff mit angelastet wird. Es werden hier jeweils die besten stofflichen Entsorgungswege und eine Entsorgung wie im Status Quo untersucht.

Wenn eine vom Status Quo abweichende stoffliche Verwertung der Dämmstoffe am Lebensende erfolgt, ergeben sich folgende Ergebnisse:

- Für die Bauteile, in denen alle Dämmstofftypen eingesetzt werden können, schneiden Holzfaser-einblasdämmung und Hanf- sowie Jutematten am besten ab, solange Hanf- und Jutematten auf Restbiomasse bzw. sekundäre Rohstoffe zurückgreifen können. Darauf folgen Zelluloseeinblasdämmstoff, EPS-Platten und Holzmatten und darauf die weiteren Dämmstoffe in Platten- und Mattenform (PU-, XPS-

Platten, trocken produzierte Holzfaserdämmplatten, Mineralfaserplatten (Steinwolle), Glaswollematten, Mineralschaumplatten).
- In den Bauteilen, in denen nur Dämmstoff - Platten eingesetzt werden können, schneidet EPS damit am vorteilhaftesten ab gefolgt von den weiteren o.g. Dämmstoffen in Plattenform. Voraussetzung dafür ist, dass EPS derart stofflich verwertet wird, dass in einer Folgeanwendung EPS-Kügelchen eingespart werden und dass EPS im Bauteil eingesetzt werden kann.

Wenn die **Entsorgung wie im Status Quo** stattfindet und der energetische Nutzen angerechnet wird, verbessern sich Holzfaserdämmplatten relativ und verschlechtern sich EPS-Platten:
- EPS-Platten und trocken produzierte Holzfaserdämmplatten sind dann in der Bewertung ähnlich zwischen den besseren nicht-plattenförmigen Dämmstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen und einer Gruppe aus den o.g. weiteren Dämmstoffen in Platten- und Mattenform sowie nass produzierten Holzfaserdämmplatten anzusiedeln. EPS-Platten haben dann im Treibhauseffekt und fossilem kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) etwas schlechtere Werte auch als Mineralfaserplatten (Steinwolle) und teilweise Glaswollematten. Der (zukünftige) energetische Nutzen aus der Verbrennung der Dämmstoffe wird ggf. überschätzt, weil dafür u.a. der aktuelle deutsche Netzstrommix zugrunde gelegt wird.

Ohne Anrechnung des energetischen Nutzens verschlechtern sich EPS- und Holzfaserdämmplatten:
- Trocken produzierte Holzfaserdämmplatten sind nicht mehr und EPS-Platten kaum besser als die weiteren o.g. Dämmstoffe in Platten- und Mattenform. EPS-Platten haben im Treibhauseffekt und KEA fossil schlechtere Werte als Mineralfaserplatten (Steinwolle) und Glaswollematten.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes zeigen, dass die ökologischen Rucksäcke insbesondere von synthetischen und manchen mineralischen Dämmstoffen dann deutlich reduziert werden können, wenn es gelingt, die am Ende des Produktlebensweges anfallenden Abfallmassen gezielt aufzubereiten und hochwertig in den Materialkreislauf zurückzuführen. Viele der aufgezeigten und bilanzierten Lösungen müssen jedoch erst noch entwickelt und in der Entsorgungspraxis etabliert werden. Es wird empfohlen, die stoffliche Verwertung von Dämmstoffen weiter zu erforschen und voranzutreiben. Die Ergebnisse zur stofflichen Verwertung sind daher auch mit Unsicherheiten verbunden, weil Annahmen zum dadurch erzielbaren Nutzen getroffen werden mussten, wobei der Nutzen bei synthetischen und manchen mineralischen Dämmstoffen besonders groß ist.

In Summe zeigen sich Vorteile für die nicht-plattenförmigen Dämmstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen, wenn genügend Restbiomasse vorhanden ist. Unter den plattenförmigen Dämmstoffen ergeben sich leichte Vorteile für EPS-Platten, falls diese im Bauteil eingesetzt werden können, und in manchen Bauteilen für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten. Diese leichten Vorteile hängen aber davon ab, ob eine stoffliche Verwertung aller Dämmstoffe stattfindet (dann keine Vorteile für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten) oder eine Entsorgung wie im Status Quo erfolgt (leichte Vorteile für EPS-Platten werden dann noch kleiner) und ob der energetische Nutzen aus der Beseitigung in der MVA angerechnet wird (ohne Anrechnung kaum noch Vorteile für EPS-Platten, keine Vorteile für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten).

Die Produktionslasten werden konservativ über aktuell schlechtere Fälle abgebildet. Mit anderen Produktionsdaten und anderen Produktionsstandorten können insbesondere für energieintensive Prozesse andere Ergebnisse herauskommen. Für Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen und Restbiomassen würde die Bewertung hingegen schlechter ausfallen, wenn diese Rohstoffe nicht zur Verfügung stehen.

Das durch die deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ 34426_01) und das Umweltministerium Baden-Württemberg geförderte Projekt wurde durch die Kooperationspartner ifeu-Institut und natureplus bearbeitet. Produktionsdaten wurden vom IBO-Institut bezogen.

1 Einleitung

Die Frage der Wahl geeigneter Dämmstoffe ist wegen der derzeitigen Entsorgungsprobleme wieder in der breiten Öffentlichkeit und damit auch unter Bauherren und anderen Akteuren aus dem Baubereich ins Bewusstsein gerückt. In dieser Studie wird der Frage nachgegangen, welche Dämmstofftypen aus ökologischer Sicht mehr oder weniger vorteilhaft sind. Um diese einem systematischen ökologischen Vergleich unterziehen zu können, muss zunächst eine Vergleichbarkeit geschaffen werden, indem jeweils die Masse Dämmstoff bestimmt wird, die für die Erfüllung desselben Nutzens pro Quadratmeter Fläche benötigt wird. Dabei wird nach verschiedenen Bauteilen unterschieden.

Es gibt eine große Vielzahl an Dämmstoffen, die eine deutlich unterschiedliche Marktdurchdringung haben. Für den ökologischen Vergleich werden die wichtigsten Vertreter aller Dämmstofftypen herangezogen. Nicht berücksichtigt wird die Vakuumdämmung:

- Aus nachwachsenden Rohstoffen: Zellulosedämmstoff, Hanf-, Jutedämmmatten, Holzfasereinblasdämmung, flexible Holzdämmmatten, jeweils nass und trocken produzierte Holzfaserdämmplatten
- Mineralische Dämmstoffe: Mineralfaserplatten (Steinwolle), Glaswollematten, Schaumglasplatten, Mineralschaumplatten
- Synthetische Dämmstoffe: EPS-, XPS-, PU-Platten

Im ökologischen Vergleich dürfen aber nicht nur die Herstellungslasten betrachtet werden. Die Dämmstoffe fallen an den Baustellen, bei Sanierungsmaßnahmen oder gar dem Rückbau des Bauwerkes als Abfall zur Entsorgung an. Eine ökologische Bewertung muss immer den ganzen Produktlebensweg betrachten. Bislang spielt die Entsorgung langlebiger Baustoffe eher eine untergeordnete Rolle. Insbesondere Dämmstoffe werden bislang kaum rückgebaut, sondern verbleiben im Bestand, so dass der Anfall der zu entsorgenden Dämmmaterialien zukünftig stark zunehmen wird. In der ökologischen Bewertung von Dämmstoffen wird bislang oft der Fokus auf die Produktionsphase gelegt. Die Entsorgung wird dabei über die momentanen (Beseitigungs-)Wege abgebildet, wohingegen zukünftige Entsorgungswege noch kaum beleuchtet werden. .

Dass die Frage der Entsorgung ein großes Gewicht bekommen kann, zeigt sich aktuell an der Hexabromcyclododecan (HBCD)-Problematik bei EPS-Wärmedämmverbundsystemen und den mit der Einstufung als gefährlicher Abfall verbundenen Schwierigkeiten. Mit der seit August 2017 geltenden Gewerbeabfallverordnung werden neue Anforderungen an den Rückbau von Bauwerken und die Ge-trennthaltung von Materialien ab Baustelle gestellt werden, die eine hochwertige Verwertung und Rückführung der Materialströme in den Wirtschaftskreislauf sicherstellen sollen. Für viele Dämmstoffe wird bislang eine Beseitigung über Müllverbrennungsanlagen oder Deponien praktiziert, was ihren wertgebenden Potenzialen nicht gerecht wird. Bei Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist eine Beseitigung mit geringeren Umweltlasten verbunden als insbesondere bei synthetischen Dämmstoffen, welche aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden und daher fossile Brennstoffe darstellen. Daher ist bei der vergleichenden ökologischen Bewertung der Dämmstoffe auch eine entscheidende Frage, ob es zukünftig gelingt, die alten Dämmstoffe wieder dem Materialkreislauf zuzuführen.

Ziel dieser Studie ist, verschiedene Dämmstoffe unter Berücksichtigung der Entsorgung aus ökologischer Sicht „von der Wiege bis zur Bahre“ miteinander zu vergleichen. Hierfür sollen jeweils verschiedene, bereits praktizierte und zukünftig als potenziell möglich eingestufte Entsorgungs- und Verwertungswege betrachtet und in die Auswertung einbezogen werden. Dabei soll der unterschiedliche Nutzen, der über die jeweiligen Entsorgungs- und Verwertungswege generiert wird, den mit der Entsorgung selbst verbundenen Lasten gegenüberge-

stellt werden. Dieser Nutzen kann die Bereitstellung von Energie und/oder Sekundärrohstoffen bzw. –materialien für ein nachfolgendes Produkt umfassen, so dass die entsprechenden Umweltlasten für die konventionelle Bereitstellung substituiert werden.

2 Verwendung der Dämmstoffe in den einzelnen Bauteilen

2.1 Vorgehensweise

Bevor ein Vergleich verschiedener Dämmstoffe unter Berücksichtigung der Entsorgung aus ökologischer Sicht „von der Wiege bis zur Bahre“ stattfinden kann, müssen die Dämmstoffe zunächst auf eine gemeinsame Ebene gebracht werden. Dies geschieht, indem sie auf einen gleichen Nutzen „normiert“ werden.
Grundsätzlich besteht der Hauptnutzen von Dämmstoffen für die Gebäudehülle in der Vermeidung von Wärmeverlusten während der Heizperiode. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Vermeidung von Überhitzung im Sommer. Darüber hinaus bestehen weitere Eigenschaften wie Schallschutz, Brandverhalten, mechanische Belastbarkeit und Formstabilität, Rohstoffart sowie die Nutzungsdauer, die die Dämmstoffe definieren (Abbildung 2-1).

Abbildung 2-1: Zur Ermittlung der Nutzengleichheit der Dämmstoffe überprüfte Parameter (dunkelgrün: detailliert betrachtet)

Für die „Normierung“ der Dämmstoffe auf den gleichen Nutzen werden nur die Dämmeigenschaften gegen Wärme und Kälte herangezogen (dunkelgrüne Parameter). Die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffs ist das Maß für die Dämmeigenschaft. Sie betrifft den winterlichen Wärmeschutz.

Die Wärmekapazität[1] (die Fähigkeit Energie zu speichern) beeinflusst vor allem den sommerlichen Wärmeschutz. Sie wirkt auf die Amplitudendämpfung, also das Verhältnis von Außentemperatur-Schwankung zu Innentemperatur-Schwankung und die Phasenverschiebung, also die Zeitspanne zwischen dem Auftreten der höchsten Temperatur außen und dem Auftreten der höchsten Temperatur innen.
Weiter sind für die Normierung die Anwendungsgebiete der Dämmstoffe relevant. Nicht jeder untersuchte Dämmstoff kann für alle Bauteile eingesetzt werden. Außerdem beeinflusst das Anwendungsgebiet der Dämm-

[1] Die spezifische Wärmekapazität *c* ist eine Stoffeigenschaft, die im Zusammenhang mit der Masse also der Rohdichte eines Baustoffes zu sehen ist. Der Wert zur spezifischen Wärmekapazität *c* beschreibt die Wärmemenge Q, die benötigt wird, um das Temperaturniveau um 1 K im Baustoff zu erhöhen [Baunetzwissen, 2019] und entspricht damit der Speicherfähigkeit von Energie.

stoffe auch die Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz.
Die Parameter Brandverhalten und Nutzungsdauer sind bei den untersuchten Dämmstoffen gleich. Für bestimmte Gebäudeklassen, in denen erhöhte Anforderungen an den Brandschutz gelten, sind nicht brennbare Baustoffe einzusetzen. Es können aber auch schwer entflammbare Dämmstoffe verwendet werden, wenn umlaufende, nicht brennbare Brandriegel in jeder zweiten Etage vorgesehen werden.
Die Nutzungsdauern der Dämmstoffe unterscheiden sich je nach Bauteil. Allerdings werden für gebräuchliche Dämmstoffe in der Normung und für die Erteilung einer europäischen technischen Zulassung, Lebensdauern von 50 Jahren angesetzt [FIW München, 2015].
Die Art des Rohstoffs ist besonders für die ökologische Bewertung der Entsorgung bedeutend. Von jeder Rohstoffart (nachwachsend, synthetisch oder mineralisch) werden die bekannten Optionen untersucht.
Andere Dämmstoffeigenschaften, wie mechanische Belastbarkeit oder Schallschutz unterscheiden sich zwar bei den betrachteten Dämmstoffen, treten aber hinter den Hauptnutzen – die Dämmwirkung – zurück und werden daher nicht gesondert betrachtet (graue Parameter).

2.2 Nutzengleichheit: Sommerfall

2.2.1 Sommerlicher Wärmeschutz in der Normung

Der sommerliche Wärmeschutz und die Kühllastberechnung werden in folgenden Normen und Verordnungen geregelt:

- Energieeinsparverordnung (EnEV 2014)
- DIN 4108-2 (Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz)
- VDI 2078 (Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation))
- VDI 6007 (Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden)

Die EnEV bezieht sich bei dem sommerlichen Wärmeschutz auf das Berechnungsverfahren in der DIN 4108-2 „Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“. Dafür muss der Sonneneintragskennwert ermittelt werden, der von folgenden Größen abhängt (Abbildung 2-2):

Abbildung 2-2: Einflussparameter auf den Sonneneintragskennwert der DIN 4108-2

Dämmstoffe gehen in die Berechnung ein, weil sie die Wärmespeicherfähigkeit umgebender Flächen beeinflussen. Allerdings ist der Einfluss von Wärmedämmung in der Regel vergleichsweise gering. Die Art des Dämmstoffs kann in der Berechnung nicht genauer benannt werden [Gaisbauer, 2012].

Für die Berechnung der Kühllast und der Raumtemperatur werden nach VDI 2078 folgende Parameter berücksichtigt (Abbildung 2-3):

Abbildung 2-3: Einflussparameter auf Kühllast und Raumtemperatur nach VDI 2078

Der Einfluss der Wärmekapazität wird bei der Berechnung nur vereinfacht berücksichtigt, sodass unterschiedliche Eigenschaften der Dämmstoffe die Ergebnisse nicht nennenswert beeinflussen.

Die Art des Dämmstoffes hat in den relevanten DIN-Normen keinen nennenswerten Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz.

2.2.2 Literaturrecherche

Der Einfluss verschiedener Dämmstoffarten auf den sommerlichen Wärmeschutz wurde bereits in verschiedenen Studien untersucht. Dabei steht insbesondere die Überhitzung in Dachräumen im Fokus.

Versuche des Instituts für Bauphysik (Holzkirchen) haben gezeigt, dass Dämmdicken von ca. 16 cm bereits einen Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz haben. Eine solche Dämmstärke dämpft den Wärmestrom und damit die sommerliche Aufheizphase. Allerdings kommt es weniger darauf an, welcher Dämmstoff genutzt wird, da andere Bauteile meist eine höhere Masse und Wärmespeicherkapazität haben und somit einen größeren Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz [Gaisbauer, 2012].

Die eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Schweiz) untersuchte den Einfluss verschiedener Parameter auf den sommerlichen Wärmeschutz in Dachwohnungen. Neben Nachtlüftung, Sonnenschutz und internen Wärmequellen wurde der Einsatz verschiedener Dämmstoffarten mit unterschiedlichen Dichten überprüft. Die Raumtemperaturen zeigten dabei nur einen Unterschied von maximal 1 K [Gaisbauer, 2012].

Es zeigt sich, dass bisherige Versuche den geringen Einfluss der Dämmstoffart wie in DIN 4108-2 postuliert bestätigen. Andere Faktoren, wie Fenstergrößen, Art der Lüftung oder Verschattung haben einen wesentlich höheren Einfluss auf die sommerliche Überhitzung [Gaisbauer, 2012].

2.2.3 Simulation

Für den Wärmeschutz im Sommer ist neben dem U-Wert auch die Wärmespeicherfähigkeit des Materials wichtig. Als Maß für die Nutzengleichheit wird hier auf die operative Raumtemperatur zurückgegriffen. Für alle Dämmstoffe wurde die Materialdicke (s_{Sommer}) ermittelt, bei der sich am heißesten Tag des Jahres eine Raumtemperatur von 26°C einstellt. Dies ist laut Arbeitsstättenverordnung die Grenze für die Temperatur in Arbeitsräumen, ab der Arbeitgeber angehalten sind, Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Dazu wurde ein typischer Raum mit den Maßen 6 m x 4 m x 2,5 m (Länge x Breite x Höhe) definiert. Mit dem Simulationsprogramm (TheSim 3D) wurde die operative Temperatur im Sommer berechnet [Architektur- und Bauforschung GesbR, 2019]. Für die Berechnungen wurde ein hypothetischer Raum konstruiert, dessen Umgebungsflächen nur aus Dämmstoffen bestehen, der keine Fenster und keine inneren Lasten aufweist (Abbildung 2-4). Auf diese Weise werden die Dämmstoffeigenschaften zum einzigen Einflussfaktor auf den Hitzeschutz und die Unterschiede der untersuchten Dämmstoffe treten hervor. Andere überlagernde Faktoren werden somit ausgeschlossen.

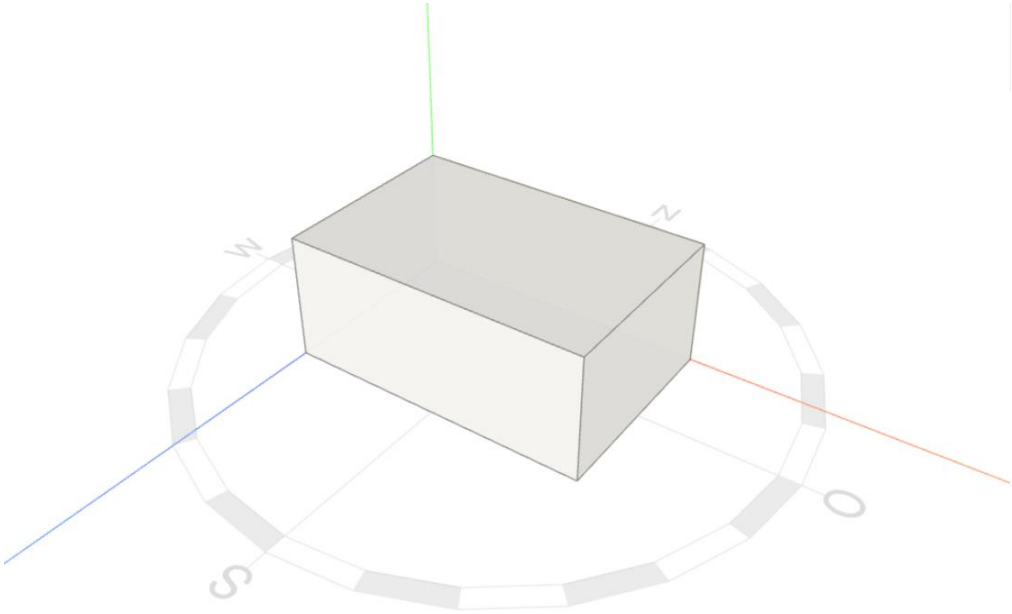


Abbildung 2-4: Schema des hypothetischen Raumes zur Berechnung der erforderlichen Dämmstärke

Die Materialstärke wurde so gewählt, dass ein U-Wert von 0,2 W/m²K erreicht wird. Für eine Holzfaserdämmplatte beträgt sie 20,4 cm (λ= 0,042 W/m*K), für EPS sind es 17 cm (λ= 0,035 W/m*K). Mit dem Programm wird für jeden Dämmstoff die operative Temperatur simuliert.

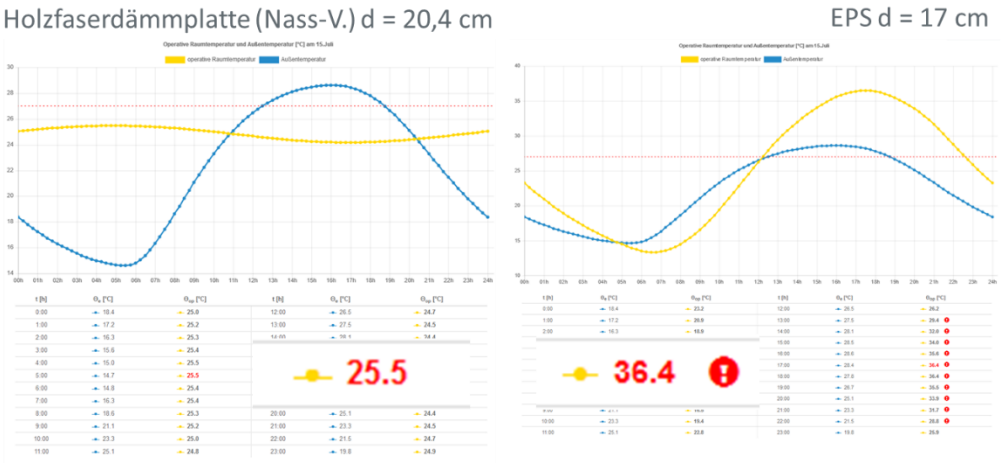


Abbildung 2-5: Musterberechnungen für einen Raum aus Dämmstoff (TheSim 3D)

Abbildung 2-5 zeigt in Gelb die simulierte operative Raumtemperatur und in Blau die Außentemperatur am heißtesten Tag des Jahres in Berlin (15. Juli) für einen Holzfaserdämmstoff und Polystyrol. Die operative Temperatur in dem Raum aus Holzfaserdämmstoffen beträgt 25,5 °C; in dem EPS-Raum steigt die Temperatur auf 36,4 °C. Damit steigt die Temperatur in dem EPS-Raum deutlich über die Grenztemperatur von 26 °C. Die Holzfaserdämmplatte hat eine höhere Wärmekapazität. Sie bewirkt eine Phasenverschiebung zwischen Außen- und Innentemperatur, die in Abbildung 5 deutlich zu erkennen ist. Die höchste Raumtemperatur tritt erst ein, wenn die Außentemperatur wieder abgesunken ist. Damit kehrt sich der Wärmestrom im Bauteil wieder um und wird nach außen abgeleitet.

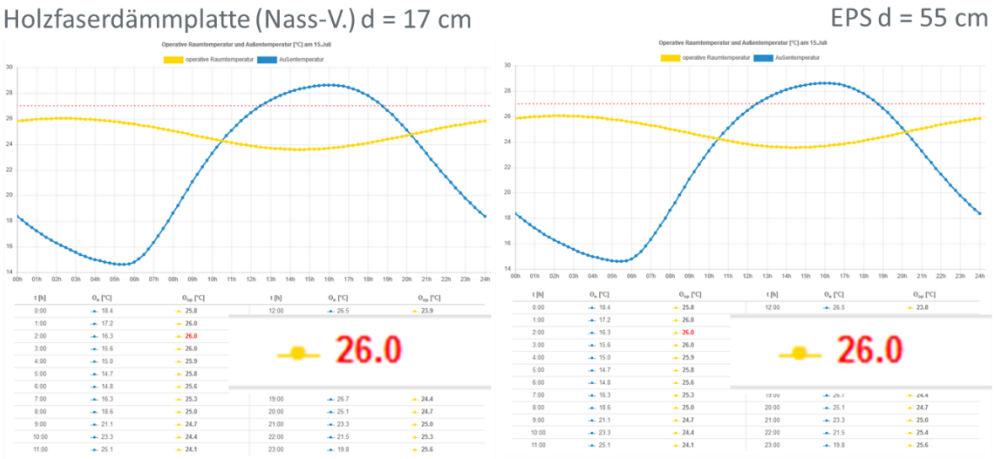


Abbildung 2-6: Musterberechnungen für einen Raum aus Dämmstoff – angepasst auf die max. Temperatur 23 °C (TheSim 3D)

In einer weiteren Simulation wurde für alle betrachteten Dämmstoffe die erforderliche Dicke für eine maximale operative Temperatur von 26 °C berechnet (Abbildung 2-6).

	Erforderliche Dämmstärke für einen U-Wert von 0,2 W/m²K [cm]	Maximale Raum-temperatur bei einem U-wert von 0,2 W/m²K [°C]	Erforderliche Dämmstoffdicke für eine Raumtemperatur von 26°C [cm]	Erforderliche Dämmstoff-masse für eine Raum-temperatur von 26°C [kg/m²]
EPS	**17,0**	**36,4**	**55**	**12,4**
XPS	16,2	33,8	42	16,4
PU-Platte	11,8	36,2	38	13,9
Mineralfaserplatte	15,9	31,8	34	33,5
Glaswolle	15,5	37,8	43	24,3
Mineralschaumplatte	19,7	30,4	37	37,9
Schaumglas	19,3	28,7	31	40,4
Holzfaserdämmplatten (nass)	**20,4**	**25,5**	**17**	**34,4**
Holzfaserdämmplatten (trocken)	18,6	26,0	19	28,8
Holzfasereinblasdämmung	17,7	31,3	37	14,3
flexible Holzmatten	16,4	29,9	30	16,2
Hanffasermatten	18,4	31,1	37	15,5
Jute	17,5	31,1	35	13,0
Zellulose	17,5	30,6	34	14,8

Abbildung 2-7: Erforderliche Dämmstoffdicke für einen U-Wert von 0,2 W/m²*K und entsprechende Raumtemperatur im Sommer sowie erforderliche Dämmstärke und -masse für eine maximlale Innentemperatur von 26 °C

Abbildung 2-7 zeigt die Simulationsergebnisse für alle ausgewählten Dämmstoffe: die Dämmstoffdicke für einen U-Wert von 0,2 W/m²K und die Dämmstoffdicke für eine operative Temperatur von 26 °C.

Der hypothetische Dämmstoff-Raum ist allerdings nur ein theoretisches Beispiel. Die operative Temperatur wird von einer Reihe weiterer Faktoren beeinflusst wie Fenstergröße, Verschattungseinrichtungen, inneren Lasten, Größe des Raums, Kubatur, Bauteilschwere und Wärmekapazität oder Lüftung. Diese Einflüsse wurden in dieser Simulation nicht berücksichtigt. Wenn die Simulation nur um einen weiteren Faktor ergänzt wird, tritt die Art und Dicke der Dämmstoffe in den Hintergrund. Der Einfluss der Wärmekapazität der Dämmung macht in vielen realen Fällen nur einen Anteil von weniger als einem Prozentpunkt aus.

2.2.4 Einsatz von Dämmung für den sommerlichen Wärmeschutz

Obwohl der Einfluss von Dämmstoffen auf den sommerlichen Wärmeschutz begrenzt ist, gibt es Anwendungsfälle, in denen eine Dämmung mit hoher Wärmekapazität besonders sinnvoll ist; z. B. in Dachgeschossen oder Räumen bei denen eine oder mehrere der folgenden Kriterien vorliegen:

- geringe Bauteilmasse der Umfassungsflächen
- hoher Anteil an Außenbauteilen
- raumseitige Dämmschichten
- kleine Fensterflächen
- geringe innere Wärmelasten

- geringer Luftwechsel

Typischerweise treffen die Kriterien in Dachräumen zu oder in Räumen in Holzständerbauweise. Hier kann ein Dämmstoff mit einer höheren Dichte und Wärmespeicherkapazität zu einer Phasenverschiebung zwischen der Außen- und Innentemperatur beitragen, sodass nur eine geringere maximale Raumtemperatur erreicht wird.

2.3 Nutzengleichheit: Winterfall

2.3.1 Anforderungen

Der winterliche Wärmeschutz wird durch die Dämmwirkung erreicht. Die ausschlaggebende Größe für die Dämmeigenschaften eines Bauteils ist der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert). Er wird über die spezifische Wärmeleitfähigkeit und die Schichtstärke der Dämmstoffe bestimmt. Für den Winterfall wird unterstellt, dass der Nutzen verschiedener Dämmstoffe gleich ist, wenn derselbe U-Wert erreicht wird. Alle Dämmstoffe bewirken somit dieselbe Energieeinsparung. Die U-Werte, auf die die Dämmstoffe normiert werden, sind für die Bauteile wie Außenwand, Dach und Keller unterschiedlich.

Aus den Anwendungsgebieten von Dämmstoffen nach DIN V 4108-10 werden besonders gängige Beispiele ausgewählt. Für den Winterfall werden folgende Konstruktionen betrachtet:

- Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem
- Außenwand, leicht, Holzständerbauweise, Dämmung innenliegend
- Steildach Zwischen- + Untersparrendämmung
- Flachdach, leicht, Dämmung innenliegend
- Flachdach, schwer, Dämmung unter Abdichtung
- Oberste Geschossdecke, leicht, Holz
- Oberste Geschossdecke, schwer, Beton
- Kellerdecke Dämmung von unten
- Kellerwand Dämmung von außen (Perimeter)

Bei der Festlegung der U-Werte wird auf die Anforderungen zurückgegriffen, die die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) an förderfähige Einzelmaßnahmen stellt. Diese U-Werte gehen über die Anforderungen der Energieeinsparverordnung hinaus und sind besser kompatibel mit den Klimaschutzzielen der Bundesregierung [Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2015].

Nur für die Bauteile Dach und oberste Geschossdecke werden die U-Werte der Erfüllungsoption des EWärmeG in Baden-Württemberg angesetzt. Hier sind die Anforderungen weniger hoch als bei den förderfähigen Einzelmaßnahmen der KfW (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Verwendete U-Werte für die Berechnung der Nutzengleichheit im Winterfall

Bauteil	U-Wert [W/m²*K]	Referenz
Außenwand (WDVS)	0,2	KfW (Förderfähige Einzelmaßnahmen)
Außenwand leicht	0,2	KfW (Förderfähige Einzel-

(Holzständerbauweise)		maßnahmen)
Steildach	0,192	EWärmeG
Flachdach leicht	0,16	EWärmeG
Flachdach schwer	0,16	EWärmeG
Oberste Geschossdecke leicht	0,16	EWärmeG
Oberste Geschossdecke schwer	0,16	EWärmeG
Kellerdecke unten	0,25	KfW (Förderfähige Einzel-maßnahmen)
Kellerwand außen	0,25	KfW (Förderfähige Einzel-maßnahmen)

2.3.2 Berechnung

Zuerst wird überprüft welche der ausgewählten 14 Dämmstoffarten aus der Gruppe der synthetischen, mineralischen und nachwachsenden Rohstoffe praktisch für die neun Bauteile genutzt werden können (Abbildung 2-8). Mineralschaumplatten sind im Steildach nicht als Zwischensparrendämmung einsetzbar.

Zelluloseeinblasdämmung	**Z**
Hanfmatte (flexibel)	**Ha**
Jutematte (flexibel)	**J**
Holzfasermatte	**HM**
Holzfasereinblasdämmung	**Hein**
Holzfaserplatte nass	**HPn**
Holzfaserplatte trocken	**HPt**

Mineralfaserplatte (Steinwolle)	**St**
Glaswollematte (flexibel)	**Gw**
Schaumglasplatte	**Sc**
Mineralschaumplatte	**Mi**

EPS **XPS** **PU**

Bauteil	Bilanzierter Dämmstoff
Steildach	Z, Ha, J, Hein, HM, HPn, HPt, St, Gw, Mi, EPS, PU
Außenwand	Verklebt: HPn v, HPt v, St v, Sc v, Mi v, EPS v, XPS v, PU v
Außenwand leicht bzw. massiv mit vorgesetzter Fassade	Z, Ha, J, Hein, HM, HPn, HPt, St, Gw, Mi, EPS
Flachdach leicht	Z, Ha, J, Hein, HM, HPn, HPt, St, Gw, Sc, Mi, EPS, XPS, PU
Flachdach schwer	Verklebt: HPn v, HPt v, St v, Sc v, Mi v, EPS v, XPS v, PU v
Oberste Geschossdecke leicht	Z, Ha, J, Hein, HM, HPn, HPt, St, Gw, Sc, Mi, EPS, XPS, PU
Oberste Geschossdecke schwer	Z, Hein, HPn, HPt, St, Sc, Mi, EPS, XPS, PU
Kellerdecke unten	Z, Ha, J, Hein, HM, HPn, HPt, St, Gw, Sc v, Mi v, EPS, XPS, PU
Kellerwand außen	Verklebt: Sc v, EPS v, XPS v, PU v

verklebt (v) = Dämmstoffe werden in diesem Bauteil verklebt eingesetzt

Abbildung 2-8: Die betrachteten Bauteile und die dafür verwendeten Dämmstoffe; verklebt (v) = Dämmstoffe werden in diesem Bauteil verklebt eingesetzt

Dafür werden die Anwendungsgebiete nach DIN V 4108-10 der Dämmstoffe geprüft, da nicht alle Dämmstoffe für alle Bauteile eingesetzt werden können. In Abbildung 2-9 bis Abbildung 2-17 werden die Dämmstoffe gezeigt, die nach DIN V 4108-10 für das jeweilige Anwendungsgebiet einsetzbar sind.
Aus Daten konkreter Dämmstoffhersteller werden die Dämmstoffparameter Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärmekapazität entnommen und für die weitere Berechnung verwendet. Bei fehlenden Daten werden die Parameter aus der Datenbank WECOBIS genutzt.

Mit dem Programm Energieberater 18599 der Firma Hottgenroth Software werden die Bauteile konstruiert und für alle betrachteten Dämmstoffe die Materialstärken, Massen und Volumina berechnet, die zum Erreichen der gewünschten U-Werte erforderlich sind.

2.4 Zusammenführung der Nutzengleichheit in Sommer und Winter

Ansatz zur Berechnung

Die oben für den Sommer- und Winterfall jeweils einzeln bestimmte Nutzengleichheit soll im Folgenden zu einem einzigen Kennwert für die resultierende Nutzgengleichheit zusammengefasst werden, mit der die Dämmstoffe für die Ökobilanz vergleichbar gemacht werden. Das Maß für den Nutzen im Sommer- wie im Winterfall ist die Energieeinsparung, die durch einen Dämmstoff erzielt wird. Das Ziel ist die die Ermittlung einer gewichteten Energieeinsparung. Dazu werden die Dämmstärken s_{Winter} und s_{Sommer} mit dem Verhältnis von Kühlgradtagen (*KGT*) zu Heizgradtagen (*HGT*) gewichtet. Heiz- und Kühlgradtage sind wetterbasierte Indices für die Berechnung des Heiz- und Kühlbedarfs von Gebäuden. Sie werden aus Wetteraufzeichnungen abgeleitet und stehen als langjährige Mittelwerte zur Verfügung. Die Kühlgradtage bezeichnen die Summe der täglichen Differenz zwischen der Tagesmitteltemperatur und der Raumtemperatur über alle Kühltage. Kühltage sind Tage deren Mitteltemperatur über der Kühlgrenze (24°C) liegt. Andersherum sind die Heizgradtage die Summe der Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Raumtemperatur für alle Tage, an denen die Außentemperatur unter der Heizgrenztemperatur (15°C) liegt [Eurostat, 2018].

Formel 1: Berechnung der charakteristischen Dämmstärke

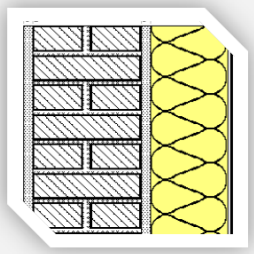
$$s^* = \frac{s_{Winter} \cdot HGT + s_{Sommer} \cdot KGT}{HGT + KGT}$$

Für den Raum Potsdam liegen die Kühlgradtage bei 20 und die Heizgradtage bei 230. Das Verhältnis von Kühlgradtagen zu Heizgradtagen liegt unter 0,8%. Die Energieeinsparungen im Sommerfall treten also weit hinter diejenigen im Winterfall zurück. Im Raum Stuttgart betragen die Kühlgradtage aufgrund der durchschnittlich wärmeren Temperaturen ca. 2 % der Heizgradtage.
Aufgrund dieses geringen Anteils der sommerlichen Energieeinsparung wird der Sommerfall bei der Berechnung der Nutzengleichheit im Weiteren vernachlässigt. Die Nutzengleichheit wird somit ausschließlich über die Energieeinsparungen im Winterfall berechnet.

2.5 Ergebnisse

Von Abbildung 2-9 bis Abbildung 2-17 werden die Berechnungsergebnisse gezeigt, sortiert nach den ausgewählten Bauteilen. Die Parameter der Dämmstoffe Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärmespeicherkapazität stammen aus den spezifischen Produkten verschiedener Hersteller. Neben der Materialstärke, die für das jeweilige Bauteil benötigt wird, um die erforderlichen U-Werte zu erreichen, werden die resultierenden Volumina und Massen berechnet, die in die weitere Ökobilanz eingehen.

Außenwand mit WDVS



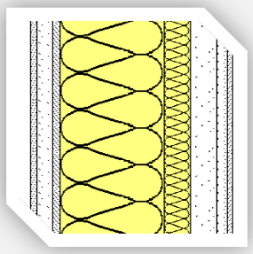
U-Wert = 0,2 W/m²*K

Dämmstoff	Dämmeigenschaften			Ergebnisse			Quelle
	Wärme-leitfähigkeit [W/(m*K)]	Dichte [kg/m³]	Spez. Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	Dämmdicke [cm]	Volumen [m³]	Masse [kg]	
EPS	0,035	23	1500	15,5	0,16	3,57	ISOVER Rigiwall
XPS	0,035	39	1380	15,5	0,16	6,05	URSA XPS
PU	0,025	37	1400	11,1	0,11	4,11	Brillux PUR Smart
Mineralfaserplatte	0,036	99	855	15,9	0,16	15,74	/
Mineralschaum-platte	0,045	102,5	850	19,9	0,20	20,40	STO WDVS
Schaumglas	0,0405	115	1000	17,9	0,18	20,59	FOAMGLAS T3+
Holzfaserdämm-platte (nass)	0,0485	243,75	2100	21,5	0,22	52,41	STEICOprotect
Holzfaserdämm-platte (trocken)	0,042	143,3	2100	18,6	0,19	26,65	STEICOprotect dry

©ifeu

Abbildung 2-9: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für Außenwände mit Wärmedämmverbundsystem

Außenwand leicht



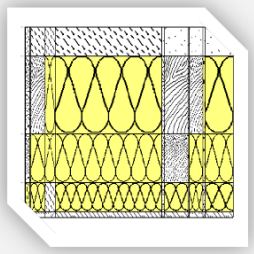
U-Wert = 0,2 W/m²*K

Dämmstoff	Dämmeigenschaften			Ergebnisse			Quelle
	Wärme-leitfähigkeit [W/(m*K)]	Dichte [kg/m³]	Spez. Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	Dämmdicke [cm]	Volumen [m³]	Masse [kg]	
EPS	0,036	23	1500	14,5	0,15	3,34	/
Mineralfaserplatte	0,036	99	855	14,5	0,15	14,36	/
Glaswollematte	0,035	56,5	1030	14,1	0,14	7,97	ISOVER Integra ZKF
Mineralschaum-platte	0,0445	102,5	850	18	0,18	18,45	STO WDVS
Holzfaserdämm-platte (nass)	0,048	240	2100	19,3	0,19	46,32	STEICOspecial
Holzfaserdämm-platte (trocken)	0,041	131,1	2100	16,5	0,17	21,63	STEICOprotect dry
Flexible Holzmatte	0,038	60	2100	15,3	0,15	9,18	STEICOflex
Hanffasermatten	0,044	37,5	2300	17,7	0,18	6,64	Thermohanf Premium Plus
Jute	0,038	37	2350	15,3	0,15	5,66	Thermojute
Holzfasereinblasdämmung	0,04	32,5	2100	16,1	0,16	5,23	GUTEX Thermofibre
Zellulose	0,0395	41,5	2100	15,9	0,16	6,60	STEICOfloc

©ifeu

Abbildung 2-10: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für leichte Außenwände (Holzständerbauweise)

Steildach



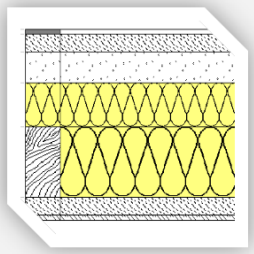
U-Wert = 0,192 W/m²*K

Dämmstoff	Dämmeigenschaften			Ergebnisse			Marke
	Wärme-leitfähigkeit [W/(m*K)]	Dichte [kg/m³]	Spez. Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	Dämmdicke [cm]	Volumen [m³]	Masse [kg]	
EPS	0,035	23	1500	17	0,17	3,91	ISOVER Rigitec
PU	0,023	33	1400	11,2	0,11	3,70	LINITHERM PAL N+F
Mineralfaser-platte	0,036	99	855	17,5	0,18	17,33	/
Glaswollematte	0,035	56,5	1030	17	0,17	9,61	ISOVER Integra ZKF
Mineralschaum-platte	0,045	105	850	21,9	0,22	23,00	Multipor
Holzfaserdämm-platte (nass)	0,048	240	2100	23,3	0,23	55,92	STEICOspecial
Holzfaserdämm-platte (trocken)	0,039	110	2100	19	0,19	20,90	STEICOtherm dry
Flexible Holzmatte	0,038	60	2100	18,5	0,19	11,10	STEICOflex
Hanffasermatten	0,044	37,5	2300	21,4	0,21	8,03	Thermohanf Premium Plus
Jute	0,038	37	2350	18,5	0,19	6,85	Thermojute
Holzfasereinblas-dämmung	0,04	32,5	2100	19,4	0,19	6,31	STEICOzell
Zellulose	0,0395	41,5	2100	19,2	0,19	7,97	STEICOfloc

©ifeu

Abbildung 2-11: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für Steildächer

Flachdach leicht



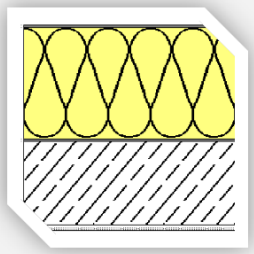
U-Wert = 0,16 W/m²*K

Dämmstoff	Dämmeigenschaften			Ergebnisse			Marke
	Wärme-leitfähigkeit [W/(m*K)]	Dichte [kg/m³]	Spez. Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	Dämmdicke [cm]	Volumen [m³]	Masse [kg]	
EPS	0,032	23	1500	21,7	0,22	4,99	ISOVER RigiRoof
XPS	0,0365	39	1380	23,7	0,24	9,24	/
PU	0,023	33	1400	18,4	0,18	6,07	LINITHERM PAL N+F
Mineralfaserplatte	0,036	99	855	23,5	0,24	23,27	/
Glaswollematte	0,035	56,5	1030	23	0,23	13,00	ISOVER Integra ZKF
Mineralschaum-platte	0,045	105	850	27,4	0,27	28,77	Multipor
Schaumglas	0,036	99	1000	25,5	0,26	25,25	FOAMGLAS T3+
Holzfaserdämm-platte (nass)	0,048	240	2100	28,9	0,29	69,36	STEICOspecial
Holzfaserdämm-platte (trocken)	0,0405	125	2100	25,5	0,26	31,88	STEICOtherm dry
Flexible Holzmatte	0,037	55	2100	24,3	0,24	13,37	/
Hanffasermatten	0,044	37,5	2300	27	0,27	10,13	Thermohanf Premium Plus
Jute	0,038	37	2350	24,3	0,24	8,99	Thermojute
Holzfasereinblas-dämmung	0,04	32,5	2100	25	0,25	8,13	STEICOzell
Zellulose	0,0395	41,5	2100	25	0,25	10,38	STEICOfloc

©ifeu

Abbildung 2-12: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für leichte Flachdächer

Flachdach schwer



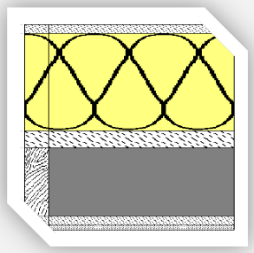
U-Wert = 0,16 W/m²*K

Dämmstoff	Dämmeigenschaften			Ergebnisse			Marke
	Wärme-leitfähigkeit [W/(m*K)]	Dichte [kg/m³]	Spez. Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	Dämmdicke [cm]	Volumen [m³]	Masse [kg]	
EPS	0,032	23	1500	19,1	0,19	4,39	ISOVER RigiRoof
XPS	0,0365	39	1380	21,8	0,22	8,50	/
PU	0,023	37	1400	13,7	0,14	5,07	LINITHERM PAL
Mineralfaserplatte	0,04	99	855	23,8	0,24	23,56	Rockwoll Durock
Mineralschaum-platte	0,045	105	850	26,8	0,27	28,14	Multipor
Schaumglas	0,045	105	1000	24,1	0,24	25,31	FOAMGLAS T3+
Holzfaserdämm-platte (nass)	0,048	240	2100	28,6	0,29	68,64	STEICOspecial
Holzfaserdämm-platte (trocken)	0,042	140	2100	25	0,25	35,00	STEICOsystem dry

©ifeu

Abbildung 2-13: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für schwere Flachdächer

Oberste Geschossdecke



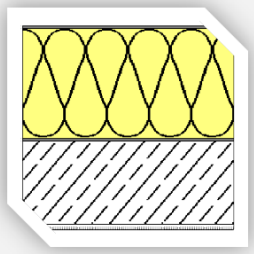
U-Wert = 0,16 W/m²*K

Dämmstoff	Dämmeigenschaften			Ergebnisse			Marke
	Wärme-leitfähigkeit [W/(m*K)]	Dichte [kg/m³]	Spez. Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	Dämmdicke [cm]	Volumen [m³]	Masse [kg]	
EPS	0,032	23	1500	16,4	0,16	3,77	ISOVER RigiRoof
XPS	0,0365	39	1380	18,7	0,19	7,29	/
PU	0,023	33	1400	11,8	0,12	3,89	LINITHERM PAL N+F
Mineralfaserplatte	0,036	99	855	18,5	0,19	18,32	/
Glaswollematte	0,035	56,5	1030	18	0,18	10,17	ISOVER Integra ZKF
Mineralschaum-platte	0,045	105	850	23	0,23	24,15	Multipor
Schaumglas	0,045	105	1000	20,8	0,21	21,84	FOAMGLAS T3+
Holzfaserdämm-platte (nass)	0,048	240	2100	24,6	0,25	59,04	STEICOspecial
Holzfaserdämm-platte (trocken)	0,0405	125	2100	20,8	0,21	26,00	STEICOtherm dry
Flexible Holzmatte	0,037	55	2100	19,5	0,20	10,73	/
Hanffasermatten	0,044	37,5	2300	22,6	0,23	8,48	Thermohanf Premium Plus
Jute	0,038	37	2350	19,5	0,20	7,22	Thermojute
Holzfasereinblas-dämmung	0,04	30		20,2	0,20	6,06	STEICOzell
Zellulose	0,0395	41,5	2100	20,2	0,20	8,38	STEICOfloc

©ifeu

Abbildung 2-14: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für leichte oberste Geschossdecken

Oberste Geschossdecke



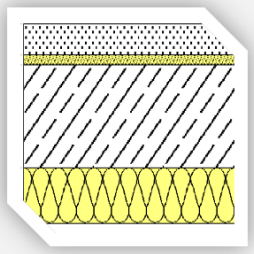
U-Wert = 0,16 W/m²*K

Dämmstoff	Dämmeigenschaften			Ergebnisse			Marke
	Wärme-leitfähigkeit [W/(m*K)]	Dichte [kg/m³]	Spez. Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	Dämmdicke [cm]	Volumen [m³]	Masse [kg]	
EPS	0,032	23	1500	18,9	0,19	4,35	ISOVER RigiRoof
XPS	0,0365	39	1380	21,6	0,22	8,42	/
PU	0,023	37	1400	13,6	0,14	5,03	LINITHERM PAL
Mineralfaser-platte	0,04	99	855	23,6	0,24	23,36	Rockwoll Durock
Mineralschaum-platte	0,045	105	850	26,5	0,27	27,83	Multipor
Schaumglas	0,045	105	1000	23,9	0,24	25,10	FOAMGLAS T3+
Holzfaserdämm-platte (nass)	0,048	240	2100	28,3	0,28	67,92	STEICOspecial
Holzfaserdämm-platte (trocken)	0,042	140	2100	24,7	0,25	34,58	STEICOsystem dry
Holzfasereinblas-dämmung	0,04	32,5	2100	23,6	0,24	7,67	STEICOzell
Zellulose	0,0395	41,5	2100	23,3	0,23	9,67	STEICOfloc

©ifeu

Abbildung 2-15: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für schwere oberste Geschossdecken

Kellerdecke



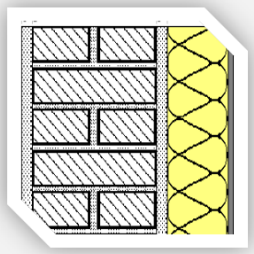
U-Wert = 0,25 W/m²*K

Dämmstoff	Dämmeigenschaften			Ergebnisse			Marke
	Wärme-leitfähigkeit [W/(m*K)]	Dichte [kg/m³]	Spez. Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	Dämmdicke [cm]	Volumen [m³]	Masse [kg]	
EPS	0,035	23	1030	9,9	0,10	2,28	ISOVER topdec
XPS	0,035	39	1380	10,8	0,11	4,21	URSA XPS
PU	0,023	33	1400	7,1	0,07	2,34	LINITHERM PAL GK
Mineralfaserplatte	0,036	99	855	11,15	0,11	11,04	/
Glaswollematte	0,035	56,5	1030	10,8	0,11	6,10	ISOVER Integra UKF
Mineralschaum-platte	0,045	105	850	13,9	0,14	14,60	Multipor
Schaumglas	0,045	105	1000	12,5	0,13	13,13	FOAMGLAS T3+
Holzfaserdämm-platte (nass)	0,048	240	2100	14,85	0,15	35,64	STEICOspecial
Holzfaserdämm-platte (trocken)	0,0405	125	2100	12,5	0,13	15,63	STEICOsystem dry
Flexible Holzmatte	0,038	60	2100	11,75	0,12	7,05	STEICOflex
Hanffasermatten	0,044	37,5	2300	13,6	0,14	5,10	Thermohanf Premium Plus
Jute	0,038	37	2350	11,75	0,12	4,35	Thermojute
Holzfasereinblas-dämmung	0,04	32,5	2100	12,35	0,12	4,01	STEICOzell
Zellulose	0,0395	41,5	2100	12,2	0,12	5,06	STEICOfloc

©ifeu

Abbildung 2-16: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für Kellerdecken mit Dämmung von unten

Kellerwand von außen



U-Wert = 0,25 W/m²*K

Dämmstoff	Dämmeigenschaften			Ergebnisse			Marke
	Wärme-leitfähigkeit [W/(m*K)]	Dichte [kg/m³]	Spez. Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	Dämmdicke [cm]	Volumen [m³]	Masse [kg]	
EPS	0,035	23	1500	10,8	0,11	2,48	ISOVER Perimeter
XPS	0,036	39	1380	12,19	0,12	4,75	URSA DN-III-L
PU	0,0275	37	1400	9,3	0,09	3,44	IVPU PUR
Schaumglas	0,045	130	1000	15,2	0,15	19,76	FOAMGLAS S3

©ifeu

Abbildung 2-17: Nutzengleiche Dämmstärken verschiedener Dämmstoffe für Kellerwände mit Dämmung von außen (Perimeter)

3 Dämmstoffe - Prozessdaten

3.1 Die Produktion der Dämmstoffe

Für alle diskutierten Dämmstoffalternativen liegen Informationen und Datensätze vor, die deren Herstellung und ihren Einsatz in den Bauwerken aus Umweltsicht abbilden können. Ziel des Forschungsprojektes war es, diese Datensätze zu recherchieren, auszuwerten, zu plausibilisieren und für die ganzheitliche Bewertung der Dämmstoffalternativen zu nutzen. Der Fokus lag auf der erstmaligen Aufstellung der Entsorgungsoptionen und ihrer Bilanzierung. Mit dem Forschungsprojekt wurden nur vorhandene Datensätze für die Produktion der Dämmstoffe übernommen und nicht neu erhoben.

Die für die Umweltbewertung der Dämmstoffalternativen benötigten Datensätze wurden vom IBO übernommen, dem Österreichischen Institut für Baubiologie und -ökologie aus Wien. Das IBO prüft und bewertet Bauprodukte, vergibt das IBO Prüfzeichen und führt Prüfungen nicht nur für den Projektpartner natureplus sondern auch für das Österreichische Umweltzeichen durch. Es verfügt damit über eine große Datenbank zu einzelnen Dämmstoffen, die für das Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt wurden. Informationen zu einzelnen Produkten können auch der Produktdatenbank von natureplus https://www.natureplus-database.org/produkte.php entnommen werden. Das Forschungsprojekt wurde durch einen Beirat kritisch begleitet, der sich aus Vertretern auch von Herstellern und –verbänden zusammensetzte. Erneute Erhebungen fanden nur dann statt, wenn bei den Verwertungsoptionen der Rückführung von Altmassen in die Produktion genauere Kenntnisse zu einzelnen Prozessen notwendig wurden.

Im Folgenden erfolgt eine kurze Darstellung der unterschiedlichen Herstellungsprozesse für die einzelnen Dämmstoffe.

Produktion von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen

Die für diese Studie betrachteten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen aus den Basisrohstoffen Holz, Hanf und Jute.

Die auf Holz basierenden Dämmstoffe (Einblasdämmung, flexible Matten, feste Platten) bestehen aus Holzfasern. Der Basisrohstoff Holz wird in Form von Holzhackschnitzeln einem Zerfaserungsprozess zugeführt. Dieser Prozessschritt ist bei allen Holzfaserdämmstoffen identisch.
Bei der Holzfasereinblasdämmung erfolgt lediglich eine anschließende Trocknung und Imprägnierung der Fasern mit Flammenschutzmittel.
Bei der Herstellung der flexiblen Matten aus Holzfasern erfolgt neben einer Zugabe von Flammenschutzmittel zudem eine Zugabe von Bi-Komponentenfasern (auch Stützfaser oder Bindefaser genannt, abgebildet als PET, PP und PA aus fossilen Rohstoffen), die dem Zusammenhalt der Fasern dienen. Die Verbindung der Bi-Komponentenfasern mit den Holzfasern erfolgt bei einer thermischen Aktivierung mittels Heißluft.
Bei der Herstellung von festen Dämmstoffplatten auf Holzbasis wird zwischen dem nassen und dem trockenen Herstellungsverfahren unterschieden. Beim deutlich energieintensiveren nassen Herstellungsverfahren werden die Holzfasern unter Wärmezugabe zu einem Faserbrei vermischt und anschließend geformt, gepresst und getrocknet. Bei dem trockenen Herstellungsverfahren entfällt die Herstellung eines Faserbreis. Stattdessen werden die Fasern getrocknet und mit Harzkleber besprüht, so dass sich diese nach einer anschließenden Verteil-

lung und Pressung zu dünnen Holzfaserplatten verarbeiten lassen. Je nach erforderlicher Dicke werden die einzelnen Platten zu einer dickeren Platte, dem eigentlichen Endprodukt, verleimt.

Die Herstellung von Hanf- und Jutedämmmatten erfolgt im Prinzip ähnlich dem der Holzmatten. Nachdem aus den jeweiligen Rohstoffen die Fasern erschlossen wurden, werden diese mit Brandschutzmittel imprägniert, anschließend mit Bi-Komponentenfasern vermischt und im weiteren Prozessschritt thermisch im Durchlaufofen verfestigt und mit diesen verbunden. Die Bi-Komponentenfasern sind grundsätzlich auf PET-Basis hergestellt. Vereinzelt kommen aber auch Bi-Komponentenfasern auf rein pflanzlicher Basis zum Einsatz (hier nicht abgebildet).

Während für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen Stammholz in seiner Gesamtheit genutzt wird und dessen Anbau gezielt zum Zweck der Dämmstoffherstellung geschieht, handelt es sich bei den Rohstoffen der Hanf- und Jutedämmstoffe um Nebenprodukte.
Der Anbau von Hanf dient vornehmlich der Herstellung von Lebensmitteln (Samen, Ölen). Entsprechend werden die Umweltlasten für den landwirtschaftlichen Anbau diesen Produkten zugeordnet, die eigentliche Hanfpflanze ist Abfall oder Nebenprodukt dieser Produktionsprozesse.
Die Jute wird aus der Verwertung von Jutesäcken gewonnen, die zum Transport von Kakaobohnen genutzt wurden. Die Firma Ritter Sport aus Waldenbuch stellt diese Jutesäcke für eine Weiterverwendung zur Verfügung. Entsprechend klein sind die Massenflüsse, auf dieser Rohstoffbasis hergestellte Dämmstoffe sind demnach zwangsläufig ein Nischenprodukt.
Würde die landwirtschaftliche Produktion von Hanf und Jute den Dämmstoffen zugerechnet, würde sich dies deutlich negativ in der ökologischen Bewertung niederschlagen und das Ergebnis im Vergleich zu anderen Dämmstoffalternativen verschlechtern.

Der betrachtete Zelluloseeinblasdämmstoff besteht aus Altpapier und hier vor allem Zeitungspapier, dessen Ausgangsmaterial ebenfalls Holz ist. Das Altpapier wird in mehreren Prozessschritten zerkleinert, mit Flammenschutzmittel versehen und anschließend gemahlen. Wenn die Zellulose stattdessen primär aus Holz über Holzschliff hergestellt werden müsste, würden sich das Ergebnis verschlechtern.

Produktion von Dämmstoffen aus mineralischen Rohstoffen

Die Herstellung der mineralischen Dämmstoffe Glaswollematte, Mineralfaserplatte (Steinwolle), Schaumglas und Mineralschaumplatte findet prinzipiell auf zwei unterschiedliche Weisen statt. Während bei der Glas- und Steinwolle eine Zerfaserung der Rohstoffe erfolgt, wird für die Herstellung der Mineralschaum- und Schaumglasplatten der mineralische Rohstoff aufgeschäumt.

Um eine Zerfaserung für die Glas- und Steinwolleproduktion zu ermöglichen, müssen die verwendeten mineralischen Rohstoffe in flüssiger Form vorliegen und damit zunächst eingeschmolzen werden. Bei der Glaswolleherstellung kommt als Basisrohstoff vor allem Altglas zum Einsatz, bei der Steinwolle hingegen verschiedene Gesteine (z.B. Diabas oder Basalt). Die aus den eingeschmolzenen Rohstoffen hergestellten Fasern (Prozess ähnlich der Zuckerwatte-Produktion) werden mit Bindemittel versehen und später im Ofen gehärtet. Zur Herstellung von festen Mineralfaserplatten erfolgt vor und während der Härtung zusätzlich noch eine Pressung.

Wie die Glaswolle, besteht auch die Schaumglasplatte zum Teil aus recyceltem Altglas. Die Mineralschaumplatte besteht dagegen größtenteils aus Sandmehl. Die Herstellung beider Dämmstoffe folgt einem ähnlichen Prozessablauf. Die Basisrohstoffe werden zu Beginn fein gemahlen und vermischt. Im Anschluss erfolgt die Aufschäumung. Diese läuft bei der Mineralschaumplatte durch die Löschung des enthaltenen Branntkalkes ab, bei der Schaumglasplatte durch eine starke Erhitzung im Aufschäumungsofen, der die Rohstoffe erweicht. Zuletzt erfolgt eine Aushärtung der Mineralschaumplatte mittels Dampfhärtung unter Druck. Die Schaumglasplatte dagegen wird in einem Streckofen langsam abgekühlt. Beide Dämmstoffplatten weisen am Ende eine hohe Festigkeit auf.

Produktion von Dämmstoffen aus synthetischen Rohstoffen

Die Dämmstoffe EPS, XPS und PU bestehen aus erdölbasierten Kunststoffen. EPS und XPS werden aus Polystyrol (PS) hergestellt.

Die EPS-Herstellung erfolgt in zwei grundlegenden Schritten, dem Vorschäumen des PS-Granulates, welches bereits ein Treibmittel enthält, und dem Ausschäumen, bei dem die zuvor erzeugten EPS-Kügelchen unter Hitze in Form gepresst oder geschäumt werden.

Bei der Herstellung von XPS wird PS-Granulat mittels Extruder direkt zu Blöcken oder Platten unter Zugabe von Treibmittel aufgeschäumt. Die Unterschiede der beiden Dämmstoffe liegen in der jeweiligen Struktur. EPS besteht aus einzeln aufgeschäumten Kügelchen, XPS dagegen aus einer geschlossenen Matrix kleiner Zellen. Als Treibmittel wird hier Kohlendioxid betrachtet.

Bei der PU-Herstellung erfolgt eine chemische Reaktion von Methylendiisocyanaten und Polyolen zu Polyurethan, das unter Zugabe eines Treibmittels aufgeschäumt wird. Zur Anwendung kommt entweder eine Herstellung im Blockschaumverfahren oder im Doppelbandverfahren, bei dem das Reaktionsgemisch auf eine Deckschicht aufgebracht und mit dieser verklebt aufschäumt.

Ökobilanzdaten für die Abbildung der Produktion

Die Daten zur Abbildung der Umweltlasten, die durch die Produktion von der Wiege bis zum Fabriktor verursacht werden, sind in Datenbanken wie bspw. der [Ökobaudat]-Ökobilanzdatenbank verfügbar. In dieser Studie wird nicht auf die Ökobaudat, sondern auf die entsprechenden Prozessmodule des IBO-Instituts zurückgegriffen. Dieses weißt die Werte der in dieser Studie betrachteten Indikatoren (siehe Kapitel 4.3) massespezifische aus, was folgende Vorteile hat: Die IBO-Datenbank bezieht sich auf aktuelle Untersuchungen und Messungen in der Industrie und repräsentiert jeweils den schlechtesten Fall. Sie beruht auf vielen Datensätzen, insbesondere auch zu Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Die Umweltlasten, die mit dem Strombedarf in der Produktion verbunden sind, werden einheitlich über alle Dämmstoffe hinweg unabhängig vom Produktionsstandort über den Energieträgermix des EU-Strommixes (ENTSO-E) abgebildet. Zur Deckung des Prozesswärmebedarfs wird bei den Dämmstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen einheitlich die Verfeuerung von Erdgas in einem Gaskessel angesetzt. Dadurch wird eine Vergleichbarkeit der Dämmstoffe unter einheitlichen Rahmenbedingungen ermöglicht.

Die Prozessdaten wurden dem ifeu in einer modularen, also aufgeschlüsselten Form übermittelt, so dass die Beiträge von einzelnen Rohstoffen und der Prozessenergie zu den Umweltlasten vorliegen, um damit Einsparpotenziale durch stoffliche Verwertung und Rückführung in die Produktion ableiten zu können. Dadurch ist ersichtlich, wodurch die Umweltlasten der Produktion verursacht werden. Weiterhin sind die Lasten durch die Verpackung separat ausgewiesen, so dass die Ergebnisse ohne Verpackung berechnet werden können. Die Produktion von Jutedämmstoffen wird hier abweichend vom IBO-Datensatz ohne Lasten für die landwirtschaftliche Produktion der Jutefasern berechnet, weil dafür in Deutschland wie oben beschrieben gebrauchte Jutesäcke verwendet werden. Dies ist möglich, weil die Umweltlasten der primären Jutefaserproduktion im Datensatz separat aufgeführt sind.

Die Ökobaudat liefert bei den meisten Dämmstoffen niedrigere Lasten, beim Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial sind diese sogar deutlich niedriger. Ausnahmen sind Holzmatten und Hanfdämmstoffe. Für Jutedämmstoffe und Glaswolle liegen in der Ökobaudat keine Vergleichswerte vor. Die Umweltlasten aus der Hanffaserproduktion fallen im IBO-Datensatz sehr klein aus im Vergleich zu denjenigen in der ecoinvent 3.6-Ökobilanzdatenbank und eigenen Daten, weil nur ein geringer Teil der landwirtschaftlichen Produktion der Hanfpflanze den Fasern angelastet wird.

Die IBO-Datenbank baut auf Hintergrunddaten aus der ecoInvent-Datenbank auf [ecoinvent], die Ökobaudat hingegen auf diejenigen aus der GaBi-Datenbank [GaBi]. Um einen Anhaltswert für den daraus resultierenden Unterschied zu haben, hat das IBO seine Daten in einem nächsten Schritt mit GaBi- anstatt ecoinvent-Hintergrunddaten berechnet. Dafür kommen teilweise leicht adaptierte Methoden zum Einsatz, was neben den tatsächlich anderen Sachbilanzdaten zu einem Teil der Unterschiede beitragen kann. Daraus zeigt sich, dass die Umweltlasten mit ecoinvent-Hintergrunddaten zumeist (deutlich) größer ausfallen als die Berechnungen mit GaBi-Hintergrunddaten. Insbesondere gilt dies unter den hier näher betrachteten Wirkungskategorien für das Versauerungspotenzial. Weiterhin gilt dies für das hier nicht näher betrachtete stratosphärisch Ozonabbaupotenzial, bei dem teilweise Abweichungen um bis zu mehr als zwei Größenordnungen auftreten. Eine Ausnahme hingegen ergibt sich für das Eutrophierungspotenzial der Dämmstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen sowie der Mineralfaser- und Schaumglasplatte, bei denen mit ecoinvent- geringere Umweltlasten im Vergleich zur Berechnung mit GaBi-Hintergrunddaten entstehen. Auch das POCP (Sommersmog)-Potenzial fällt mit den GaBi-Hintergrunddaten bei einigen Dämmstoffen größer aus. Dies kann einen Teil der Unterschiede zwischen der IBO-Datenbank und der Ökobaudat erklären. Das Verhältnis von Ökobaudat zu IBO-Datenbank für die verschiedenen Dämmstoffe verhält sich aber nicht immer gleichläufig zum Verhältnis der zugehörigen GaBi- zu ecoinvent-Hintergrunddaten. Bei den Dämmstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen müsste das Eutrophierungspotenzial demnach in der Ökobaudat eigentlich größer ausfallen als nach der IBO-Datenbank, genau das Gegenteilige ist aber der Fall.

3.2 Dämmstoffe – Einsatz und Rückbau

Je nach Einbauweise variiert sowohl der Rückbauaufwand als auch der Reinheitsgrad des rückgebauten Dämmstoffes. Vor allem der Reinheitsgrad des Dämmstoffes ist in vielen Fällen ausschlaggebend für die Realisierung eines erfolgreichen stofflichen Recyclings.

Der Rückbau des Dämmstoffes kann sowohl von Hand als auch unter Einsatz von großen Baumaschinen erfolgen. Hierbei sind der jeweilige Einsatzort und die Methode zur Befestigung der Dämmstoffe ausschlaggebend. Während bei Außenanwendungen schweres Gerät zum Einsatz kommen kann, muss bei Innenanwendungen auf Handarbeit und kleines Gerät zurückgegriffen werden. Wie bereits erläutert, kann eine Vielzahl der betrachteten Dämmstoffe in diversen Bauteilen eines Gebäudes eingesetzt werden. Der Rückbauaufwand ist somit primär vom Anwendungsfall abhängig und weniger vom eingesetzten Dämmstoff. Je nach Anwendung kann der Dämmstoff somit lose verlegt, mechanisch befestigt oder verklebt vorliegen.

Für die Ökobilanzierung ist der Zustand des Dämmstoffes nach dem Rückbau entscheidender als der Rückbauaufwand. Ein sortenreines Vorliegen des jeweiligen Dämmstoffes als Monofraktion ist insbesondere für die zukünftigen Entsorgungswege von erhöhter Bedeutung. Ferner wird der Zerstörungsgrad des Dämmstoffes berücksichtigt, der sich anhand der Befestigungsart und Beschaffenheit des Dämmstoffes unterscheidet. Somit wird davon ausgegangen, dass beim Rückbau entfernte oder abgesprungene Kleinstteile nicht der Monofraktion hinzugefügt, sondern über den gemischten Bau- und Abbruchabfall (AVV 17 09 04) entsorgt werden. In der Studie der Forschungsinitiative Zukunft Bau [Graubner & Clanget-Hulin 2013] wurde dieser Massenverlust für verschiedene Dämmstoffe ermittelt und bildet die Grundlage für die Bilanzierung der Dämmstoffalternativen (Kap. 3.2.3).

Für alle Dämmstoffe wird einheitlich von einem Transport zum Einsatzort per LKW über eine Strecke von 100 km und ebenso von einer in Summe 100 km lange Strecke im Zuge der Entsorgung ausgegangen. Diese wurde unabhängig vom Entsorgungsweg angesetzt. Die aufgrund der verschiedenen Dämmstoffdichten unterschiedlichen Auslastungsgrade werden berücksichtigt.

3.2.1 Lose (trocken)

Lose verlegte Dämmstoffe kommen vorranging in der Zwischensparrendämmung z.B. in Steil- und leichten Flachdächern zum Einsatz. Dabei handelt es sich um flexible Dämmmatten oder leicht komprimierbare Dämmplatten, die zwischen die Sparren geklemmt werden können. Grundsätzlich lassen sich auch feste Dämmstoffplatten wie z.B. Mineralschaum- oder Schaumglasplatten lose verbauen. Dies ist laut Aussage der Hersteller aber eher eine Nischenanwendung.

Der Rückbau dieser lose verlegten Dämmstoffe erfolgt vor allem händisch. Der damit verbundene Aufwand schlägt sich insbesondere ökonomisch nieder. Händische Arbeiten sind für die Ökobilanzen kaum relevant. Der einzige nicht händische Ausbau erfolgt bei den Einblasdämmungen, die aufgrund ihrer rieselfähigen Struktur abgesaugt werden müssen. Die erforderliche Energie für diesen Prozess fließt in die Bilanzierung mit ein. Die Entnahme der lose verlegten Dämmstoffe kann ohne Verluste erfolgen, d.h. die gesamte Masse kann gezielt der Entsorgung übergeben werden. Eine Ausnahme ist die Einblasdämmung, die aufgrund ihrer Beschaffenheit beim Rückbau nicht vollständig erfasst werden kann, was hier aber nicht berücksichtigt wird.

Lose verlegte Dämmstoffe können problemlos sortenrein und unzerstört zurückgebaut werden. Wichtig ist, dass die Sammelgebinde auf der Baustelle ebenfalls sauber und frei von Fremdmaterialien bleiben und nicht zur Entsorgung weiterer Abfallmassen genutzt werden. Vor allem bei der Rückführung in den Produktionsprozess legen die Hersteller erhöhten Wert darauf, keine festen Verunreinigungen wie z.B. Nägel oder Schrauben in der Dämmstofffraktion zu haben, da diese in der Aufbereitung und hier im Zerkleinerungsprozess Schäden an den Maschinen hervorrufen können.

Sollte keine direkte Absaugung der Einblasdämmung aus dem Zwischenraum in Big Bags erfolgen, ist ebenfalls eine erhöhte Gefahr der Verunreinigung gegeben. Gelangt das Altmaterial zunächst auf den Fußboden und wird anschließend abgesaugt, ist eine Gefahr der Verunreinigung durch auf dem Boden herumliegende Teile gegeben. Böden müssen bei diesem Vorgehen vorab gereinigt werden.

Durch falsche Einbauweisen oder Schäden an der Gebäudestruktur kann es z.B. durch Eintritt von Feuchtigkeit ebenfalls zu Verunreinigungen der Dämmstoffe kommen. Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass in den meisten Fällen eine saubere und sortenreine Trennung möglich ist, können auftretende Verunreinigungen nicht ausgeschlossen werden.

3.2.2 Mechanisch (trocken)

Hierbei handelt es sich um Dämmstoffe, die rein mechanisch und ohne Zuhilfenahme von Klebern befestigt werden. Diese Art der Befestigung ist nur bei festen Dämmstoffplatten möglich. Neben der Verschraubung ist vor allem bei Holzfaserdämmplatten auch das Klammern mit Breitrückenklammern eine gängige Praxis. Pro m² kann eine Dämmplatte nach Anwendungsfall mit bis zu 25 Klammern [Steico 2016] befestigt werden. Nach Aussagen der Hersteller ist ein zerstörungsfreier Rückbau bei dieser Befestigungsmethode nicht möglich. Da die Entfernung der Klammern auf der Baustelle zu aufwendig erscheint, ist eine sortenreine sowie zerstörungsfreie Trennung nicht gegeben.

Bei der gängigeren Befestigungsmethode mittels Schrauben und ggf. Dübeln ist der Rückbauaufwand von rein mechanisch befestigten Dämmstoffen etwas höher als bei lose verlegten Dämmstoffen. Da ein zerstörungsfreier Rückbau in den meisten Fällen möglich ist, erfolgt der Rückbau ohne Dämmstoffverluste, d.h. der gesamte Massenstrom kann einer gezielten Entsorgung übergeben werden.

Anders als bei den lose verlegten Dämmstoffmatten kann bei den festen, rein mechanisch befestigen Dämmstoffplatten keine pauschale Aussage über dessen Zustand der Verschmutzung getroffen werden. Die Verschmutzung ist abhängig vom Anwendungsort der Dämmstoffplatte. Bei Anwendungen an der Außen- oder

Innenwand werden die Dämmplatten häufig verputzt. Werden sie hingegen unter der Deckung im Steildach verwendet, erfolgt auf den Dämmplatten außen lediglich eine mechanische Befestigung der Traglattung für die Dachziegel. Es wird somit davon ausgegangen, dass sowohl saubere als auch verunreinigte Dämmstoffplatten vorliegen.

3.2.3 Verklebt (nass)

Wie auch bei den mechanisch befestigten Dämmstoffen findet eine Verklebung grundsätzlich nur bei festen Dämmstoffen statt. Im Falle einer Nutzung als Wärmedämmverbundsystem (WDVS) erfolgt zusätzlich noch eine mechanische Befestigung in der Gebäudeaußenwand mittels Dübeln und Schrauben.

Der Rückbauaufwand ist für verklebte Dämmstoffe demnach vergleichsweise hoch und wird in der Ökobilanz über einen Strombedarf von 80 Wh/m² gedämmter Fläche berücksichtigt. Hierbei wird auf Daten einer Studie der Forschungsinitiative Zukunft Bau zurückgegriffen, bei welcher der Rückbauaufwand verschiedener Dämmstoffe bei einem WDVS genauer untersucht und beziffert wird [Graubner & Clanget-Hulin 2013]. So erfolgten Erhebungen zum energetischen Aufwand für das Entfernen des Dämmstoffhalters, des Klebers, der Dübel sowie das Entfernen des eigentlichen Dämmstoffes für die verschiedenen Dämmstoffe. Die Entnahme der Dämmstoffe erfolgt nicht ohne Materialverlust.

Dämmstoffe, die verklebt vorliegen, können weder zerstörungsfrei noch sortenrein zurückgebaut werden. Je nach Dämmstoffbeschaffenheit ist der Zerstörungsgrad beim Rückbau unterschiedlich stark ausgeprägt. Gemäß der Studie der Forschungsinitiative Zukunft Bau [Graubner & Clanget-Hulin 2013] ist der Massenverlust bei EPS-Dämmstoffen mit 5 % am höchsten, während für eine Holzfaserdämmplatte ein Verlust von 3,5 % und für eine Mineralfaserplatte ein Verlust von 2 % ermittelt wurde. Für Mineralschaum- und Schaumglasplatten sowie PU liegen bis dato keine Studien zum Massenverlust bei einem Rückbau vor. Für diese wird im Rahmen dieser Stu, ein Massenverlust von 3,5 % angenommen.

Bei einem Einsatz des Dämmstoffes im WDVS liegt eine Verunreinigung auf beiden Seiten des Dämmstoffes vor. Laut des Verbandes für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. (VDPM) (mündliche Mitteilung auf dem 2. Projektbeiratstreffen) ist eine Ablösung der Mörtel- und Putzschicht durch das eingearbeitete Armierungsgewebe in vielen Fällen gut möglich. Auch wenn die verputze Seite des Dämmstoffes sauber vom Putz getrennt werden kann, liegt der Dämmstoff aufgrund der verklebten Seite durch die Kleberanhaftungen dennoch als unrein vor. Allerdings wird davon ausgegangen, dass auch verklebte Dämmstoffe zukünftig stofflich verwertet werden können, wenn diese z.B. mittels Fräse, Bürste oder anderen Behandlungswerkzeugen bereits auf der Baustelle gereinigt werden. Für die Ökobilanz wird für diesen Aufbereitungsaufwand ein Strombedarf von 20 kWh/t angesetzt, wobei sich der Dämmstoffverlust mit Ausnahme von Mineralschaum- und Schaumglasplatten um weitere 2 %-Punkte erhöht.

Folgende Abbildung 3-1 zeigt zusammenfassend eine Übersicht der Rückbaubarkeit und der damit verbundenen Verluste aller betrachteten Dämmstoffe. Mit Hinblick auf den Reinheitsgrad nach Rückbau kann davon ausgegangen werden, dass bei einer trockenen Verbauweise grundsätzlich ein hohes Potential besteht den jeweiligen Dämmstoff sortenrein rückzubauen.

Dämmstoff	Verbauweise					
	Lose (trocken)		Mechanisch (trocken)		Verklebt (nass)	
	Rückbaubarkeit	Verlust	Rückbaubarkeit	Verlust	Rückbaubarkeit	Verlust
Einblasdämmung (Zellulose & Holz)	sehr gut	kein	-	-	-	-
Hanf & Jutematte	sehr gut	kein	-	-	-	-
Holzfasermatte	sehr gut	kein	-	-	-	-
Holzfaserplatte	sehr gut	kein	gut / schlecht**	kein / 100 %**	schlecht	3,5 %
Glaswollematte	sehr gut	kein	-	-	-	-
Mineralfaserplatte	sehr gut*	kein*	gut*	kein*	schlecht	2 %
Schaumglasplatte	sehr gut*	kein*	gut*	kein*	schlecht	3,5
Mineralschaumplatte	sehr gut*	kein*	gut*	kein*	schlecht	3,5 %
EPS	sehr gut*	kein*	gut*	kein*	schlecht	5 %
XPS	-	-	-	-	schlecht	5 %
PU	-	-	-	-	schlecht	3,5 %

* Die lose Verbauweise dieses Dämmstoffes ist möglich, wird laut Hersteller aber nur selten praktiziert
** für eine Verbauweise mittels Klammertechnik

©ifeu

Abbildung 3-1: Übersicht zur Rückbaubarkeit und dem damit verbundenen Massenverlust der betrachteten Dämmstoffe

3.3 Aktuelle Entsorgungswege

Im nächsten Schritt erfolgt eine Zuordnung der Dämmstoffe zu den jeweiligen aktuellen sowie zukünftig möglichen Entsorgungswegen. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass jeder Dämmstoff verschmutzt anfallen kann. Wie bereits erläutert wird aber ebenfalls von der Option ausgegangen, jeden Dämmstoff sauber und sortenrein für die Verwertung bereitstellen zu können, auch wenn dies im Falle von verklebten oder beschichteten Dämmstoffen eine Vorbehandlung wie Sortierung oder mechanischer Bearbeitung (z.B. Fräsen, Bürsten) wahrscheinlich bereits auf der Baustelle notwendig macht.

3.3.1 Müllverbrennungsanlage (MVA)

In einer Müllverbrennungsanlage gelangen die Dämmstoffe in den Bunker, werden dort gemischt und anschließend in der Regel über eine Rostfeuerung verbrannt. In Abhängigkeit von Energieinhalt des Dämmstoffes (Heizwert) entsteht Wärme, die in der Regel über eine Turbine in elektrische Energie verwandelt wird, wobei Teile der im Überschuss verbleibenden Wärme ausgekoppelt und als solche vermarktet werden. Die Strom- und Wärmeausbeute variiert je nach Verfahren und Anlagenalter. Im Rahmen dieser Ökobilanz wird ein mittlerer elektrischer Brutto-Wirkungsgrad von 10 $\%_{el}$ und ein thermischer von 32 $\%_{th}$ zugrunde gelegt.

Der so erzeugte Strom wird in das allgemeine Stromnetz eingespeist und ersetzt dort rechnerisch die äquivalente Menge Strom, die konventionell gemäß dem deutschen Strommix erzeugt werden müsste. Diese Energieerzeugung ist ebenfalls mit Umweltlasten verbunden, die so energieäquivalent substituiert werden können. Für

die Wärme wird eine Auskopplung in ein Fernwärmenetz unterstellt und ersetzt dort Wärme aus Gasheizungen mit den zugehörigen Bereitstellungslasten. Die Höhe der Einsparungen ist abhängig vom Heizwert des jeweils betrachteten Dämmstoffes.

Die durch den Verbrennungsprozess entstehenden Emissionen werden als Umweltlasten in der Bilanzierung berücksichtig und variieren je nach Elementarzusammensetzung des Dämmstoffes (Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2). Die Abreinigungsleistung für stoffabhängige Emissionen sowie die abgasabhängigen Emissionen werden nach ifeu-internen Daten zu den MVAs in Deutschland angesetzt.

Die Dämmstoffe erreichen die MVA entweder als Monofraktion, oder als Ersatzbrennstoff (EBS). Bei der EBS-Herstellung werden die Dämmstoffe zunächst aus den gemischten Bau- und Abbruchabfällen (AVV 17 09 04) von der mineralischen Fraktion getrennt und anschließend in einer Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlage mit anderen brennbaren Abfällen zu EBS aufbereitet. Eventuelle Lasten für die Sortierung oder EBS-Aufbereitung vor der MVA werden nicht berücksichtigt.

Saubere sowie verschmutze Dämmstoffe können gleichermaßen in einer MVA entsorgt werden. Vorangehende Reinigungsprozesse der Dämmstoffe sind nicht erforderlich. Restfraktionen, die durch die Demontage oder nachträglichen Reinigung von verklebten Dämmstoffplatten entstehen, werden ebenfalls über diesen Weg beseitigt. Dies gilt für Dämmstoffplatten aus nachwachsenden sowie synthetischen Rohstoffen.

<u>Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen:</u>
Die Holzfaserdämmstoffe in Form von loser Einblasdämmung, Platten sowie flexiblen Matten eignen sich mit ihrem Heizwert (Tabelle 3-1) zur energetischen Verwertung. Die lose vorliegende Einblasdämmung aus Holz wird beim Rückbau abgesaugt und komprimiert, was dazu führt, das sich die Flocken ineinander verzahnen und eine stabile handhabbare Struktur annehmen. Des Weiteren erfolgt eine Vermischung mit anderen Abfällen in dem Bunker der MVA. Ein Auffliegen einzelner loser Flocken im Brennprozess kann laut Hersteller (mündliche Mitteilung auf dem 2. Projektbeiratstreffen) ausgeschlossen werden. Das gleiche Prinzip gilt für die Zellulose Einblasdämmung. Wie die flexiblen Holzfasermatten können auch die flexiblen Hanf- und Jutematten einer MVA zugeführt werden.

<u>Dämmstoffe aus synthetisch organischen Rohstoffen:</u>
Die Dämmstoffplatten aus synthetischen Rohstoffen weisen einen hohen Heizwert auf (Tabelle 3-2) und lassen sich ebenfalls energetisch in einer MVA verwerten.

Elementarzusammensetzung der Dämmstoffe zur Abbildung der Verbrennungsemissionen und Heizwerte

In den Datensätzen des ifeu zur Abbildung der thermischen Behandlung der Dämmstoffe in MVAs, Zementwerken und Biomasse-HKWs werden die inputabhängigen Emissionen aus der jeweiligen Elementarzusammensetzung der verbrannten Dämmstoffe berechnet. Dafür werden Transferfaktoren in die Luft genutzt, welche die Abreinigungserfolge der jeweiligen Rauchgasreinigung berücksichtigen. Zur Abschätzung der Elementarzusammensetzung werden die einzelnen Inhaltsstoffe der Dämmstoffe betrachtet. Dabei wird auf Angaben des IBO-Instituts zu den in den Produktionsdaten abgebildeten Dämmstoffen zurückgegriffen. Für die einzelnen Materialien werden dann, soweit vorhanden, die in [Doka 2007] angegebenen Elementarzusammensetzungen herangezogen. Für Flammschutzmittel und weitere Additive, Bindemittel, Treibmittel werden die jeweiligen Summenformeln eruiert und daraus über die molaren Massen die Massenverhältnisse der Elemente errechnet.

Für Zellulose werden die Angaben für Zeitungspapier aus [EI 2007] übernommen, für Hanf- und Jutefasern sind dort hingegen keine Angaben vorhanden. Daher werden aus [Franck 2005] zunächst die darin enthaltenen Massenanteile an Cellulose, Hemi-Cellulose, Lignin und Pektin ermittelt. Weiter werden die Summenformeln für diese Substanzen ebenso über Literaturdaten abgeschätzt (Hemi-Cellulose aus [Singh & Chandel 2018]), wobei für Lignin die Unterschiede zwischen Hanf- und Jutefasern Berücksichtigung finden. In bspw. [Ghaffar & Fan

2013] sind die Anteile an H/S/G (Cumarylalkohol/ Coniferylalkohol/Sinapylalkohol) im Lignin von Hanf- und Jutefasern ausgewiesen.

Die Heizwerte der Dämmstoffe werden mittels ihrer Elementarzusammensetzung über folgenden Zusammenhang berechnet:
Hu [MJ/kg] = (34,8 * C + 93,8 * H + 10,46 * S + 6,28 * N – 10,8 * O) – 2,5 * H2O

Zusammenfassend werden die in Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 dargestellten Werte angesetzt.

Tabelle 3-1: Angesetzte Elementarzusammensetzung für die betrachteten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen in (g/kg); Hu = Heizwert

	Zellulose	Hanf	Jute	Holzeinblas	Holzmatten	Holzplatten nass	Holzplatten trocken
Hu (MJ/kg)	11,5	14,9	15,7	15,5	16,4	16,3	16,3
C biogen	328	376	391	424	390	429	419
C fossil	0	41	41	0	46	17	30
H	48	56	57	56	59	56	54
S	1,3	1,2	1,2	12	15	0,13	0,13
O	384	431	415	417	414	399	394
N	0,54	1,5	1,5	12	18	1,0	5,5
Cl	1,1	0,06	0,06	0,35	0,39	0,35	0,35
F	0	8,8e-4	8,8e-4	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabelle 3-2: Angesetzte Elementarzusammensetzung für die Bindemittel (BM) der mineralischen Dämmstoffe und die synthetischen Dämmstoffe in (g/kg); Hu = Heizwert

	BM Glas-wolle	BM Stein-wolle	EPS	XPS	PU
Hu (MJ/kg)	22,0	18,0	37	35	29
C biogen					
C fossil	538	455	868	828	650
H	52	66	78	75	88
S			0,68	0,63	0,19
O	248	413	39	67	170
N	161	65	1,9	1,8	58
Cl			1,1	4,1	23
F			0,01	2,4	0,01

3.3.2 Einsatz im Zementwerk

Für die Herstellung von Zement werden hohe Temperaturen bis 1.450 C benötigt. Für diesen Verbrennungsprozess kommen neben fossilen Energieträgen ebenfalls EBS zum Einsatz. Im Gegensatz zur MVA können Dämmstoff Monofraktionen ab der Baustelle nicht direkt in einem Zementwerk verbrannt werden. Hier ist eine vorherige EBS-Aufbereitung erforderlich, die für erneuerbare Dämmstoffe mit einem Strombedarf in Höhe von 10 und für synthetische Dämmstoffe von knapp 70 kWh/t angesetzt wird. Weiterhin wird eine vorangehende Sortierung in einer Gewerbeabfallsortieranlage mit einem Strombedarf von 20 kWh/t angenommen.

Auch dient die Verbrennung im Zementwerk nicht der Erzeugung von Strom, sondern erfolgt ausschließlich zur Bereitstellung von Wärme für den Prozess der Herstellung von Zementklinker. Durch die Verbrennung der Dämmstoffe wird der Einsatz von Steinkohle substituiert. Dies ist der konventionelle Energieträger für Zementwerke. Steht weniger EBS zur Verfügung, muss die Zementindustrie derzeit noch auf den Einsatz von Steinkohle ausweichen. Die Höhe der diesbezüglichen Einsparung ergibt sich aus dem Heizwert des betrachteten Dämmstoffes.

Die durch den Verbrennungsprozess entstehenden Emissionen werden als Umweltlasten in der Bilanzierung berücksichtig und variieren je nach Elementarzusammensetzung (s. Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2) der Dämmstoffe. Die Abreinigungsleistung für stoffabhängige Emissionen sowie die abgasabhängigen Emissionen werden nach ifeu-internen Daten zu den Zementwerken in Deutschland angesetzt. Sie sind deutlich geringer als in anderen Feuerungsanlagen, was auch bei der Verfeuerung von Steinkohle zu entsprechenden Emissionen führt und die Substitutionserfolge für den EBS-Einsatz bestimmt.

In einem Zementwerk können dieselben Dämmstoffe wie in der MVA sowohl sauber als auch verschmutzt energetisch verwertet werden.

3.3.3 Biomasseheizkraftwerk

In einem Biomasseheizkraftwerk wird mittels Verbrennung von fester Biomasse elektrische Energie und Wärme gewonnen. Die Wirkungsgerade sind mit brutto 25 $\%_{el}$ und 39 $\%_{th}$ deutlich höher als bei einer MVA, die auf die schadlose Beseitigung der Abfallmassen ausgelegt ist. Es wird eine vorangehende Sortierung in einer Gewerbeabfallsortierung mit einem Strombedarf von 20 kWh/t sowie eine Aufbereitung der Dämmstoffe mit einem Strombedarf von 10 kWh/t angesetzt.

Wie auch bei der MVA erfolgt eine Andienung des Dämmstoffes als Monofraktion oder vermischt als Sortierrest vom Bauschuttrecycler mit anderen festen Biomassefraktionen. Wie bei der MVA substituieren die energetisch genutzten Dämmstoffe Energieäquivalente des deutschen Strom- und Wärmemixes bzw. die Wärme aus Gasheizungen. Auch bei diesem energetischen Verwertungsweg sind die Einsparungen und Lasten für die Ökobilanz abhängig vom Heizwert und der elementaren Zusammensetzung des jeweiligen Dämmstoffes (Tabelle 3-1).

In einem Biomasse-HKW sind ausschließlich Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zur energetischen Verwertung zulässig. Diese können sowohl sauber als auch verschmutzt vorliegen.

3.3.4 Deponie

Eine Beseitigung von Dämmstoffen auf einer Deponie bringt ökobilanziell keine Einsparungen mit sich. Lasten entstehen durch den Deponiebetrieb. Seit Mitte 2005 dürfen organische Abfälle nicht mehr unbehandelt deponiert werden. Folglich können ausschließlich mineralische Dämmstoffe auf Deponien beseitigt werden.

Handelt es sich um komprimierbare Dämmstoffe wie Glaswolle, erfolgt zunächst eine Komprimierung mittels Presse, für Glaswolle ist dafür ein Dieselverbrauch von 3,2 L/t angesetzt. Dieser Energieaufwand fließt ebenfalls in die Ökobilanz ein.

Sowohl saubere als auch verschmutze Dämmstoffe können auf der Deponie beseitigt werden. Aktuell werden Glaswolle, Mineralfaserplatten sowie Mineralschaumplatten deponiert. Ferner wird angenommen, dass durch den Rückbau oder Aufbereitung hervorgerufene Verluste der verklebten mineralischen Dämmstoffplatten mit Ausnahme von Schaumglasplatten ebenfalls über diesen Weg beseitigt werden.

3.3.5 Herstellung von Baustoffen

Baustoff aus Schaumglas

Schaumglas wird heute im Falle eines Rückbaus über den gemischten Bauschutt (AVV 170107) entsorgt und damit als Teil eines großen Massenstroms von einem Bauschuttrecycler aufbereitet. Dieser stellt aus diesen Abfallmassen eine Gesteinskörnung her, die im Tiefbau als ungebundene Frostschutz- oder eventuell Schottertragschicht eingesetzt werden kann. Die ungebundenen Schichten werden konventionell aus in Steinbrüchen gewonnenem Splitt aufgebaut. Diese können so massenäquivalent substituiert werden inkl. dessen Abbaulasten. Der im Zuge der Bauschuttaufbereitung benötigte Strom und Dieselverbrauch werden berücksichtigt. Des Weiteren wird angenommen, dass im Falle von verklebten Anwendungen die durch den Rückbau entstehenden Verluste an mineralischen Dämmstoffen ebenfalls über diesen Weg verwertet werden.

Ferner besteht bereits heute die Möglichkeit, aus sauber und sortenrein demontierten Schaumglasplatten durch Zerkleinerung mittels Mühle (Strombedarf 5 kWh/t) Schaumglasschotter herzustellen, der sonst in einem ähnlichen Prozess wie die Schaumglasplatten hergestellt werden müsste. Eingespart werden dadurch die in den Schaumglasplatten enthaltenen Rohstoffe, weitere Lasten der Schaumglasplattenproduktion sowie die Energieaufwände für die Schaumglasschotterproduktion. Es wird angenommen, dass der eingesparte Energieeinsatz für die Schaumglasschotterproduktion 80 % desjenigen der Schaumglasplattenproduktion beträgt. Für eine Rücknahme zur direkten Herstellung von Schaumglasschotter dürfen die Schaumglasplatten weder Bitumenanhaftungen noch weiteren Verschmutzungen aufweisen. Laut Hersteller ist eine Entfernung von aufgeklebten Bitumenbahnen mittels Aufschälen bereits auf den Baustellen möglich [Welter 2008].

Baustoff aus Polyurethan (PU)

Sortenreine und saubere PU-Dämmplatten werden bereits heute zerkleinert und unter Zugabe von Bindemitteln zu Klebepressplatten verarbeitet. Diese Platten kommen beispielsweise zur Dämmung von Fensterrahmen, zur Wärmebrückendämmung oder zur Herstellung von Fußbodenaufbauten zum Einsatz. Durch die weitere Nutzung der PU-Dämmplatten in dieser Form wird die Produktion entsprechender PU-Produkte im nachfolgenden System eingespart.

Es wird davon ausgegangen, dass diese Einsparung 80 % der Lasten der PU-Dämmplattenproduktion betragen, aber kein Prozessstrom eingespart wird. Eine erneute Herstellung von Dämmplatten mit den ursprünglichen Eigenschaften und Einsatzbereichen findet nicht statt.

Baustoff aus EPS

Bereits heute wird sauber rückgebautes sowie HBCD-freies EPS nach Durlaufen der Verfahrensschritte Schreddern und Sieben (angesetzter Strombedarf 10 kWh/t) zur Herstellung von Recyclingplatten verwendet, die zu 100 % aus RC-EPS bestehen [Albrecht & Schwitalla 2015]. Es handelt sich hierbei um ein eigenes Produkt, welches ausschließlich aus recyceltem EPS besteht.

Die EPS-Recyclingplatten kommen v.a. als Drainageplatten mit Dämmeigenschaften oder als Perimeterdämmung zum Einsatz, wodurch vorgeschäumte EPS-Kügelchen als Primärrohstoffe zur Herstellung von Drainageplatten aus neuem PS eingespart werden.

3.3.6 Rückführung in den Herstellungsprozess

Eine Rückführung in die Produktion von rückgebauten Dämmstoffen findet derzeit ausschließlich bei Mineralfaserplatten aus Steinwolle statt. Andere Dämmstoffhersteller könnten eine Rückführung der Dämmstoffe bereits heute technisch umsetzen, stehen aber vor dem Problem der Diskontinuität des Marktes und den nicht ausreichenden Qualitäten der rückgebauten Dämmstoffe. Bei vielen Dämmstoffalternativen ist derzeit zudem das Aufkommen an Altmaterialien noch zu gering.

Rückführung | Mineralfaserplatten

Die Rohstoffe zur Herstellung von Mineralfaserplatten aus Steinwolle werden vor ihrer weiteren Verarbeitung in einem Kupolofen eingeschmolzen. Für das Aufschmelzen in diesem Ofen ist es erforderlich, dass feinkörnige Rohstoffe in eine verarbeitungsfähige Form gebracht werden, was mittels der Einbindung der Altmaterialien in zementgebundene Formsteine erfolgt. In diesen Formsteinen können gemahlene Verschnittreste aus der Produktion sowie zurückgenommene demontierte Mineralfaserplatten verarbeitet und so in den Produktionsprozess zurückgeführt werden.

Leichte Verunreinigungen von Mörtel oder anderen Anhaftungen sind möglich. Feste Verunreinigungen wie Nägel oder Schrauben hingegen dürfen nicht im rückgeführten Materialstrom enthalten sein, da diese zu Beschädigungen an der Mühle führen können.

Der Anteil dieser Formsteine in der Produktion beträgt 50-73 M.-% [EPD-DRW 2108]. Bereits heute bestehen diese Formsteine aus bis zu 40 M.-% aus gemahlenen Steinfasern [Vogdt & Fischer et al. 2019]. In einer kürzlich veröffentlichten Studie der Forschungsinitiative Zukunft Bau „LifeCycle KMF“ wird von einem zukünftigen Faseranteil von bis zu 75 M.-% in den Formsteinen ausgegangen [Vogdt & Fischer et al. 2019]. Bei einem angenommen Formsteinanteil von 50 M.-% in der Produktion entspräche dies einem RC-Anteil von 37,5 M.-% bezogen auf den gesamten Feststoffanteil in der Steinwolleproduktion. Im Rahmen dieser Studie wurde mit einem RC-Anteil von 30 M.-% gerechnet.

Durch eine Rückführung der Dämmstoffe werden die ursprünglich eingesetzten mineralischen Rohstoffe mit Ausnahme von Zement eingespart. Es wird davon ausgegangen, dass durch die Rückführung kein zusätzlicher Zement benötigt wird. Weiterhin wird angenommen, dass dadurch Schmelzenergie eingespart wird, die so groß angesetzt ist wie der Schmelzenergieunterschied für das Aufschmelzen primärer Glasrohstoffe versus Altglas. Für die Rückführung ist eine Zerkleinerung mittels Mühle notwendig, für die ein Strombedarf von 40 kWh/t angesetzt ist.

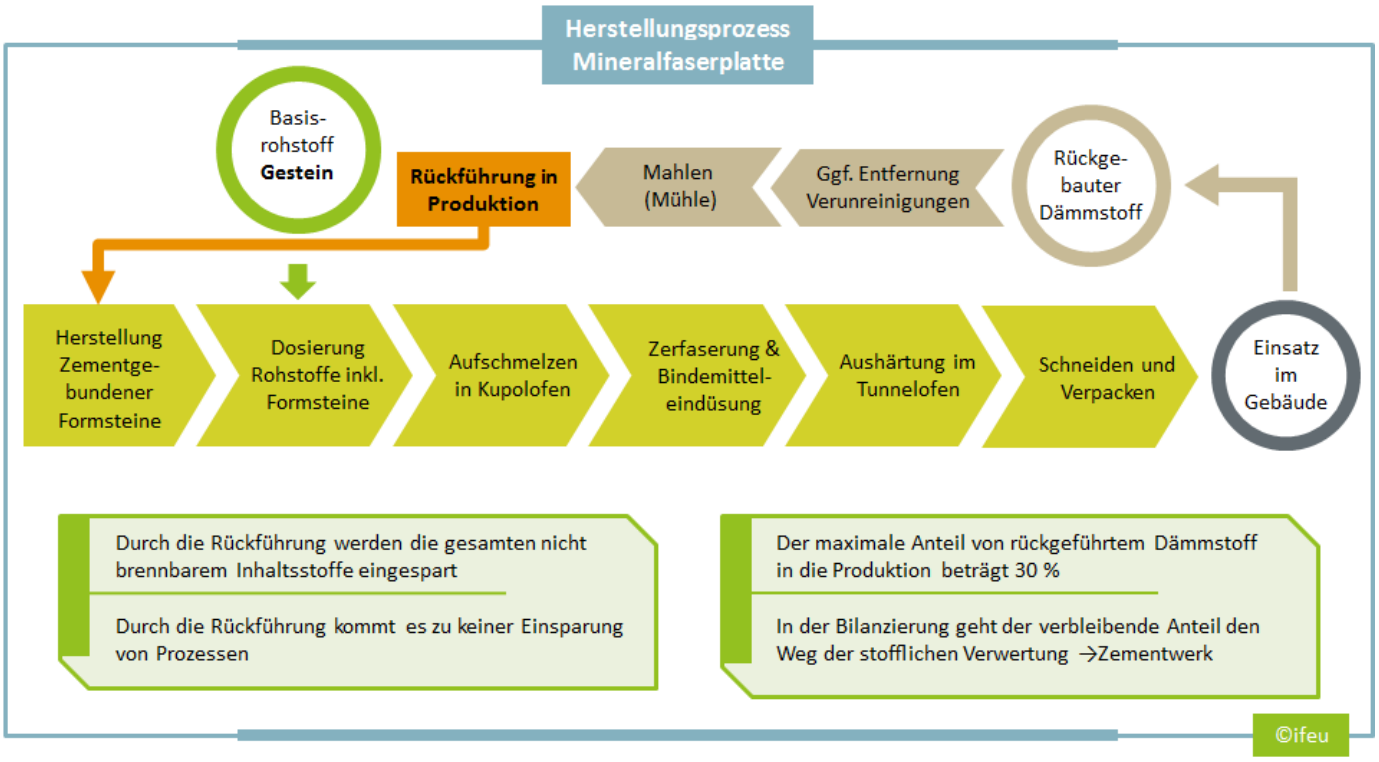


Abbildung 3-2: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Mineralfaserplatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebautem Mineralfaserdämmstoff

3.4 Mögliche zukünftige Entsorgungswege

Die erste Wärmschutzverordnung trat 1977 in Kraft. Bei einer Lebensdauer von ca. 50 Jahren spielten Dämmstoffe in der Entsorgungsbranche aufgrund ihres geringen Aufkommens eine noch untergeordnete Rolle. Erst wenige Dämmstoffhersteller haben sich bis dato mit einem Recycling von rückgebauten Dämmstoffen auseinandergesetzt, was durch die eingeschränkten heutigen Verwertungsmöglichkeiten bestätigt wird.

Ein Teil der im Rahmen dieser Studie ökobilanzierten Entsorgungswege bilden daher ein noch nicht praktiziertes aber nach Einschätzung der Autoren realistisches Szenario ab. Einige dargestellte Entsorgungswege befinden sich bereits im Versuchsstadium bzw. in der praktischen Entwicklung. Die Datenlage war entsprechend schwierig, zur Abbildung der Prozesse mussten viele Annahmen getroffen werden.

3.4.1 Rückführung in den Herstellungsprozess

Da schon heute fast alle Dämmstoffproduzenten ihre in der Produktion anfallenden Verschnittreste in den Herstellungsprozess rückführen können, liegt es nahe, dass saubere und sortenrein erfasste Dämmstoffe, die im Rahmen von Demontagearbeiten anfallen, grundsätzlich ebenfalls auf diese Weise recycelt werden können.

Voraussetzung dafür ist ein umfänglich durchgeführter selektiver Rückbau und eine konsequente getrennte Erfassung ab Baustelle. Es wird davon ausgegangen, dass die am 01.01.2019 mit Quotenberechnungen in Kraft getretene GewAbfV eine verbesserte getrennte Erfassung von Baustellenabfällen forcieren und die Chancen eines Recyclings von Dämmstoffen weiter verbessern wird.

Durch eine Rückführung in den Herstellungsprozess werden zum einen Primärrohstoffe sowie Energie und Hilfsstoffe substituiert. Je nach Dämmstoff und Herstellungsverfahren variiert die Höhe des RC-Anteils im jeweiligen Produktionsprozess. Bei den angenommenen prozentualen Anteilen handelt es sich um Abschätzungen der Hersteller. Diese fallen aufgrund der Sicherung der Qualitätsstandards der Endprodukte und noch nicht vorliegenden Erfahrungswerten recht gering aus. Es ist nicht auszuschließen, dass sich die Rückführquoten in der Praxis steigern lassen.

Rückführung | Holzfaserdämmstoffe

Für die Rückführung sämtlicher Holzfaserdämmstoffe ist eine saubere und sortenrein vorliegende Dämmstofffraktion erforderlich.

Eine Rückführung von Holzfasereinblasdämmung ist unter Einsatz von Rüttel- und Einblasmaschinen mit einem angesetzten Strombedarf von in Summe 49 kWh/t zu einem Anteil von 5 % möglich. Dadurch wird entsprechend Primärholz und Flammschutzmittel eingespart sowie 70 % des Prozessstrom- und 100 % des Prozesswärmebedarfs für dieselbe Menge Neumaterial.

Für die Rückführung der flexiblen Holzfasermatten wird eine vorherige Zerkleinerung mittels Hammermühle (19 kWh/t) erforderlich. Die Rückführung erfolgt nach der Faserherstellung und vor der Faserkuchenaufstreuung inkl. Stützfaserzugabe. Durch die übersprungenen vorherigen Prozessschritte des Herstellungsprozesses erfolgt eine Einsparung von Prozessenergie in Form von Wärme und Strom. Es wird angenommen, dass durch die Rückführung 50 % des Wärmebedarfs der nassen Holzfaserdämmplattenproduktion sowie 200 kWh/t Strom eingespart werden können. Die rückgeführte Matrix aus Holz- und Stützfasern spart in ihrer Gesamtmasse Holz ein. Das sich in der Holzmatrix befindliche Flammenschutzmittel spart rechnerisch neues Flammenschutzmittel ein.

Bei den Holzfaserdämmplatten erfolgt eine Rückführung nach der Erhitzung der Hackschnitzel und vor der Zerfaserung. Zuvor erfolgt eine Zerkleinerung der Dämmplatten mittels Hammermühle (19 kWh/t). Auch hier wird aufgrund der übersprungenen Prozessschritte Prozessenergie in Form von Wärme und Strom eingespart. Es wird angenommen, dass durch die Rückführung 50 % des Wärmebedarfs der nassen Holzfaserdämmplattenproduktion sowie 200 kWh/t Strom eingespart werden können. Die rückgeführte Matrix aus Holz, Leim und weiteren Additiven spart in Ihrer Massensumme Holz ein.

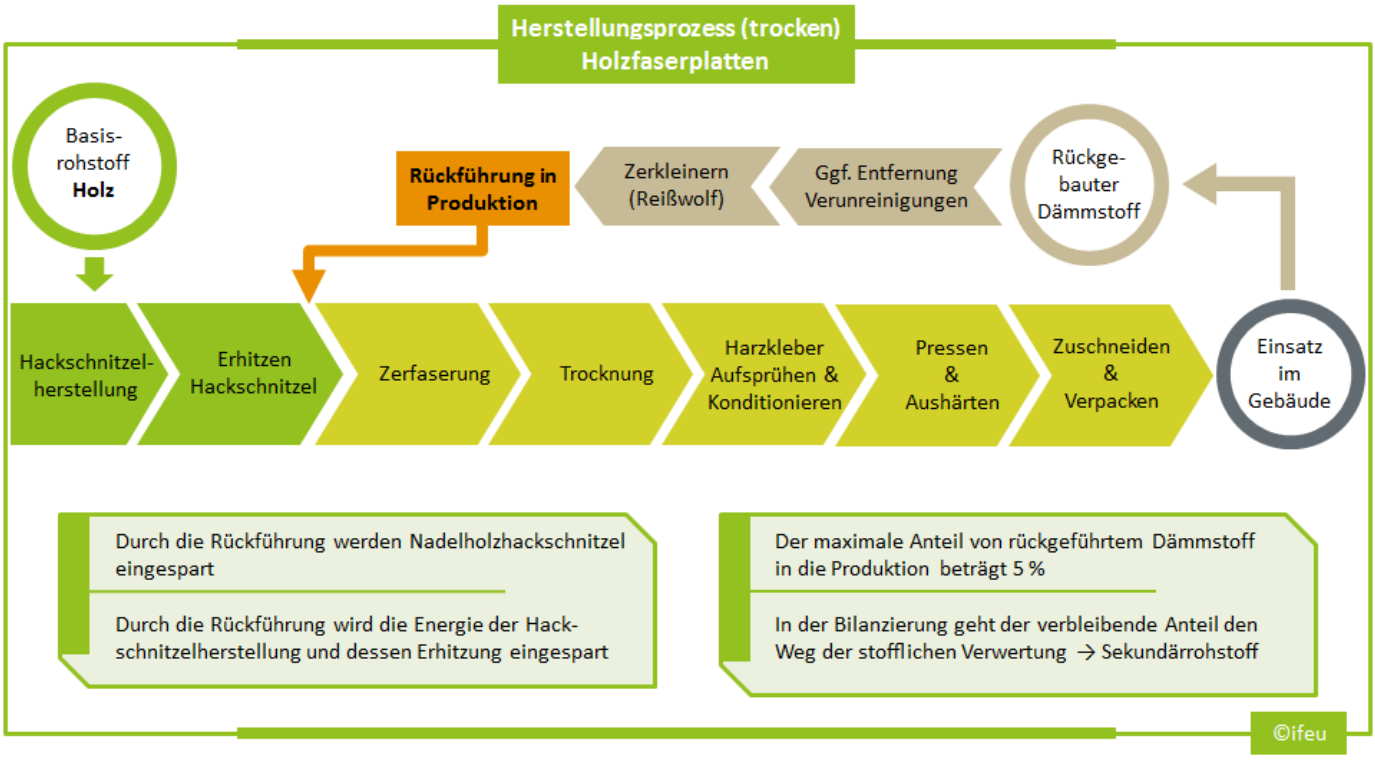


Abbildung 3-3: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Holzfaserplatten unter Berücksichtigung einer Prozess-rückführung von rückgebautem Holzfaserdämmstoff

Rückführung | Zellulose Einblasdämmung

Eine Prozessrückführung ist nur dann möglich, wenn der rückzuführende Dämmstoff sortenrein und sauber vorliegt. Ferner muss nach Auskunft eines Herstellers die Größe und Struktur der Zelluloseflocken mit denen der Produktionsanlage, in der sie zurückgeführt werden sollen, übereinstimmen. Eine einheitliche marktüber-greifende Größe und Struktur ist herstellerabhängig und liegt somit nicht vor.

Saubere und sortenreine Zelluloseflocken können nach der Mühle wieder in den Produktionsprozess rückge-führt werden. Dieser Produktionsschritt ist einer der letzten im Produktionsprozess, auf den nur noch die Do-sierung und Abpackung folgt. Durch eine Rückführung werden Altpapier, das Brandschutzmittel sowie die Ener-gie der vorgelagerten Prozesse eingespart, was mit in die Ökobilanz einfließt. Durch die Einsparung von Altpa-pier wird indirekt in der Papierkette der Rohstoff für zusätzliche Papierproduktion eingespart, angesetzt ist hier Holzschliff, weil dann mehr Altpapier als Papierrohstoff auf dem Markt verfügbar ist. Lasten wie die Rüttelmo-toren zum Konditionieren sowie die Einblasmaschine für das Rückführen finden mit einem Stromverbrauch von 49 kWh/t Berücksichtigung. Bevor eine Prozessrückführung stattfinden kann, sind der Feuchtegehalt sowie der noch bestehende Brandschutz des rückzuführenden Dämmstoffes zu prüfen. Die Hersteller verfügen bereits über eine hierfür geeignete Laborausrüstung, die im Rahmen der Qualitätssicherung Teil der Produktionsstätte ist.

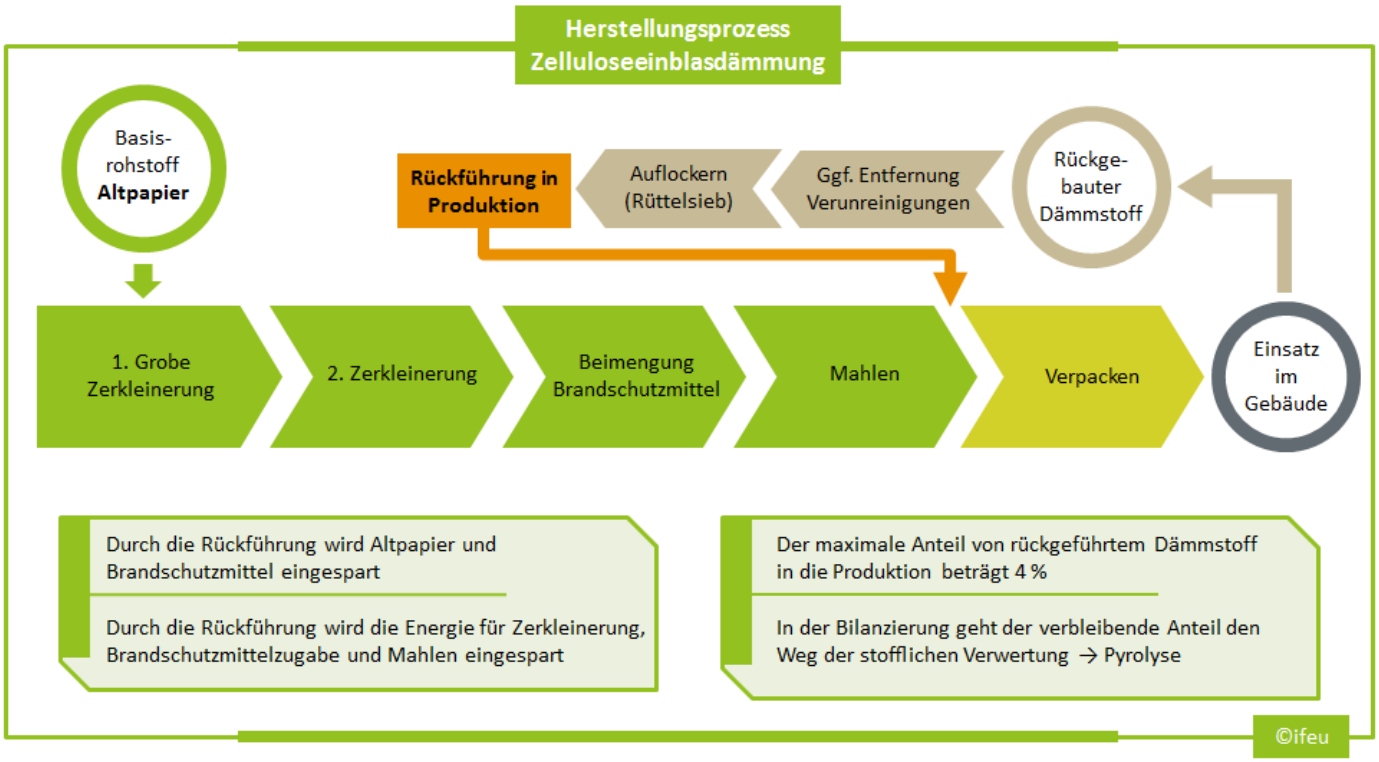


Abbildung 3-4:Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Zelluloseeinblasdämmung unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebauter Zelluloseeinblasdämmung

Rückführung | Hanf- und Jute Dämmmatten

Für eine Prozessrückführung ist eine vorherige Zerkleinerung der Dämmstoffmatten mittels Reißwolf notwendig (Strombedarf 46 kWh/t). Das zerkleinerte Material wird mit dem Ausgangsrohstoff vermischt und mit diesem weiter verarbeitet. Da eine Prozessrückführung erst nach der Imprägnierung mit dem Brandschutzmittel erfolgt, werden neben dem Primärrohstoff ebenfalls Brandschutzmittel sowie die Energie der vorangehenden Prozessschritte (10 % des gesamten Strombedarfs, 20 % des gesamten Wärmebedarfs) eingespart. Eine Einsparung von Stützfasern erfolgt nicht, da diese dem Dämmstoff erst nach dem Rückführungsprozessschritt hinzugefügt werden.

Es wird angenommen, dass die Dämmstoffmasse inkl. Stützfasern Hanf- bzw. Jutefasern einspart. Da Jute-Dämmmatten aus sekundären Jutefasern bestehen, werden sekundäre Jutefasern bzw. indirekt in der Jutekette auch primäre Jutefasern eingespart, weil dann mehr Jutefasern insgesamt auf dem Markt verfügbar sind. Die für die Vorbehandlung erforderliche Energie für die Rückführung ist geringer als die eingesparte Energie und führt in Summe zu einer Energieeinsparung. Gemäß Hersteller können ausschließlich saubere und sortenreine Dämmstoffe in die Produktion rückgeführt werden (mündliche Mitteilung).

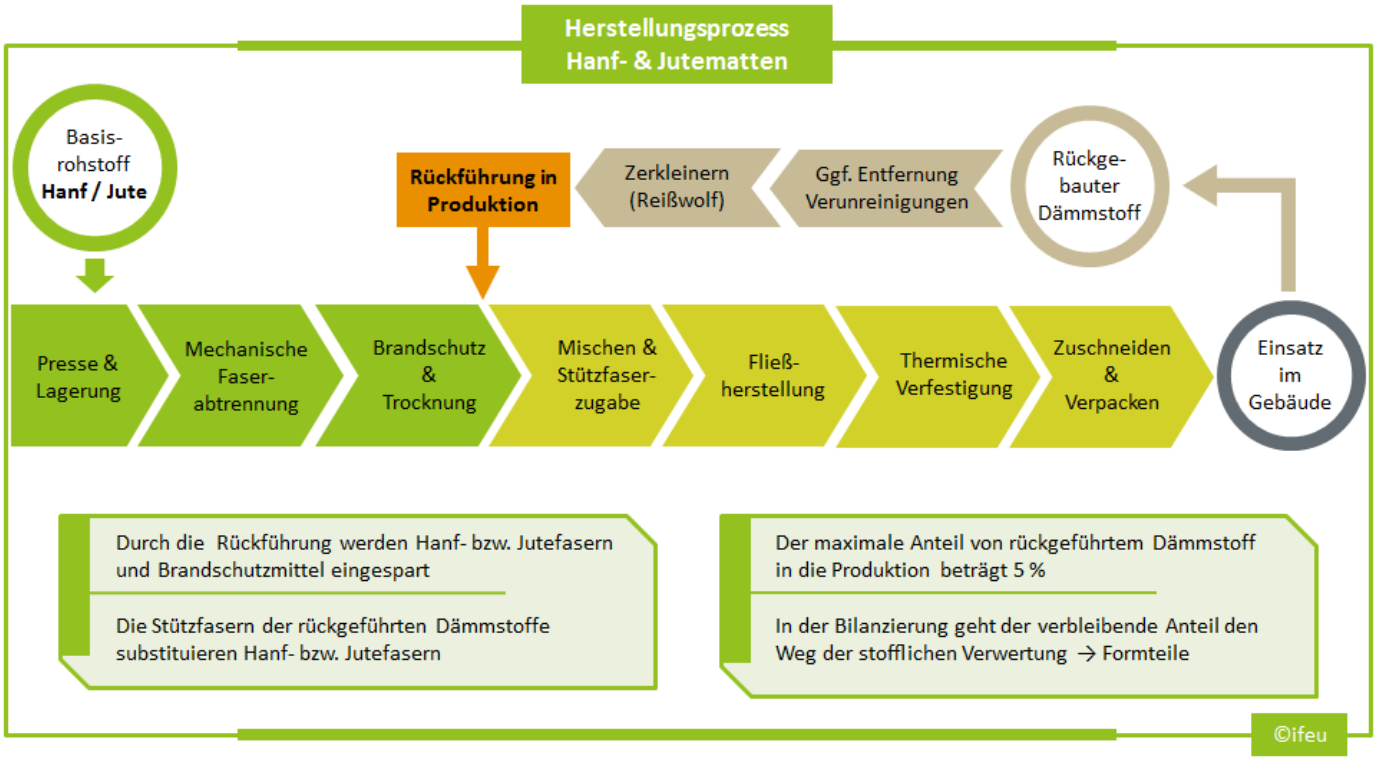


Abbildung 3-5: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Hanf- und Jutedämmmatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebautem Hanf- und Jutedämmstoff

Rückführung | Glaswolle

Für eine Rückführung von Glaswolle in die Produktion ist sowohl eine mechanische als auch thermische Vorbehandlung erforderlich. So erfolgen zunächst eine Zerkleinerung mittels Schredder und eine anschließende Entfernung der Bindemittel durch eine thermische Behandlung in einem Ofen (Zyklon). In dem Ofen wird der rückgeführte Dämmstoff erschmolzen und den übrigen erschmolzenen Rohstoffen in die Schmelzwanne zudosiert.

Die Energie zur Vorbehandlung entspricht annähernd der, die zur Aufbereitung und Schmelze der übrigen Rohstoffe erforderlich ist; die höhere Schmelzenergie für den Primärglasanteil, die durch die Rückführung eingespart wird, wird dabei durch einen höheren Energiebedarf für die kleinere Schmelzwanne ausgeglichen. Dementsprechend werden weder energetische Lasten noch Einsparungen für die Prozessrückführung berechnet. Durch die thermische Behandlung zur Entfernung der Bindemittel entstehen Emissionen, die berücksichtigt werden. Durch eine Rückführung werden durch den Altglasanteil im Dämmstoff Altglas bzw. dadurch indirekt in der Glaskette Primärrohstoffe für die Glasproduktion, Schmelzenergie sowie durch den Primärglasanteil direkt Primärrohstoffe für die Glasproduktion eingespart. Insgesamt ist mehr Altglas auf dem Markt vorhanden, wenn für die Glaswolleproduktion weniger externes Altglas benötigt wird, so dass weniger Primärglas produziert werden muss. Aufgrund der unterschiedlichen Rezepturen der jeweiligen Hersteller können ausschließlich die herstellereigenen Dämmstoffe zurückgenommen werden. Diese müssen sauber und sortenrein vorliegen.

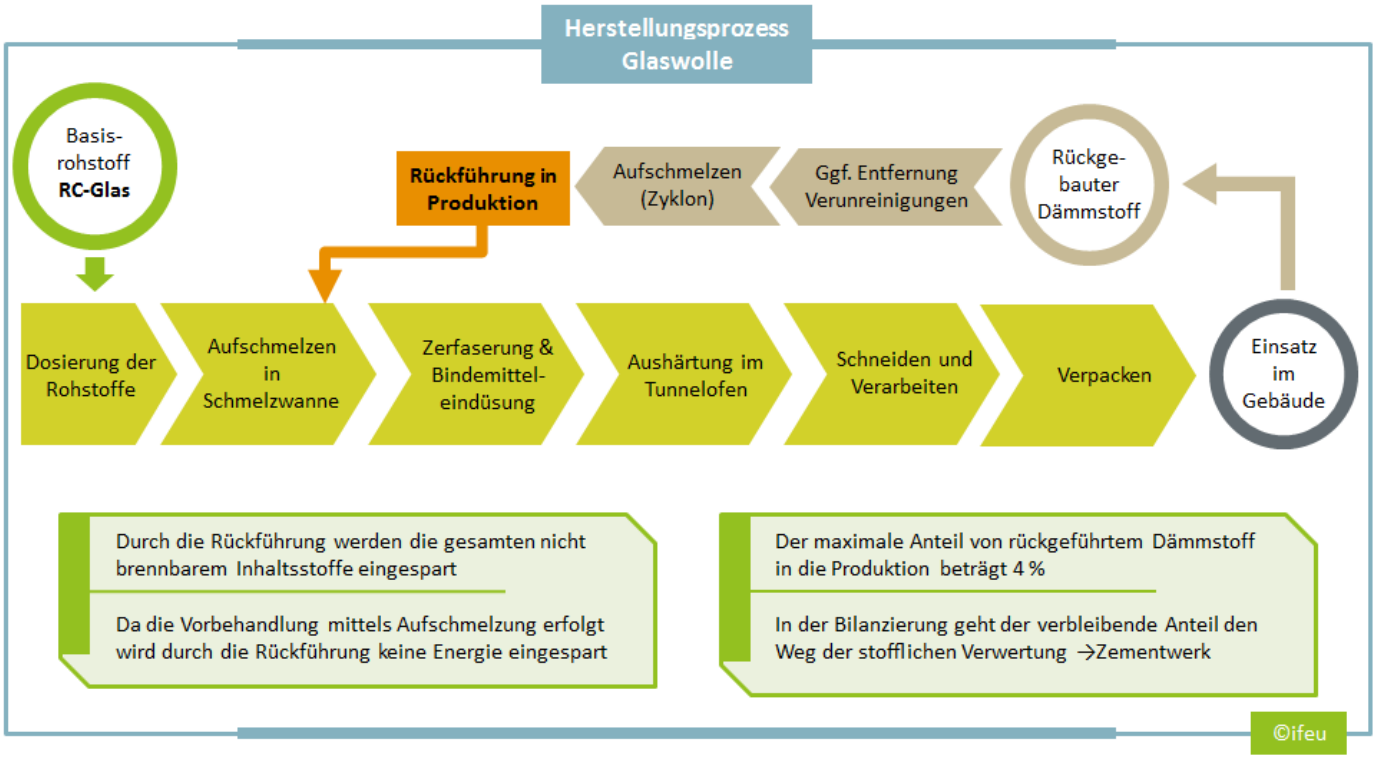


Abbildung 3-6: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Glaswolledämmmatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebautem Glaswolledämmstoff

Rückführung | Mineralschaumplatte

Für eine Rückführung in die Produktion ist eine vorherige Zerkleinerung der rückgebauten Mineralschaumplatten mittels Mühle erforderlich (Strombedarf 8 kWh/t). Leichte Verunreinigungen von mineralischen Putzen sind unproblematisch. Feste Verunreinigungen wie z.B. Schrauben dürfen nicht enthalten sein, weil diese Beschädigungen an der Mühle hervorrufen können.

Die gemahlenen Mineralschaumplatten werden am Prozessbeginn mit den übrigen Rohstoffen dem Herstellungsprozess zugeführt und substituieren dabei Kalkstein. Bereits heute werden bis zu 20 Gew.-% mineralische Zuschlagsstoffe in der Produktion eingesetzt. Bei diesen mineralischen Zuschlagsstoffen handelt es sich um Mehl aus Produktions- /Verschnittresten und/oder Kalkstein [EPD XEL 2015], wenn nicht ausreichend Sekundärmaterial vorhanden ist. Im Rahmen dieser Studie wird angenommen, dass zukünftig 100 Gew.-% des eingesetzten Kalksteines durch rückgeführte Dämmplatten ersetzt werden kann. Da die Rückführung zu Beginn des Herstellungsprozesses erfolgt, findet keine Energieeinsparung statt.

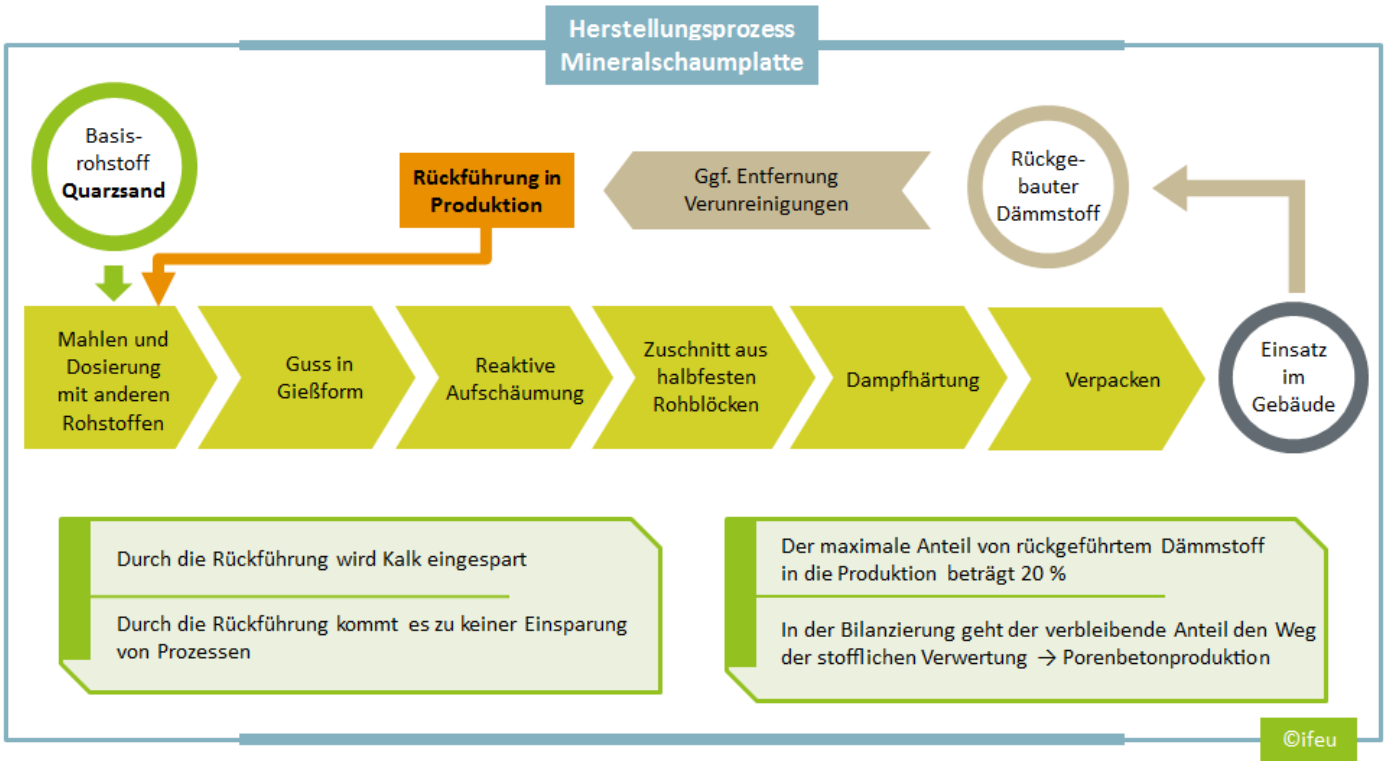


Abbildung 3-7: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Mineralschaumdämmplatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebauter Mineralschaumdämmung

Rückführung | Schaumglasplatten

Schaumglasplatten können zu Beginn des Produktionsprozesses mit den anderen Rohstoffen zermahlen (Strombedarf Mühle 5 kWh/t) und so in die Produktion zurückgeführt werden. Mineralische Anhaftungen sind unproblematisch. Organische Anhaftungen wie z.B. Bitumen sind bis zu 1 Gew.-% zulässig und haben keine negativen Auswirkungen auf den Schmelzprozess. Wie auch in den anderen Rückführungsprozessen ist das Vorhandensein von Schrauben oder ähnlichen festen Gegenständen aufgrund des Schädigungspotenzials gegenüber den Zerkleinerungsmaschinen nicht erwünscht.

Durch den Einsatz von rückgeführten Schaumglasplatten wird RC-Glas substituiert. Wie bei den Mineralschaumplatten erfolgt eine Rückführung zu Beginn des Produktionsprozesses mit den anderen Rohstoffen. Eine Energieeinsparung erfolgt somit nicht. Allerdings ist für das Aufschmelzen von rückgeführten Schaumglasplatten weniger Energie erforderlich als für das Aufschmelzen der Primärrohstoffe. Diese zusätzliche Schmelzenergie sowie die Bereitstellung der Rohstoffe für den primären Anteil der Schaumglasplatten kann der Dämmstoffproduktion als Entlastung angerechnet werden, weil sie dementsprechend einen Nutzen für nachfolgende Systeme, hier die Rückführung in die Produktion, generiert. Bei dem Altglasanteil in den Schaumglasplatten wird eine Einsparung von Altglas erreicht, was dazu führt, dass für die Dämmstoffproduktion weniger externes Altglas benötigt wird. Dadurch ergeben sich indirekte Einsparungen in der Glaskette für die Rohstoffe und die zusätzliche Schmelzenergie für die Primärglasproduktion, weil durch die Rückführung folglich mehr Altglas auf dem Markt verfügbar ist.

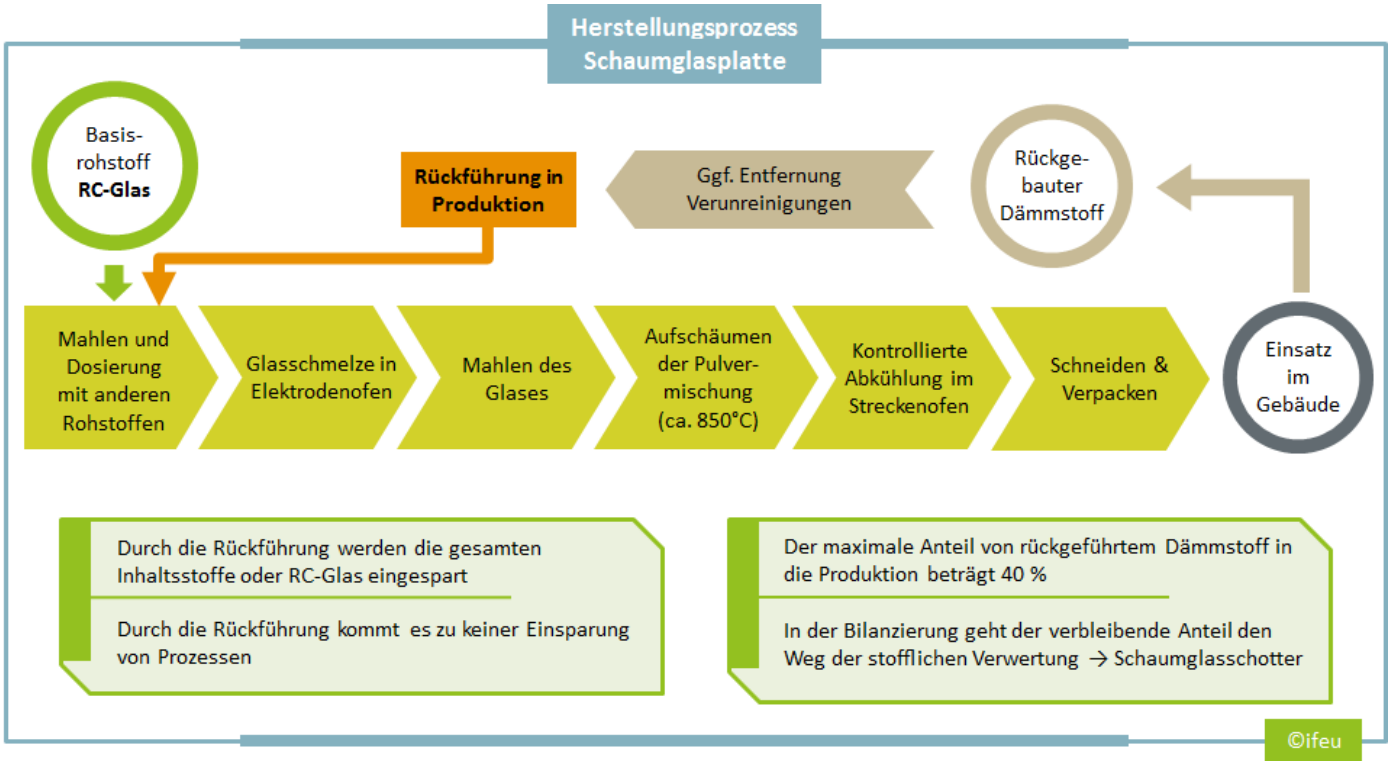


Abbildung 3-8: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von Schaumglasplatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebauten Schaumglasplatten

Rückführung | EPS

Eine direkte Produktionsrückführung von EPS ist nur dann möglich, wenn das EPS in herkömmlicher nicht komprimierter Form vorliegt. Eine Rückführung ist nur von sauber und sortenrein vorliegenden Dämmstoffen möglich. HBCD haltige Flammenschutzmittel dürfen nicht enthalten sein. Im Zweifel kann dessen nicht Vorhandensein im Vorhinein mittels Schnelltest nachgewiesen werden.

Nicht komprimierter EPS-Dämmstoff kann zunächst mittels Schredder zerkleinert und anschließend gesiebt werden (Strombedarf von 12 kWh/t). Nach dieser Vorbehandlung erfolgt eine Rückführung in die Produktion, wo er mit den frisch vorgeschäumten EPS-Kügelchen vermischt und anschließend in Form gebracht wird. Die durch die Rückführung eingesparte Vorschäumung benötigt mehr Energie als das Schreddern und Sieben, wodurch netto eine Energieentlastung erzielt wird. Angesetzt ist eine Energieeinsparung in Höhe von 35 % des jeweils gesamten Strom- und Wärmbedarfs der EPS-Dämmplattenproduktion. Weiterhin werden das Flammschutzmittel und das Treibmittel Pentan zusätzlich zum PS eingespart.

EPS, das aus logistischen Gründen komprimiert wurde, verliert seine Struktur, da die Luft durch den Komprimierungsprozess mittels Presse aus den EPS-Kügelchen gepresst wird. Es handelt sich somit nicht mehr um expandiertes Polystyrol sondern nur noch um Polystyrol in nicht granulierter Form ohne Treibmittel. Um dieses Polystyrol erneut dem Produktionsprozess zuführen zu können, muss zunächst das PS als Sekundärmaterial hergestellt werden (siehe dazu 3.3.5).

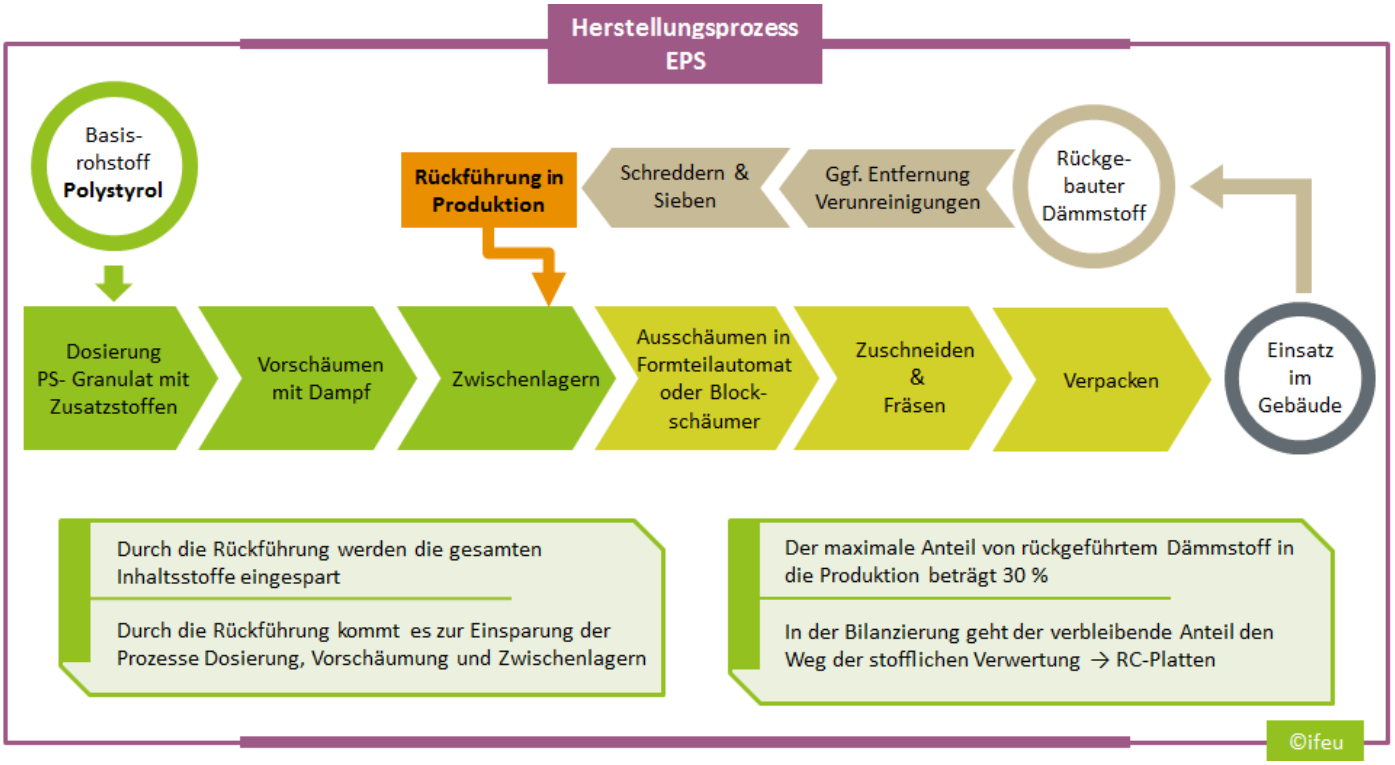


Abbildung 3-9: Vereinfachte Darstellung des Herstellungsprozesses von EPS Dämmplatten unter Berücksichtigung einer Prozessrückführung von rückgebautem EPS Dämmstoff

Rückführung | XPS

Anders als bei EPS ist nach einer Zerkleinerung und Siebung von sortenreinen und sauberen XPS-Dämmplatten keine direkte Prozessrückführung möglich, da nach einer Zerkleinerung, anders als bei EPS, keine kugelförmige Fraktion vorliegt. Eine indirekte Rückführung zu Beginn des Herstellungsprozesses kann durch den Einsatz von recyceltem PS sattfinden Dazu ist eine vorherige Herstellung von RC-PS erforderlich (siehe hierzu 3.3.5).

3.4.2 Herstellung von Sekundärrohstoffen

Aus Schaumglas, EPS sowie PU werden bereits heute Sekundärrohstoffe gewonnen (s. Kapitel 3.3.5). Es wird davon ausgegangen, dass die zukünftige Anzahl der rückgebauten Dämmstoffe steigt, wodurch ein Markt entsteht, der in einer steigenden Investitionsbereitschaft in Aufbereitungstechnologien resultiert. Folgende Herstellungsschritte von Sekundärrohstoffen aus Dämmstoffen werden bereits erprobt oder für zukünftig realistisch gehalten.

Sekundärrohstoff (Baustoff) aus Holzfaser

Rückgebaute Holzfaserdämmstoffe werden als Altholz der Kategorie 2 entsorgt. Gemäß Altholzverordnung kann aus A2 Holz neben der energetischen ebenfalls eine stoffliche Verwertung z.B. zur Herstellung von Pressspanplatten stattfinden.

Nach Rücksprachen mit Herstellern von Span- und OSB-Platten wurde vorrangig bei der Holzfasereinblasdämmung ein Potential zur stofflichen Verwertung in der Plattenproduktion identifiziert, da diese bereits in zerkleinerter Form vorliegt. Bei den Holzfaserdämmplatten müsste die Produktion um geeignete Zerkleinerungsmaschinen ergänzt werden, da die aktuelle Technik zu viel Feinanteil in die Produktionslinie einträgt, welcher den

störungsfreien Betrieb gefährden könnte. Da eine Zerkleinerung und Rückführung in die Dämmstoffproduktion heute bereits erfolgreich erprobt wurde, wird als Szenario in dieser Studie davon ausgegangen, dass eine stoffliche Verwertung zu Herstellung von Holzfaserwerkstoffen möglich sein wird.

Das Fraunhofer-Institut WKI Braunschweig forscht aktuell an der Herstellung von gepressten Formteilen aus Holzfasern für industrielle Anwendungen. Vor allem für die flexiblen Holzfaserdämmstoffmatten wird ein zukünftiges Potential für diese stoffliche Verwertung gesehen.

Bei einer stofflichen Verwertung wird in beiden Fällen das Primärmaterial Holz eingespart. Die Höhe des eingesparten Holzes bildet sich aus der Matrix der Holzfasern, ggf. Flammschutzmittel, Leim und weiteren Additiven. Ferner wird davon ausgegangen, dass die erhitzen Bi-Komponentenfasern in den flexiblen Holzfasermatten beim Prozess der Formteilgebung als Klebstoff fungieren können und somit der derzeit erforderliche Klebstoffanteil reduziert werden kann. Für diese Form der stofflichen Verwertung ist zunächst eine Zerkleinerung mittels Hammermühle notwendig, für diese wird ein Strombedarf von 19 kWh/t angesetzt.

Sekundärrohstoff (Baustoff) aus Hanf und Jute

Da die flexiblen Hanf- und Jutematten eine ähnliche faserige Struktur aufweisen wie die flexiblen Holzfasermatten und ebenfalls mittels Bi-Komponentenfasern stabilisiert werden, wird davon ausgegangen, dass gleichermaßen eine Verwendung zur Herstellung von Formteilen wie solche, an denen das Fraunhofer-Institut WKI derzeit forscht, möglich sein wird.

Eine stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff wäre ausschließlich mit sauberen und sortenrein vorliegenden Dämmstoffen möglich. Die vorherige, erforderliche Zerkleinerung mittels Reißwolf wird mit einem Strombedarf von 46 kWh/t berücksichtigt. Wie bereits bei den flexiblen Holzfasermatten wird neben dem Primärrohstoff ebenfalls der zur Formteilgebung erforderliche Kleber eingespart. Die Matrix aus Hanffasern und Flammenschutzmittel spart in ihrer Gesamtheit reine Hanffasern ein. Für die Jutematrix verhält es sich genauso.

Sekundärrohstoff aus Mineralfaser (Stein- und Glaswolle)

Das Forschungsprojekt RecyMin der Montanuniversität Leoben [Vollprecht & Sattler et. Al 2019] in Österreich untersucht die Möglichkeit zur Verwendung von KMF-Dämmstoff als Rohstofflieferant in der Zementindustrie. Die mineralischen Inhaltsstoffe der Mineralfaserplatte aus Steinwolle decken sich (qualitativ) größtenteils mit den benötigten Stoffen für die Zementherstellung. Der organische Bindemittelanteil des Dämmstoffes wird bei den hohen Temperaturen im Drehrohrofen verbrannt.

Im Rahmen dieser Studie wird die stoffliche Verwertung von Mineralfaserplatten aus Steinwolle für die Zementherstellung bilanziert. Dadurch werden die mineralischen Rohstoffe anteilig der Zusammensetzung der Inhaltsstoffe von Steinwolle substituiert. Zusätzlich ergibt sich ein energetischer Nutzen durch die Verbrennung der Bindemittel im Drehrohrofen. Es wird davon ausgegangen, dass für eine vorangehende Sortierung 20 kWh/t und für eine Zerkleinerung in einer Mühle nochmals 40 kWh/t Strom benötigt wird. Auch für Glaswolle steht dieser Verwertungsweg offen, wodurch Quarzsand im Zementwerk eingespart wird. Es wird angenommen, dass die Emissionen aus den Inhaltsstoffen der eingesparten Rohstoffe eingespart werden.

Sekundärrohstoff (Baustoff) aus Schaumglas

Neben der schon heute stattfindenden Herstellung von Schaumglasschotter und Gesteinskörnung für den Tiefbau wird derzeit eine Verwendung von rückgeführtem Schaumglas in der Produktion von Schallschutzplatten aus Glasschaum erprobt. Die rückgeführten Schaumglasplatten würden zermahlen (angesetzter Strombedarf Mühle 8 kWh/t), um mit den übrigen Rohstoffen zu Beginn des Herstellungsprozesses vermischt werden zu können. Schallschutzplatten aus Schaumglas werden fast ausschließlich aus Altglas hergestellt. Es wird ge-

schätzt, dass maximal 50 % davon über rückgebaute Schaumglasdämmplatten zugeführt werden darf (mündliche Mitteilung durch Hersteller). Hierdurch wird Altglas substituiert.

Von einer Energieeinsparung durch den Einsatz von Schaumglasdämmplatten zur Substitution von Altglas wird zunächst nicht ausgegangen, da auch das eingesetzte Altglas zunächst gemahlen werden muss. Da es sich bei Schaumglasdämmplatten ebenfalls um Glas handelt, welches zuvor bereits einmal geschmolzen wurde, wird von demselben energetischen Aufwand zum Schmelzen von Altglas und Schaumglasdämmplatten ausgegangen. Die zusätzliche Schmelzenergie sowie die Bereitstellung der Rohstoffe für den primären Anteil der Schaumglasplatten werden der Dämmstoffproduktion trotzdem als Entlastung angerechnet, weil sie dementsprechend einen Nutzen für nachfolgende Systeme, hier die Bereitstellung von Schallschutzmaterial, generiert. Da durch die stoffliche Verwertung auch durch den Altglasanteil der Schaumglasplatten Altglas eingespart wird, wird dafür indirekt in der Glaskette ebenso von einer Einsparung von Rohstoffen und der zusätzlichen Schmelzenergie für die Primärglasproduktion ausgegangen, weil bei einer stofflichen Verwertung der Dämmstoffe in Summe mehr Altglas am Markt verfügbar ist.

Sekundärrohstoff (Baustoff) aus Mineralschaum (Mineralschaumplatte)

Neben einer Rückführung in die Produktion kann aus sauberen Mineralschaumplatten mittels Mühle (Strombedarf 8 kWh/t) ein Sekundärrohstoff hergestellt werden, der zum einen als Leichtzuschlag in Wärmedämmputzen und zum anderen zur Herstellung von RC-Leichtmauersteinen mittels Rüttel-Pressverfahren aus Porenbeton genutzt werden kann [Hlawatsch, Küstermann, Krop 2018].

Durch den Einsatz im Bereich der Leichtzuschläge werden die hier sonst üblichen Materialien Bims oder Blähton ersetzt, wobei hier von 50 % Bims und 50 % Blähton ausgegangen wird.

Eine sekundärrohstoffliche Verwertung in der Formsteinproduktion auf Porenbetonbasis kann den Prozessschritt des Aufschäumens einsparen. Des Weiteren können sämtliche Inhaltsstoffe der Mineralschaumplatte bis auf Zement in vollem Umfang eingespart werden. Dass Zement im Gegensatz zu den übrigen Inhaltsstoffen nicht zu 100 % eingespart wird, liegt an der erforderlichen erneuten Zugabe von Zement im Produktionsprozess der RC-Formsteine zur Bindung der mineralischen sekundären Inhaltsstoffe. Für Zement wird von einer Einsparung von 25 % des in der Mineralschaumplatte enthaltenen Zementes ausgegangen. Weiter wird angenommen, dass die eingesparte Energie für das Ausschäumen 25 % des Energieeinsatzes der Mineralschaumplattenproduktion beträgt. Dies betrifft Strom, Wärme und Dieselverbrauch.

Sekundärrohstoff aus Polystyrol (EPS/XPS)

Die Herstellung eines sekundären PS-Rohstoffes kann auf rein physikalische Weise mittels Extrusion (Granulierung) oder auf chemisch- physikalische Weise mittels Lösen, Extrahieren und Extrudieren erfolgen.

Sauber und sortenreine EPS- sowie XPS-Dämmstoffe können mittels Extruder geschmolzen und granuliert werden. Für diesen Vorgang wird ein Strombedarf von 833 kWh/t angesetzt [Dehoust et al. 2016]. Der aus RC-Material so hergestellte Sekundärrohstoff (PS-Granulat) kann zu Beginn der Produktionsprozesse dem neuen PS-Granulat zudosiert und somit indirekt in den Prozess rückgeführt werden. Durch den Einsatz von Sekundärmaterial werden sowohl für EPS als auch für XPS eine Einsparung von PS aus Primärrohstoffen sowie eine Einsparung von Flammenschutzmittel angesetzt.

Eine zweite Form der Sekundärrohstoffherstellung ermöglicht das CreaSolv®-Verfahren, welches eine Lösung des Dämmstoffes in einem Lösemittel vorsieht. Das gelöste PS wird in weiteren Prozessschritten vom Lösemittel extrahiert und zu PS-Granulat extrudiert. Außerdem besteht die Möglichkeit, das Flammenschutzmittel HBCD gesondert zu extrahieren. Da dieses Flammenschutzmittel in den heute erhältlichen Dämmstoffen aufgrund seiner besorgniserregenden gesundheitlichen Eigenschaften nicht mehr enthalten sein darf, wird der

Prozess der HBCD Entfernung für diese Dämmstoffe der neuen Generation in der Theorie nicht erforderlich und somit nicht in die Ökobilanz einbezogen.

Vor einer Verwertung durch CreaSolv® oder einer Regranulierung durchläuft der Dämmstoff die Prozessschritte Sortierung (20 kWh/t) und Komprimierung zum Transport (67 kWh/t). Dadurch wird für die zweite Hälfte des LKW-Transports zur CreaSolv®-Anlage und Regranulierung von einem vollen Auslastungsgrad ausgegangen.

Sekundärrohstoff aus Polyol (PU)

Eine Rückführung alter PU-Dämmplatten in die Produktion ist nur über den Umweg der Zerlegung des Dämmstoffes in die zugrundeliegenden Chemikalien möglich. In der Glykolyse wird das zerkleinerte PU unter Zugabe von Glykol (Diethylenglykol) zu Recyclingpolyol umgesetzt, welches aus einer Mischung aus kurzkettigen, hydroxylterminierten Urethanen, Polyolen und Glykolen besteht.

Alter PU-Dämmstoff und Diethylenglykol werden im Verhältnis 50:50 gemischt, um ungefähr die doppelte Menge Recyclingpolyol zu generieren. Das Recyclingpolyol ersetzt dieselbe Menge herkömmlich produzierten Polyols, dessen Produktionslasten dadurch eingespart werden. Da sich die Strukturen des alten PU im Recyclingpolyol wiederfinden, kann durch den Einsatz des Recyclingpolyols theoretisch auch etwas der für die PU-Produktion benötigten Methylendiphenylisocyanate (MDI) eingespart werden. Dieser Effekt wird hier konservativ nicht berücksichtigt.

Es treten Destillationsverluste auf, die mit 0,5 %, bezogen auf die Menge Dämmstoff und Diethylenglkyol im Input, angesetzt sind und in der MVA verbrannt werden. Dafür wird angenommen, dass sich diese wie der PU-Dämmstoff zusammensetzen. Das im Dämmstoff enthaltene Treibmittel wird bei der Zerkleinerung im Zuge der Glykolyse freigesetzt. Eine Abtrennung ist möglich, so dass es erneut als Treibmittel eingesetzt werden kann, was zur Einsparung der entsprechenden Produktionslast in der Ökobilanzierung führt. Für die Zerkleinerung der PU-Dämmstoffe wird ein Strombedarf von 78 kWh/t angesetzt. Weiterhin wird wie vor der Verbringung ins Zementwerk von einer vorangehenden Sortierung der PU-Dämmstoffe ausgegangen, für die ein Strombedarf von 20 kWh/t veranschlagt ist.

3.4.3 Herstellung von Pflanzenkohle |Zellulose- / Holzfasereinblasdämmung

Mittels Pyrolyse ist eine Herstellung von Pflanzenkohle aus Dämmstoffen möglich. Erste Pyrolyseversuche zur Herstellung von Pflanzenkohle aus Zellulosedämmstoff verliefen erfolgreich und werden an der Universität Wien aktuell weiter optimiert. Als zukünftiger Entsorgungsweg wird die Herstellung von Pflanzenkohle aus Zellulose- und Holzfasereinblasdämmung bilanziert.

Vor dem Pyrolyseprozess erfolgt zunächst eine Pelletierung der losen Dämmstoffe. Die durch den Pyrolysebetrieb erforderliche Energie sowie die aus dem Betrieb resultierenden Emissionen werden als Lasten berechnet, die gewonnene Abwärme als Einsparung erfasst. Ferner erfolgt eine Kohlenstoffsequenzierung, die als Kohlenstoffsenke in der Ökobilanz angerechnet werden kann. Ebenso erfolgt eine teilweise Nutzbarmachung von Bor bzw. Ammoniumsulfat, welches dem Zellulose- bzw. Holzfasereinblasdämmstoff als Flammenschutzmittel diente und in der Pflanzenkohle enthalten ist.

Das Aufbringen von Pflanzenkohle aus Dämmstoffen auf Böden ist in Deutschland noch nicht ohne Sondergenehmigung gestattet. Erste Testergebnisse der Pflanzenkohle weisen keinerlei Grenzwertüberschreitungen auf, es wird daher davon ausgegangen, dass eine zukünftige Entsorgung mittels Pyrolyse möglich sein wird. Nach dem Ausbringen auf den Acker werden unter Annahmen zur Pflanzenverfügbarkeit 1/5 der in der Pflanzenkohle enthaltenen Flammschutzmittel aus den Dämmstoffen als entsprechender Düngernutzen angerechnet, weil dadurch die Produktion von Bor- bzw. Ammoniumsulfatdünger eingespart wird. Weiterhin wird eine Wiederfindungsrate der Biokohle auf dem Acker von 47 % angesetzt, was dem Anteil von Fertigkompost auf dem Acker

entspricht. Die in der Ökobilanz angerechnete Kohlenstoffsenke wird ausschließlich für die langfristig auf dem Acker verbleibende Biokohle bzw. dessen Kohlenstoffgehalt berücksichtigt.

3.5 Ökobilanzdaten für die Abbildung der Entsorgungswege

Die Lasten, die durch den Energiebedarf der Aufbereitungsschritte für eine Verwertung entstehen, sowie die Emissionen aus Beseitigung und Verbrennung (s. Kap. 3.3.1) werden über Datensätze des ifeu abgebildet. So werden die Stromlasten für die Aufbereitungsschritte außerhalb der Rückführung in die Produktion über den deutschen Netzstrommix nach ifeu-Daten abgebildet. Auch für die gewonnene Energie aus der thermischen Beseitigung bzw. Verwertung von Dämmstoffen, die zur Einsparung der Bereitstellungslasten derjenigen Energie führt, die stattdessen hergestellt werden müsste, wird auf Datensätze des ifeu zurückgegriffen. Die Lasten für eingesparten Strom werden ebenso über den aktuellen deutschen Netzstrommix quantifiziert. Die Lasten für Wärme, die durch die in Biomasse-HKWs und MVAs erzeugte Wärme eingespart wird, werden über Gasheizungen abgebildet.

Zur Darstellung der Strombereitstellung, sowohl für die Aufbereitungsschritte zur Rückführung in die Produktion als auch für die Einsparungen im Produktionsprozess, die durch die Rückführung in die Produktion entstehen, wird wie in den Produktionsdaten der europäische ENTSO-E-Strommix aus der Datenbank [ecoinvent (EI) 3.4] herangezogen. Die durch die Rückführung alter Dämmstoffe im Produktionsprozess eingesparten Lasten aus der Prozessenergiebereitstellung werden analog zu den Produktionsdaten über industrielle (zumeist) Gaskessel aus EI 3.4 bilanziert. Benötigte Chemikalien mit ihren Lasten werden ebenso über EI 3.4 abgebildet. Die Lasteneinsparungen, die im Zuge der stofflichen Verwertung entstehen, indem die Sekundärmaterialien Primärmaterialien samt ihrer Produktionslasten einsparen können, werden analog zur Produktion über die Prozessmodule des IBO berechnet bzw. auch über EI 3.4, wenn das IBO dafür ecoinvent-Daten herangezogen hat. Es wird dabei davon ausgegangen, dass der Transport der Rohstoffe und weiterer Produktionsmittel, welcher ebenso über die IBO-Datensätze abgebildet wird, ebenfalls eingespart wird. Wenn Sekundärmaterialien hergestellt werden, die keine Materialien aus der Dämmstoffproduktion einsparen, wird zur Berechnung der Lasteneinsparungen auf die zugehörigen Datensätze aus EI 3.4 zugegriffen.

Die verschiedenen Prozesse und Module sind über ein Stoffstrommodell miteinander verknüpft, so dass die mit der Produktion und Entsorgung der Dämmstoffe verbundenen Lasten und Nutzen systemumfassend oder sektoral berechnet werden können.

Um eine zukünftige Situation abzubilden zu können, steht auch eine Prognose des deutschen Strommixes im Jahr 2030 zur Verfügung, weil durch zukünftige energetische Verwertung ggf. ein zukünftiger deutscher Netzstrommix mit geringeren Lasten eingespart wird. Von der Berechnung einer solchen zukünftigen Variante wird in dieser Studie aber abgesehen, weil dann auch die durch die Sekundärmaterialien eingesparten Lasten dahingehend angepasst werden müssten, was im aufgebauten Stoffstrommodell nicht praktikabel möglich ist. Da für die in den MVAs erzeugte Wärme als Nutzen die Last einer Erdgasheizung angerechnet wird, wird schon ein Schritt in Richtung zukünftige Situation gegangen. Gegenwärtig wäre noch von jeweils 50 % Öl- und Gasheizungen auszugehen, wobei Ölheizungen mit höheren Lasten und damit einem höheren angerechneten Nutzen verbunden wären.

3.6 Belastbarkeit der Daten zu den Entsorgungswegen

Lasten und Nutzen aus der thermischen Behandlung sind nur mit geringen Unsicherheiten verbunden. Bei den stofflichen Verwertungswegen sind die entsprechenden Unsicherheiten größer, weil auf Basis der Recherchen und Abfragen bei Verbänden und Unternehmen Abschätzungen getroffen werden müssen:

Bei den synthetischen Dämmstoffen ist diesbezüglich von einer mittleren Unsicherheit auszugehen, die hinsichtlich der Abschätzung zu den Einsparungen auch relativ hoch ausfällt: Bei EPS wird für die Rückführung in die Produktion und die stoffliche Verwertung zu Sekundärrohstoffen unterstellt, dass dadurch vorgeschäumte EPS-Kügelchen eingespart werden, wobei die dadurch eingesparte Prozessenergie abgeschätzt wird. Durch die über Firmendaten abgeschätzte Glykolyse von PU wird ein RC-Polyol erzeugt, das Polyol ersetzen kann, dessen Nutzen aber nicht gänzlich klar ist. Unsicher ist auch, welche Lasten der PU-Dämmplattenproduktion durch die stoffliche Verwertung zu Klebepressplatten eingespart werden können. Die Lasten für die Aufbereitung der Dämmstoffe müssen stets abgeschätzt werden.

Für die Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen ist von einer mittleren bis hohen Unsicherheit auszugehen. Die durch die Rückführung in die Produktion eingesparte Prozessenergie kann nur abgeschätzt werden. Bei Holzplatten und Holzfasereinblasdämmung stellt sich auch die Frage, wie die stoffliche Verwertung als Rohstoff in Holzanwendungen konkret aussehen und ob durch die Dämmstoffmasse Holz eingespart werden kann. Bislang gibt es hierzu keine Erfahrungen. Auch unsicher ist, ob die stoffliche Verwertung von Hanf- und Jutedämmstoffen in Formteilen so funktioniert und ob sich tatsächlich Stützfasern aus Kunststoff einsparen lassen. Praktische Erfahrungen dazu fehlen noch. Für die Pyrolyse von Zellulose- und Holzfasereinblasdämmung beruhen die Daten auf ersten Versuchen und es ist unklar, welchen Nutzen die Pflanzenkohlen tatsächlich haben. Die Lasten für die Aufbereitung der Dämmstoffe müssen stets abgeschätzt werden.

Bei den mineralischen Dämmstoffen sind die mit der stofflichen Verwertung verbundenen Unsicherheiten als relativ hoch einzustufen. Bei Mineralfaserplatten, Glaswolle und Schaumglasplatten müssen Annahmen zur Einsparung von Schmelzenergie durch die Rückführung in die Produktion getroffen werden, wobei bei Mineralfaserplatten unklar ist, ob hierfür die Rezeptur angepasst werden müsste. Die durch die stoffliche Verwertung in Zementwerken bedingten Effekte werden in der Praxis erst untersucht. Es muss sich noch zeigen, ob dadurch tatsächlich Rohstoffe entsprechend der Dämmstoffzusammensetzung und die Emissionen aus den darin enthaltenen Inhaltsstoffen eingespart werden können. Bei Schaumglasplatten ist der Nutzen durch die stoffliche Verwertung zu Schallschutzmaterial und die Rückführung in die Produktion unsicher. Weiterhin muss der Nutzen für die Verwertung von Schaumglasplatten zu Schaumglasschotter und von Mineralschaumplatten in der Porenbetonproduktion anteilig an den Lasten der Schaumglas- bzw. Mineralschaumplattenproduktion abgeschätzt werden.

3.7 Rahmenbedingungen der Kreislaufwirtschaft

Für die Entsorgung der einzelnen Dämmstoffalternativen stehen verschiedene Optionen offen. Einige der Optionen sind bislang nur angedacht und werden noch nicht in der Praxis angeboten. Einige weitere befinden sich in der technischen Entwicklung. Diese Optionen werden im Rahmen des Forschungsprojektes erstmalig aufgenommen, Stoffstrombilanzen erstellt und darauf aufbauend in ihren ökologischen Vor- und Nachteilen umfassend bewertet. Ziel ist eine ganzheitliche Bewertung der ökologischen Stärken und Schwächen der Dämmstoffalternativen über den gesamten Lebensweg hinweg, d.h. die jeweilige Entsorgung mitberücksichtigend.

Die verschiedenen Entsorgungsoptionen stehen nicht gleichberechtigt offen. Die umwelt- und ressourcenpolitische Zielsetzung sieht eine Entkopplung der Wirtschaftsentwicklung vom Ressourcenverbrauch vor und setzt Ziele bspw. in der Steigerung der Rohstoffeffizienz. Diese werden nur dann erreicht werden können, wenn es gelingt, die Kreislaufwirtschaft so zu entwickeln, dass Materialkreisläufe geschlossen werden können. Der Rohstoffbedarf der Ökonomie soll sich möglichst weitgehend aus dem Materialkreislauf schöpfen lassen. Dies bedeutet, dass die Abfallmassen so aufbereitet werden müssen, dass sie stofflich verwertet und damit diesem Materialkreislauf zugeführt werden können.

Die Verwertung der Abfallmassen muss entsprechend ihren wertgebenden Eigenschaften hochwertig erfolgen. D.h. die wertgebenden Eigenschaften der unterschiedlichen Abfallmassen müssen möglichst vollständig genutzt

werden. Die Abfallmassen sollen sich zu Produkten verarbeiten lassen oder es ermöglichen, sie als Rohstoff in die Produktion einbinden zu können.

Entsprechend formuliert auch die Abfallgesetzgebung mit §6 (1) des Kreislaufwirtschaftsgesetzes eine klare Hierarchie der Entsorgungsoptionen. Das Entstehen von Abfällen gilt es vorrangig weit möglichst zu vermeiden, Produkte sollen langlebig sein. Lässt sich Abfall nicht vermeiden, sollte er wiederverwendet werden. Altprodukte werden bspw. repariert und damit wieder eine weitere Nutzung ermöglicht. Sollte dieses nicht möglich sein, muss ein Recycling erfolgen, d.h. die Abfallmassen werden einer stofflichen Verwertung zugeführt, so dass sie aufbereitet zu einem Rohstoff in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden können und helfen, Materialkreisläufe zu schließen. Ist diese Rückführung (für Teilmassenströme) nicht möglich, sind Möglichkeiten der sonstigen Verwertung zu wählen, bevor als letzte Option eine schadlose Beseitigung in Verbrennungsanlagen oder auf Deponien ins Auge gefasst werden kann. Handelt es sich um mineralische Materialien, kann die sonstige Verwertung eine Nutzung als Erdbaustoff sein. Handelt es sich um organische Materialien, zielt die sonstige Verwertung auf die Nutzung des Energieinhaltes der Abfallmasse.

Ein Abfallerzeuger kann in dem Sinne nicht frei zwischen verschiedenen Möglichkeiten der Beseitigung und Verwertung der Abfallmassen wählen. Er unterliegt zudem weiteren Pflichten, die die Kreislaufwirtschaft stärken sollen.

Den Umgang mit Bauabfällen regelt zudem die Gewerbeabfallverordnung. Hier regelt der §3 (1), dass „Erzeuger und Besitzer von Bau- und Abbruchabfällen die folgenden Abfallfraktionen jeweils getrennt zu sammeln und zu befördern sowie nach Maßgabe des § 8 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen“ haben. Eine der ab Baustelle getrennt zu haltenden Abfallfraktionen sind nach 5. die Dämmmaterialien. Nur wenn diese getrennte Bereitstellung im Einzelfall nicht möglich ist, muss das Material als Teil eines Gemisches einer Vorbehandlungsanlage übergeben werden, in der der Abfallmassenstrom nach Materialien aufgetrennt und einer möglichst hochwertigen Verwertung zugeführt werden kann. Der Umgang mit den Abfallmassen ab Baustelle ist zu dokumentieren und die getrennte Bereitstellung ab Baustelle oder nachrangig die Übergabe an Vorbehandlungsanlagen darüber nachzuweisen.

Die Aufbereitung zu EBS und die energetische Verwertung sind daher nur Verwertungsoptionen, wenn eine stoffliche Verwertung technisch nicht möglich und / oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist. Die energetische Verwertung zeigt sich auch in Umweltbewertungen bspw. über Ökobilanzen weniger vorteilhaft. Dies gilt für die Zukunft umso mehr wie die konventionelle Energieerzeugung aufgrund der Energiewende zunehmend auf Basis erneuerbarer Energieträger erfolgt. Dies gilt auch für die Wärmebereitstellung und hier auch für die Zementproduktion, die sich aufgrund der Vorgaben zum Klimaschutz in Zukunft wohl von kohlebasierten Feuerungen ablösen wird.

Die Optionen Ablagerung auf Deponien oder thermische Beseitigung in einer Müllverbrennungsanlage sollte nur für den Teilmassenstrom gewählt werden, der sich für die Rückführung in den Materialkreislauf nicht mehr eignet und bspw. aufgrund einer höheren Schadstoffbelastung auch nicht für eine sonstige Verwertung zur Verfügung steht.

Wie sich bei der Recherche nach Entsorgungsoptionen zeigte, sind für viele Dämmstoffe bis dato keine Möglichkeiten zur Kreislaufführung gegeben. Hier ist die Industrie gehalten, entsprechende technische Lösungen zu entwickeln und flankierend deren Etablierung auf dem Entsorgungsmarkt zu unterstützen.

4 Methodik Ökobilanzierung

Mit dem Forschungsprojekt wurden erstmalig die verschiedenen Entsorgungsoptionen für die einzelnen Dämmstoffe recherchiert und soweit in den daraus resultierenden Betriebsmittel- und Energiebedarfen sowie Emissionen quantifiziert, dass diese in vergleichende ökologische Bewertung eingebunden und über Ökobilanzen berechnet und bewertet werden können. Die vergleichende Bewertung der unterschiedlichen Entsorgungslösungen erfolgt über Abfallökobilanzen (Kap. 4.1). Die letztendliche Entsorgung der Dämmstoffaltmassen ist aber auch ein wesentlicher Bestandteil einer Produktökobilanz, die Dämmstoffalternativen unter Einbezug von Produktion, Anwendung sowie Entsorgung d.h. von der Wiege bis zur Bahre bewerten (Kap. 4.2).

4.1 Abfallökobilanzen und Bilanzrahmen

Die Entsorgung von Abfallmassen erfolgt über verschiedene Aufbereitungs- und Behandlungsschritte, die an Abfallentsorgungssysteme gekoppelt eine Verwertung oder eine schadlose Beseitigung sicherstellen sollen. Die einzelnen Schritte der Abfallbehandlung erfordern den Einsatz von Energie und Betriebsmitteln, dabei finden ggf. Stoffumwandlungen statt. Die daraus resultierenden Emissionen führen nach entsprechenden Abreinigungsleistungen als Restemissionen zu potenziellen Umweltbelastungen. Die einzelnen Entsorgungsoptionen verfolgen aber auch einen Nutzen. Es entstehen Rohstoffe, die in eine Produktion zurückgeführt werden können oder sogar vermarktbare Endprodukte. Sofern keine stoffliche Verwertung möglich ist, kann durch die Entsorgung Energie erzeugt werden. Eine Entsorgung ist dann ökologisch vorteilhaft, wenn der damit verbundene Aufwand (möglichst klein) in einem guten Verhältnis zum Nutzen (möglichst groß) steht.

Der Systemrahmen beginnt ab dem Rückbau des Dämmstoffes, umfasst den Aufwand der Entsorgung/Aufbereitung und den Nutzen, der damit in einem nächsten System erzielt werden kann (Abbildung 4-1). Eine aufwändigere und dadurch mit höheren Umweltlasten (Emissionen, Ressourcen) verbundene Aufbereitung, die eine höherwertigere Verwertung des Dämmstoffes erlaubt, wird dadurch ggf. mit höheren Entlastungen belohnt, die durch den größeren Nutzen erzielt werden. Der Nutzen beziffert sich dabei über die Umweltlasten derjenigen Produkte, die durch die produzierten Sekundärprodukte eingespart werden. Diese vermiedenen Umweltlasten werden dem System „gutgeschrieben“.

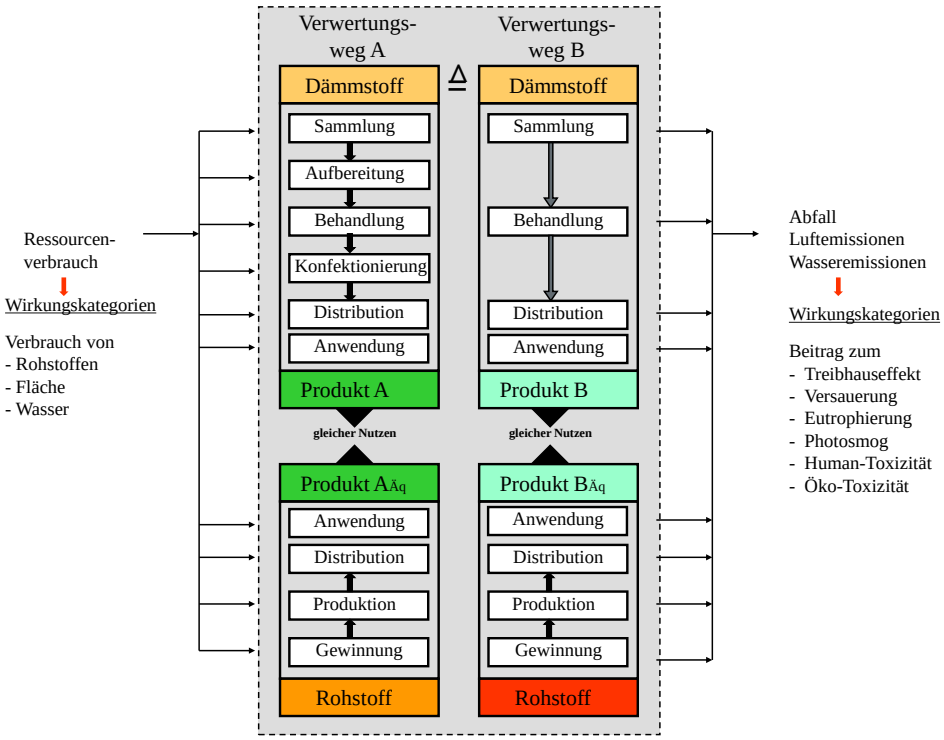


Abbildung 4-1: Bilanzrahmen einer Abfallökobilanz; Vergleich verschiedener Verwertungswege

4.2 Produktökobilanzen und Bilanzrahmen

Mit der Produktökobilanz kommen als wesentlicher Bestandteil die Produktionslasten für die Herstellung der Dämmstoffe hinzu. Es soll eruiert werden, wie ein Produkt, das eine bestimmte Funktion erfüllt, im Vergleich zu einem anderen Produkt mit derselben Funktion abschneidet. Der Bilanzrahmen umfasst dann alle Schritte ab der Rohstoffbereitstellung der Dämmstoffe bis zur Entsorgung der Dämmstoffe (von der Wiege bis zur Bahre). Die Entsorgung und Verwertung und der daraus generierte Nutzen spielen bei Produktökobilanzen oft auch eine große Rolle. Sollen Dämmstoffalternativen miteinander vergleichbar sein, müssen sie in der Nutzungsphase die gleichen Dämmwirkungen für die Bauwerke, d.h. die gleichen Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. Sind auch die Standzeiten gleich – gleiche Nutzungszeiten der Dämmstoffe –sind keine dämmstoffbezogenen Unterschiede zu erwarten, weshalb die Nutzungsphase nicht in das System einbezogen werden muss.

Die Verpackung der Dämmstoffe wird hier ebenso nicht betrachtet. Diesbezüglich sind zwar in Abhängigkeit der benötigten Volumina und Massen der verschiedenen Dämmstoffe Unterschiede zwischen den Dämmstoffen zu erwarten, die Umweltwirkungen der Produktion und Entsorgung bzw. Verwertung der Verpackungen würden aber die der Dämmstoffe überlagern und eine Interpretation der Ergebnisse erschweren. Zu den Entsorgungs- und Verwertungswegen der Verpackungen gibt es zudem zahlreiche Optionen, die nicht dämmstoffspezifisch sind, so dass die Auswahl eines klaren diesbezüglichen Szenarios nicht eindeutig wäre und die Bedeutung der Verpackung an der ökologischen Bewertung der Dämmstoffe dementsprechend schwanken würde. Im Folgenden werden zunächst die verschiedenen Methoden für die Berücksichtigung der Entsorgung vorgestellt, bevor diese dann in die hier vorzunehmende ökologische Bewertung eingeordnet werden.

4.2.1 Darstellung der Methoden

Wie werden Lasten und Nutzen aus der Entsorgung dem betrachteten Produkt innerhalb der bestehenden Verflechtungen mit anderen Produkten angerechnet? Im einfachsten Fall wird ein Produkt an seinem Lebensende entsorgt. Dann besteht keine Kopplung zu anderen Produkten. In Abbildung 4-2 ist als Beispiel die Produktion von Holzmatte-Dämmstoffen neben der davon unabhängigen Produktion eines Holzformteiles aus jeweils frischen Holzhackschnitzeln mit jeweils Beseitigung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) am Lebensende dargestellt. Die beiden Produktsysteme sind entkoppelt, jedes System trägt die Lasten der Holzhackschnitzelproduktion sowie die Lasten (und den energetischen) Nutzen aus der Beseitigung in der MVA, so dass alles voll dem betrachteten Produkt anzurechnen ist.

Wenn der Holzmatte-Dämmstoff am Lebensende nun aber stofflich zu Holzformteilen verwertet wird, entsteht eine Kopplung aus beiden Systemen über den Recyclingprozess, mit dem Holzmatte-Dämmstoff als abgebendem und dem Holzformteil als aufnehmendem System: Die Holzhackschnitzel als primärer Rohstoff müssen nur einmal produziert und einmal entsorgt werden. Dafür kommt der Aufwand für den Recyclingprozess, die stoffliche Verwertung, hinzu. Lasten und Nutzen aus der Entsorgung eines derart mit einem anderen Produkt gekoppelten Produktes werden nicht wie im Falle der Abfallökobilanz direkt angelastet und „gutgeschrieben“, weil das betrachtete Produkt sich diese mit dem nachfolgenden Produkt teilt.

Das untersuchte Produkt und dessen Umweltwirkungen soll aus diesem gekoppelten System herausgetrennt werden, um es ökologisch für sich bewerten zu können. Die gemeinsamen Lasten und Nutzen müssen daher in irgendeiner Form auf das betrachtete und das nachfolgende Produkt, welches aus dem Material des betrachteten Produktes hergestellt wird, aufgeteilt werden. Bei Dämmstoffen aus sekundären Rohstoffen gibt es eine (zusätzliche) Kopplung zum vorangegangenen Produkt, aus dessen Material der betrachtete Dämmstoff hergestellt wird. Im gewählten Beispiel der Holzmatte-Dämmstoffe und Holzformteile sind die Lasten für die Holzschnitzelproduktion, die den Nutzen aus der stofflichen Verwertung darstellen, und die MVA-Beseitigung auf die beiden Systeme aufzuteilen (zu allozieren). Diese Aufteilung erfolgt je nach gewählter Allokationsmethode anders, im Folgenden werden zunächst der Cut-Off-Ansatz und dann der 50:50-Ansatz erläutert. Aus dem Cut-Off-Ansatz leitet sich die Methodik der EN 15804 ab.

Cut Off-Ansatz

Wenn die beiden ursprünglichen Systeme nach den dort in der Praxis anfallenden Prozessschritten nur für sich betrachtet und auf diese Weise voneinander abgegrenzt werden, trägt im gewählten Beispiel der Holzmatte-Dämmstoff ganz die Produktionslasten für die primäre Rohstoffbereitstellung in Form der Holzhackschnitzel und die Holzformteile tragen ganz die Lasten für die Entsorgung in der MVA (Abbildung 4-3), bekommen dafür aber den Rohstoff ohne seine ursprünglichen Herstellungslasten. Es handelt sich dann um den s.g. Cut-Off-Ansatz, wie er in der Methodik nach der EN15804 gefordert ist. Das abgebende System (System 1) trägt die Lasten für die Rohmaterialbereitstellung, das aufnehmende System (System 2) die Beseitigung in der MVA.

Das abgebende System (1) bekommt damit keinen Nutzen für die Bereitstellung eines sekundären Rohstoffes aus der stofflichen Verwertung angerechnet, diesen hat alleine das aufnehmende System (2), welches dafür für die Beseitigung am Lebensende aufkommt. Der Aufwand für die stoffliche Verwertung, die quasi die Rohstoffbereitstellung für das aufnehmende System (2) darstellt (in diesem Fall die Zerkleinerung des Holzmatte-Dämmstoffes) ist nach der Methodik der EN15804 noch dem System (1) Holzmatte-Dämmstoff anzulasten, weil nach dieser Norm alle Verwertungsschritte vor dem Erreichen des Endes der Abfalleigenschaft dem abgebenden System zuzuordnen sind. Das Ende der Abfalleigenschaft, wie es in der Norm definiert ist, wird erst durch den Einsatz des zerkleinerten Dämmstoffes im Holzformteil erreicht.

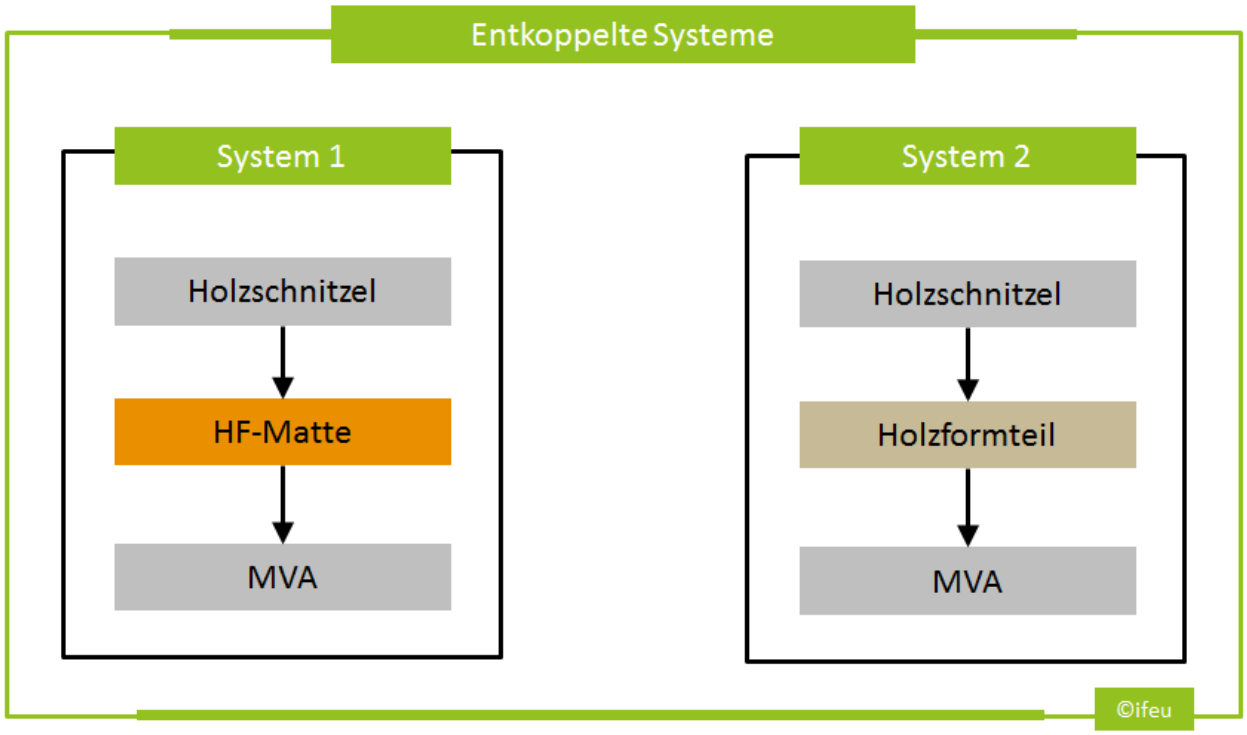


Abbildung 4-2: Separate Produktion von Holzmatten (HF) und Holzformteilen ohne stoffliche Verwertung der Holzmatten in Holzformteilen mit anschließender Entsorgung in der MVA

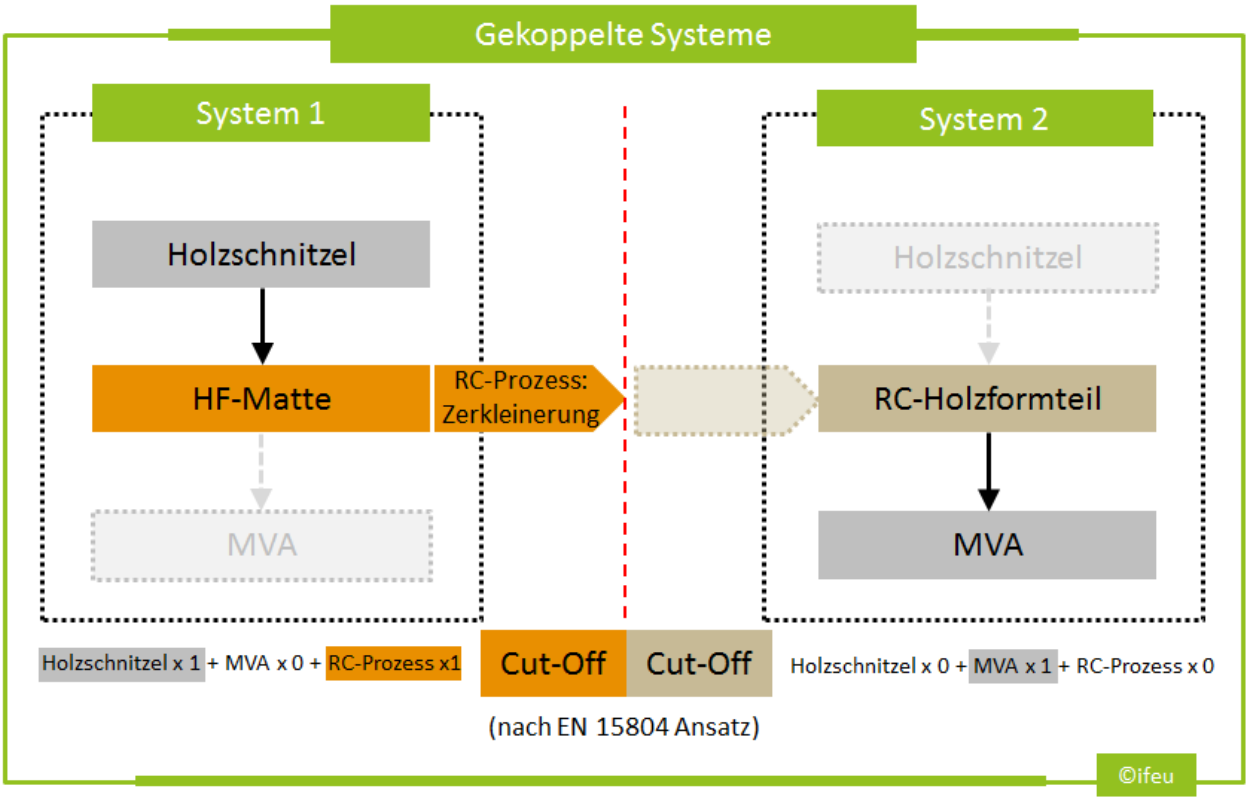


Abbildung 4-3: Kopplung der Produktion von Holzmatten (HF) über stoffliche Verwertung mit der Produktion von Holzformteilen; Aufteilung der jeweiligen Produktionslasten nach der Methodik der EN 15804 (Cut-Off-Ansatz)

Methode nach DIN EN 15804

Die EN 15804-Methodik erweitert den oben beschriebenen Cut-Off-Ansatz informatorisch noch um eine Angabe der Lasten und Nutzen jenseits des Endes der Abfalleigenschaft im sogenannten Modul D [EN 15804 2018]. Die Einsparungen für Rohmaterial und erzeugte Energie gehen in diesen Nutzen ein. Diese entsprechen dabei für die Primärmaterialanteile der Dämmstoffe den Gutschriften aus der Abfallökobilanz, wenn dadurch im aufnehmenden System (2) der Einsatz von Primärrohstoffen substituiert wird. Wenn nur andere Sekundärrohstoffe im aufnehmenden System (2) ersetzt werden, so werden abweichend von der Abfallökobilanz und dem 50:50-Ansatz (s. unten) auch nur die (geringen) Lasten, die mit den substituierten Sekundärrohstoffen (bspw. Aufbereitung) verbunden sind, mit in das Modul D eingerechnet. Für die Dämmstoffe, die (anteilig) aus sekundären Rohstoffen bestehen, wird für den Sekundärrohstoffanteil ebenso abweichend von der Abfallökobilanz und dem 50:50-Ansatz (s. unten) kein Nutzen in Modul D eingerechnet: der Input an Sekundärmaterial in die Dämmstoffproduktion wird vom Output an Material aus alten Dämmstoffen abgezogen.

Der Nutzen, der im Zuge der verschiedenen Entsorgungs- und Verwertungswege der einzelnen Dämmstoffe generiert wird, und wie er jeweils in den betrachteten Methoden angerechnet wird, ist im Anhang (Kap. 8.3) in Tabelle 8-3 dargestellt

50:50-Ansatz

Eine andere Methodik zur Aufteilung der Lasten und Nutzen des gekoppelten Systems auf die beiden Teilsysteme geht davon aus, dass der Nutzen durch die eingesparte Produktion des Rohstoffs, in unserem Beispiel der Holzhackschnitzel, im aufnehmenden System gleichermaßen auf das abgebende (1) und aufnehmende System (2) aufgeteilt wird (50:50-Ansatz). Dadurch wird sowohl die Bereitstellung stofflich verwertbarer Materiallösungen als auch der Einsatz von Sekundärrohstoffen belohnt; im Falle von entkoppelten Systemen müssten sonst beide Systeme auf Rohmaterial zurückgreifen. Dementsprechend tragen dann durch die Aufteilung des Nutzens sowohl die Holzmatte-Dämmstoffe als auch die Holzformteile jeweils nur 50 % der Lasten der Holzhackschnitzelproduktion. Ebenso wird der Aufwand für die stoffliche Verwertung zwischen beiden Systemen aufgeteilt. Aus Sicht der Holzmatte-Dämmstoffe verringert sich die Last für die Bereitstellung der Holzhackschnitzel damit um 50 % durch ebendiesen Nutzen, den die Holzmatte-Dämmstoffe als sekundärer Holzrohstoff im System Holzmatte stiften. Hinzu kommen 50 % der Lasten für die stoffliche Aufbereitung.

Diese Methodik findet im Product Environmental Footprint (PEF) [PEF 2016] für diejenigen Materialien, denen dort ein Faktor von 0,5 zugewiesen ist, Anwendung (A-Faktor). Für Produkte aus sekundären Rohstoffen wird bei diesem Ansatz konsequenterweise 50 % der Produktionslast der ursprünglichen Primärrohstoffe (bspw. Holzhackschnitzel), die hier im aufnehmenden System (2) als sekundärer Rohstoff genutzt werden, angelastet.

Beide Beispielsysteme (1 & 2) teilen sich neben dem Rohmaterialbedarf aber eigentlich auch die Lasten für die endgültige Beseitigung in der MVA, die im Falle entkoppelter Systeme jeweils durchzuführen wäre und im abgebenden System (1) durch die Kopplung eingespart wird. Daher wird in dieser Studie im erweiterten 50:50-Ansatz auch die endgültige Beseitigung in der MVA bzw. Deponierung auf beide Systeme aufgeteilt und nicht wie im PEF voll in dem System (2) belassen, in welchem die endgültige Beseitigung tatsächlich stattfindet.

Dem Holzmatte-Dämmstoff werden daher auch im Falle einer stofflichen Verwertung 50 % der Lasten der Beseitigung der Holzformteile in der MVA angerechnet, aber auch 50 % des Nutzens: Die in der MVA gewonnene Energie wird wie beim PEF als Nutzen in Höhe der mit der konventionellen Bereitstellung dieser Energie verbundenen Lasten angerechnet. Wenn ein Dämmstoff energetisch als Ersatzbrennstoff in Zementwerken oder im Biomasse-Heizkraftwerk (HKW) verwertet wird, so werden Lasten und Nutzen nach PEF voll dem Dämmstoff zugerechnet. In dem hier angesetzten erweiterten 50:50-Ansatz werden Lasten und Nutzen durch die Energiegewinnung abweichend wiederum nur zu 50 % dem abgebenden Dämmstoffsystem zugewiesen.

Die Anrechnung des Nutzens nach den verschiedenen Methoden ist im Anhang (8.3) in Tabelle 8-3 dargestellt.

100:0-Ansatz

Der Hauptzweck der in den Dämmstoffen eingesetzten Materialien ist die Dämmung. Es besteht bislang keine große Nachfrage nach den Rezyklaten, die aus den Dämmstoffen gewonnen werden können. Ein genau gegenteiliges Beispiel ist im Metallkreislauf zu finden. Daher kann für die Dämmstoffe auch ein 100:0-Ansatz untersucht werden, in welchem der Nutzen aus der stofflichen Verwertung ausschließlich dem Folgesystem angerechnet wird und gleichzeitig der Dämmstoff trotz stofflicher Verwertung die Lasten und Nutzen aus der endgültigen Beseitigung tragen muss. Mit Ausnahme der Dämmstoffe, die aus sekundären Rohstoffen hergestellt werden, wird dieser Ansatz durch das Beseitigungsszenario des jeweiligen Dämmstoffes wiedergegeben (MVA oder Deponie), weshalb der Dämmstoffvergleich auch zusätzlich jeweils mit Entsorgung wie im Status Quo durchgeführt wird. Der momentane Status Quo ist mit Ausnahme von Schaumglasplatten die Beseitigung. Bei den Dämmstoffen aus sekundären Rohstoffen müsste die Beseitigung hingegen nicht mit betrachtet werden, weil diese beim 100:0-Ansatz dem vorausgehenden System anzurechnen wäre. Da es sich bei den Dämmstoffen aus sekundären Materialien aber entweder um solche aus nachwachsenden Rohstoffen handelt oder um mineralische Dämmstoffe, deren Beseitigung jeweils mit keinen großen Lasten verbunden ist, spielt dieser Aspekt keine große Rolle.

4.2.2 Einordnung der betrachteten Methoden in die hier vorzunehmende ökologische Bewertung verschiedenster Dämmstoffe und Fazit

EN 15804

Der Cut-Off-Ansatz nach EN 15804 wird hier ausgewertet, weil es sich dabei um die im Baubereich gängige Norm für Produktökobilanzen handelt. Der Ansatz hat aufgrund seiner klaren und eindeutigen Trennung der Systeme in Orientierung an der Praxis seine Berechtigung, Diskussionen zur Allokation zwischen Produkten im ggf. vor- und nachgelagerten Lebensschritt entfallen, es wird klar das betrachtete Produkt fokussiert. Darüber lässt sich am einfachsten eine Vereinheitlichung von Ökobilanzen, die von vielen verschiedenen Organisationen und Firmen erstellt werden, erreichen. Neben der Produktion (Modul A) wird die Phase des Lebensendes (Modul C) neben den informatorisch auszuweisenden Einsparpotenzialen aus der Phase des Lebensendes (Modul D) betrachtet.

In diesem Ansatz schneiden Dämmstoffe, die aus Sekundärrohstoffen bestehen, tendenziell besser ab, weil nur die Lasten der Sekundärrohstoffbereitstellung zu tragen sind und keine Lasten für die Produktion der ursprünglichen Primärrohstoffe (Zellulose-, Jute-, Glaswolledämmstoffe, Schaumglasdämmplatten). Der Erfolg aus der stofflichen Verwertung wird jedoch abgeschnitten, so dass sich kein Ansporn für die Bereitstellung von Sekundärmaterialien hoher Qualität aus den Dämmstoffen ergibt. Sobald eine irgendwie geartete stoffliche Verwertung stattfindet, werden aber die Lasten der Beseitigung aus dem System ausgelagert, was den synthetischen Dämmstoffen zugutekommt, weil die dabei entstehenden fossilen Kohlendioxidemissionen nicht angelastet werden. Die Lasten aus der energetischen Verwertung werden hingegen voll angerechnet.

Bei den nur informatorisch ausgewiesenen Einsparpotenzialen, die bei stofflicher Verwertung am Lebensende generiert werden, schneiden die Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen vergleichsweise schlecht ab, weil das in der Dämmstoffproduktion eingesetzte Sekundärmaterial keine Einsparung in Modul D liefert. Weiterhin schneiden einige Verwertungsoptionen der Schaumglasplatten bezüglich des Einsparpotenzials aus dem Primärmaterialanteil zusätzlich schlecht ab, weil dadurch nur Sekundärrohstoffe ersetzt und angerechnet werden. Dies betrifft die stoffliche Verwertung als Schallschutzmaterial und die Rückführung in die Produktion, wodurch jeweils nur Altglas im Folgesystem eingespart wird.

Unklar ist, wo genau das Ende der Abfalleigenschaft anzusiedeln ist. In der EN 15804 werden als diesbezügliche Kriterien diejenigen benannt, die auch in der Abfallgesetzgebung und in der Praxis angewandt werden. Der Abfall muss für bestimmte Zwecke auf gängige Art und Weise eingesetzt werden, einen Marktwert haben, An-

forderungen an technische Eigenschaften sowie die Gesetzgebung und Standards für Produkte erfüllen und dabei zu keinen Beeinträchtigung von Umwelt und menschlicher Gesundheit führen. Weil dies durch die hier betrachteten Aufbereitungsschritte der Dämmstoffe nicht gegeben ist, werden in dieser Studie die Aufwände für die stoffliche Verwertung bei fast allen Dämmstoffverwertungswegen über Modul C dem System angelastet. Dies führt dazu, dass auch die Emissionen aus der Verbrennung der Bindemittel der Mineralfaserplatten und Glaswollematten im Zuge der Rückführung dieser alten Dämmstoffe in die Produktion mit angelastet werden. Hier ist aber fraglich, ob diese Lasten nicht doch erst nach dem Ende der Abfalleigenschaft auftreten, damit zu Modul D zu rechnen und nicht mehr dem System anzulasten wären. Genauso fraglich ist, ob die Lasten aus der Bereitstellung von Natriumcarbonat, welches im Zuge der Rückführung von Schaumglasplatten in die Produktion zugesetzt werden muss, nicht ebenso außerhalb des Systems anzusiedeln wäre. Einzige Ausnahme von o.g. Vorgehen ist die Glykolyse von Polyurethan-Dämmstoffen, bei welcher Diethylenglykol zugesetzt wird, dessen Bereitstellungslasten dem Modul D zugeordnet werden. Das Diethylenglykol ist zwar ein notwendiger Bestandteil im Glykolyseprozss, vermehrt aber das dabei gewonnene RC-Polyol um die zugesetzte Menge und hat damit nichts mehr direkt mit dem Dämmstoff zu tun, welcher den anderen Teil des RC-Polyols bildet.

Erweiterter 50:50-Ansatz

Die jeweils hälftige Aufteilung des Nutzens auf ggf. vor- und nachgelagerte Lebensschritte ist insbesondere dann gerecht, wenn wie im Falle der Dämmstoffe nicht bekannt ist, wie groß die Nachfrage nach den Rezyklaten sein wird. Dadurch verbessern sich die Ergebnisse für Dämmstoffe aus primären Materialien im Falle einer stofflichen Verwertung gegenüber der EN 15804. Auch die Aufbereitungslasten werden nur hälftig angerechnet. Dämmstoffe aus sekundärem Material (Zellulose, Jute, Glaswolle, Schaumglas) tragen hingegen, wenn sie nicht stofflich oder nicht stoffgleich verwertet werden, 50 % der Lasten der ursprünglichen Bereitstellung der primären Rohstoffe und der Aufbereitung im vorangegangenen Lebensweg, so dass sich die entsprechenden Ergebnisse im Vergleich zur EN 15804 verschlechtern.

Wenn sich der betrachtete Dämmstoff in der Mitte einer Kaskade befindet, was bspw. für Jutedämmstoffe aus sekundärer Jutefaser im Falle einer stofflichen Verwertung zutrifft, kürzen sich die anzurechnenden Lasten für die Bereitstellung der primären Jutefaser aus dem vorangegangenen Lebensweg gegen den anzurechnenden Nutzen für die Nutzung der Jutedämmstoffe im nachfolgenden System, wodurch dort primäre Jutefaser eingespart wird. Es verbleibt dann jeweils die hälftige anzulastende Aufbereitung des Juteabfalls aus dem vorangegangenen und betrachteten System. Dasselbe gilt für Zellulosedämmstoffe sowie die sekundären Anteile der Glaswolledämmstoffe und Schaumglasplatten, wenn diese stofflich verwertet werden.

Im Gegensatz zum Modul D nach der EN 15804 werden die Lasten für die Primärmaterialbereitstellung über den Nutzen auch dann aufgeteilt, wenn dadurch im Folgesystem nur andere Sekundärrohstoffe eingespart werden, was Vorteile für die Verwertungswege von Schaumglasplatten darstellt.

Ebenso wird in diesem Ansatz durch die Aufteilung von Lasten und Nutzen der endgültigen Beseitigung sichergestellt, dass Dämmstoffe auch im Falle einer stofflichen Verwertung einen Teil der endgültigen Beseitigung tragen. Für die synthetischen Dämmstoffe werden dadurch 50 % der fossilen Kohlendioxidemissionen im Zuge der endgültigen Beseitigung angelastet, auch wenn eine stoffliche Verwertung stattfindet. Für Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen führt das dazu, dass die Hälfte der Lasten und Nutzen aus der Beseitigung der Rohstoffe abgezogen werden, weil diese dem Vorprodukt angelastet werden, so dass im Falle einer direkten Beseitigung dieser Dämmstoffe am Lebensende nur die Hälfte davon getragen wird. Im Falle einer Verwertung dieser Dämmstoffe (Kaskade) wird die endgültige Beseitigung dementsprechend gar nicht angerechnet.

Die energetische Verwertung in Zementwerken und Biomasse-HKWs geht sowohl in Bezug auf Lasten und Nutzen nur hälftig in das betrachtete System ein, so dass nur 50 % des fossilen Kohlendioxidausstoßes aus synthetischen Dämmstoffen angelastet wird.

Fazit

Es ist zu erwarten, dass die Produktion der Dämmstoffe den größten Anteil an den Lasten ausmacht. Durch eine stoffliche Verwertung wird eine entsprechende Einsparung im Folgesystem erreicht, die Lasten der Materialbereitstellung teilen sich dann zwischen den Systemen auf. Ob dies aber angerechnet werden kann, hängt von der Methode der Ökobilanzierung ab.

Der nach der EN 15804 verfolgte Cut-Off-Ansatz erlaubt keine Verrechnung. Hier wird ausschließlich auf das betrachtete System in der Praxis fokussiert. Da die Aufteilung des Nutzens aus stofflicher Verwertung und auch Energiegewinnung aber einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben, müssen die informatorischen Substitutionseffekte nach der EN 15804 in der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Daher werden hier zum einen die mit der EN 15804 erzielten Ergebnisse der Dämmstoffe nach der jeweils entsprechend besten Entsorgungs- bzw. Verwertungsoption verglichen. Zum anderen wird dann v.a. der 50:50-Ansatz angewendet, um die Dämmstoffe mit der diesbezüglich jeweils besten Verwertungsoption abschließend vergleichend nebeneinander zu stellen, wodurch der Nutzen aus der stofflichen Verwertung in der Auswertung berücksichtigt wird.

Weiterhin wird betrachtet, wie die Dämmstoffe jeweils nach beiden Methoden abschneiden, wenn anschließend eine Entsorgung wie im Status Quo stattfindet. Dieser Fall entspricht zumeist der Beseitigung und kommt damit dem 100:0-Ansatz nahe, der berücksichtigt, dass die in den Dämmstoffen eingesetzten Materialien v.a. für den Zweck der Dämmstoffherstellung erzeugt wurden, so dass der Dämmstoff trotz stofflicher Verwertung die vollen Produktions- und Beseitigungslasten tragen muss. Bei Schaumglasplatten findet keine Beseitigung statt, so dass dafür stattdessen die derzeitige Entsorgungspraxis über den Bauschutt mit Einsatz im Bereich Straßen- und Wegebau betrachtet wird.

4.2.3 Umgang mit biogenem Kohlenstoff

Die Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen haben biogenen Kohlenstoff gespeichert, der dem CO_2 der Atmosphäre entstammt. Es handelt sich bei den genannten Dämmstoffen somit um temporäre Kohlenstoffsenken. Bei der Verbrennung wird der gespeicherte Kohlenstoff dann wieder als CO_2 frei gesetzt. In Summe wird dadurch die CO_2-Konzentration der Atmosphäre nicht verändert. Wenn die Dämmstoffe am Lebensende nicht verbrannt, sondern stofflich verwertet werden, wird der gespeicherte Kohlenstoff im nächsten Produkt erhalten. Auch hier stellt sich die Frage, ob die Kohlenstoffsenke nur dem ersten Produkt anzurechnen, zwischen den Produkten aufzuteilen oder an das nächste Produkt weiterzugeben ist.

Im ersten Fall bekämen Dämmstoffe aus primären nachwachsenden Rohstoffen eine Einsparung beim Treibhauseffekt angerechnet, der nur (voll) ausgeglichen würde, wenn am Lebensende eine Verbrennung stattfindet. Im zweiten Fall käme es mit dem 50:50-Ansatz zu einer Aufteilung der Senke und aufgrund der gleichzeitigen Aufteilung der endgültigen Beseitigung auch bei stofflicher Verwertung zu einem Ausgleich. Im dritten Fall würde beim 50:50-Ansatz bei stofflicher Verwertung die C-Senke weitergegeben und durch die hälftige Aufteilung der endgültigen Beseitigung verbliebe beim Dämmstoff eine Last im Treibhauseffekt in Höhe der Hälfte der C-Senke, wohingegen das aufnehmende System eine Einsparung in gleicher Höhe ausweisen könnte. Mit der EN 15804-Methode würde der dritte Fall auch im Falle von stofflicher Verwertung zum Ausgleich führen, weil der Kohlenstoff weitergegeben würde und die Beseitigung mit den Kohlendioxidemissionen im nachfolgenden System angesiedelt wäre.

Nach der EN 15804 muss der biogene Kohlenstoff rechnerisch weitergegeben werden, so dass kein biogener Kohlenstoff im Produkt verbleibt. Er wird entweder weitergegeben oder im Zuge von Verbrennungsprozessen wieder als Kohlendioxid freigesetzt. Die Aufnahme biogenen Kohlenstoffs und die Emissionen von Kohlendioxid aus biogenem Kohlenstoff werden somit als neutral betrachtet, eine Senke darf nicht angerechnet werden.

Jenes Vorgehen wird auch in dieser Studie gewählt. Nur biogene Kohlendioxidemissionen werden immer durch vorangehende Kohlenstoffaufnahmen ausgeglichen. Dadurch wird die temporäre Speicherung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre durch die nachwachsenden Dämmstoffe in dieser Studie quantitativ nicht berücksichtigt.

Im Verwertungsweg Pyrolyse von Zellulose- und Holzfasereinblasdämmstoffen wird nur ein Teil des biogenen Kohlenstoffs auch wieder freigesetzt, ein Teil verbleibt in der Biokohle, von der wiederum ein Teil langfristig im Boden gespeichert bleibt. Die daraus resultierende Kohlenstoffsenke wird als Entlastung im Treibhauseffekt nach dem 50:50-Ansatz zur Hälfte diesen Dämmstoffen mit diesem Entsorgungsweg angerechnet. Nach der EN 15804 findet diese Anrechnung hingegen nicht statt.

4.3 Charakterisierung und Interpretation

Die Emissionen und Ressourcenflüsse auf Lasten- und Nutzenseite werden über Charakterisierungsfaktoren zu den für die betrachteten Dämmstoffe relevanten Wirkungskategorien aggregiert. In Tabelle 4-1 sind diese unter Angabe der jeweils beitragenden Emissionen gelistet. Aufgrund der im Rahmen dieser Studie nicht möglichen eigenen Erhebung von Produktionsdaten findet eine Beschränkung auf die wesentlichsten Indikatoren statt. Da für mineralische Dämmstoffe der Abbau mineralischer Ressourcen mit großem Vorkommen stattfindet, wäre beispielsweise der Summenindikator kumulierter Rohstoffaufwand im Gegensatz zum Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen zur hiesigen Bewertung geeignet. Dafür liegen aber keine Daten aus der Produktion vor, so dass die mineralischen Ressourcen nicht bewertet werden.

Tabelle 4-1: Betrachtete Wirkungskategorien; grau: nicht in die Interpretation der Ergebnisse einbezogen

Wirkungskategorie	**Datenkategorie der Sachbilanz**
Ressourcenbeanspruchung	*Summenindikator fossiler kumulierter Energieaufwand (KEA fossil) (MJ Heizwert)*: Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle *ADP elements (Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen): Steine, Splitt, Kies, Sand*
Treibhauseffekt	fossiles Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O)
Versauerungspotenzial	Schwefeldioxid (SO_2), Stickstoffoxide, Ammoniak (NH_3), Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF), Schwefelwasserstoff (H_2S)
Eutrophierungspotenzial	*terrestrisch:* Stickstoffoxide, Ammoniak, Lachgas *aquatisch:* N-Verbindungen, P-Verbindungen, CSB
Humantoxizität	*Feinstaub ($PM_{2,5}$)-Potenzial:* Primärpartikel, Sekundärpartikel aus SO_2, NO_x, NH_3, NMVOC
Sommersmog: POCP-Potenzial	Ethylen, Acetylen, NMVOC
Ozonabbaupotenzial	Lachgas (N_2O), (teil)halogenierte Kohlenwasserstoffe (bspw. R22)

Um zusätzlich Aussagen darüber treffen zu können, wie quantitativ bedeutend die Beiträge zu den jeweiligen Wirkungskategorien auch im Vergleich zueinander sind, werden die Ergebnisse anschließend auf die Wirkungen normiert, die ein Einwohner in Deutschland jährlich über die ganze Volkswirtschaft hinweg betrachtet verursacht. Die ökologische Bedeutung der jeweiligen Charakterisierungsfaktoren/Indikatoren wurde über das Umweltbundesamt in einer Ordinalskala qualitativ bewertet.

Tabelle 4-2: Jährliche Pro-Kopf-Lasten und ökologische Bedeutung für die Wirkungskategorien und Indikatoren

Wirkungskategorien/Indikatoren	Jährliche Pro-Kopf-Lasten	Ökologische Bedeutung
Treibhauseffekt	11.776 kg CO_2-äq./a	Sehr hoch
KEA fossil	134 GJ/a	Mittel
Versauerungspotenzial	31,5 kg SO_2-äq./a	Hoch
Terr. Eutrophierungspotenzial	5,03 kg PO_4-äq./a	Hoch
Aqu. Eutrophierungspotenzial	3,8 kg PO_4-äq./a	Mittel
PM 2,5-Feinstaubpotenzial	23,9 kg PM 2,5-äq./a	Hoch

Quellen: Ökologische Bedeutung: UBA (1999)
Pro-Kopf-Lasten: UBA (2013), UBA (2014a), UBA (2014b), ABEB (2013), Destatis (2018)

4.4 Betrachtete Szenarien und Prozesse

Für jeden Dämmstoff werden alle in Kap. 3.3 und 3.4 aufgeführten Verwertungswege für jeweils alle betrachteten Bauteile als Szenarien berechnet.

Die Ergebnisse für die Abfallökobilanz werden anhand eines Bauteiles berechnet, welches alle Dämmstoffe umfasst. Mit der Abfallökobilanz wird eruiert, wie die betrachteten Entsorgungswege pro Dämmstoff jeweils aus ökologischer Sicht zu bewerten sind. Dies ist unabhängig vom betrachteten Bauteil. Die Referenzierung auf ein Bauteil schlägt sich nur in der Höhe der absoluten Werte nieder, wohingegen die Relationen zwischen den Entsorgungswegen gleich bleiben. Es werden die Entsorgungswege der unverklebt verbauten Dämmstoffe betrachtet. In manchen Bauteilen liegen die Dämmstoffe hingegen verklebt vor, so dass für alle stofflichen Entsorgungswege leichte Veränderungen dahingehend auftreten, dass etwas mehr Strom für die Aufbereitung benötigt wird und die Aufbereitungsverluste beseitigt werden (Kap. 3.2.3). Die Veränderungen der verklebten Variante in diesen Entsorgungswegen gegenüber der unverklebten Variante sind aber so gering, dass sie hier nicht dargestellt werden. Die Reihenfolge der Entsorgungswege bezüglich ihrer ökologischen Vorteilhaftigkeit ändert sich dadurch nicht. Als Ergebnis daraus liegt der ökologisch vorteilhafteste Entsorgungsweg für jeden Dämmstoff vor. Dies soll den Herstellern auch einen Hinweis darauf geben, welche Entsorgungswege zukünftig verstärkt weiterentwickelt werden sollten.

Die Produktökobilanzen nach der EN 15804 dienen dem Vergleich der verschiedenen Dämmstoffe pro Bauteil (Abbildung 2-8). Jeder Dämmstoff schneidet je nach betrachtetem Entsorgungsweg anders ab. Es wird davon ausgegangen, dass zukünftig alle aufgezeigten Entsorgungswege möglich sind. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, wird daher für jeden Dämmstoff der jeweils beste Entsorgungsweg, wie er sich nach der EN 15804 ergibt, dargestellt. Dies ist im Vergleich zu den Ergebnissen aus der Abfallökobilanz oftmals ein anderer Entsorgungsweg, weil mit der EN 15804 der Nutzen nicht angerechnet wird und somit immer Entsorgungswege, die einen möglichst geringen ökologischen Aufwand verursachen, die besten Ergebnisse liefern. Zusätzlich wird betrachtet, wie die Dämmstoffe im Vergleich untereinander abschneiden, wenn die Entsorgung wie derzeit im Status Quo stattfindet (Beseitigung bzw. bei Schaumglasplatten Entsorgung mit dem Bauschutt). Als Ergebnis aus beiden betrachteten Szenarien kann abgeschätzt werden, welcher Dämmstoff in welchen Bauteilen wie vorteilhaft aus ökologischer Sicht ist, wenn der Nutzen des Dämmmaterials in einem Folgeprodukt ausgeblendet wird.

Auch die Produktökobilanzen nach dem 50:50-Ansatz dienen dem Vergleich der verschiedenen Dämmstoffe pro Bauteil (Abbildung 2-8). Nach diesem Ansatz wird der Nutzen mit berücksichtigt. Die Reihenfolge aus der diesbezüglichen ökologischen Bewertung der Entsorgungswege entspricht dadurch weitestgehend der der Abfal-

lökobilanz. Abweichungen gibt es ggf. im Falle der energetischen Verwertung, weil hier Lasten und Nutzen wie im Falle der stofflichen Verwertung hälftig aufgeteilt werden, dadurch aber die endgültige Beseitigung entfällt, die bei der stofflichen Verwertung zusätzlich mit Lasten und Nutzen angerechnet wird. Über diesen Ansatz werden die Dämmstoffe mit ihren danach jeweils besten stofflichen Verwertungswegen unter Einbezug des dadurch erzielten Nutzens miteinander verglichen. Die energetische Verwertung im Zementwerk stellt zwar teilweise den besten Entsorgungsweg dar, wenn der Nutzen über die vermiedene Verbrennung von Steinkohle bilanziert wird. Angesichts der zunehmenden Bedeutung der Kreislaufwirtschaft wird aber hier davon ausgegangen, dass zukünftig stofflich verwertet werden muss. Weiterhin wird auch hier betrachtet, wie die Dämmstoffe im Vergleich untereinander abschneiden, wenn am Lebensende jeweils eine Entsorgung wie derzeit im Status Quo stattfindet. Aus beiden Szenarien wird eine ökologische Reihenfolge der Dämmstoffe in den verschiedenen Bauteilen eruiert (= Ergebnis).

Die Ergebnisse für Lasten und Nutzen werden jeweils als sektorale Balkendiagramme dargestellt, so dass die jeweiligen Beiträge einzelner Prozesse ersichtlich werden. Auf Lastenseite werden dabei folgende Sektoren unterschieden:

- Produktion (nur bei Produktökobilanzen): Mit der Dämmstoffproduktion verbundene Lasten für die Rohmaterial-, Energiebereitstellung und Prozessemissionen
- Produkttransport (nur bei Produktökobilanzen): Lasten für LKW-Transport des Dämmstoffes zur Baustelle über eine Strecke von 100 km (Berücksichtigung verschiedener Volumina)
- Rückbau: Strombereitstellung für das Ablösen verklebter Dämmstoffe oder das Absaugen von Einblasdämmung sowie optional für Sortierung; optional Energiebedarf für Komprimierung
- Transport Entsorgung/Verwertung: Lasten für LKW-Transport des Dämmstoffes von der Baustelle zur Entsorgung über eine Strecke von einheitlich 100 km (Berücksichtigung verschiedener Volumina)
- Emissionen Entsorgung und thermisch: Emissionen durch Beseitigung oder energetische Verwertung, Strombereitstellung für EBS-Aufbereitung
- Verwertung stofflich: Energiebereitstellung für Aufbereitungsprozesse (Zerkleinern, …)

Beim 50:50-Ansatz kommen folgende Sektoren hinzu:

- Beseitigung 2. Lebensweg: Teil der Emissionen durch endgültige Beseitigung des Dämmstoffmaterials nach einem späteren Lebensweg
- Materialallokation Last: Teilweise Anlastung der ursprünglichen Primärrohstoffbereitstellung für Dämmstoffe, die aus sekundären Materialien hergestellt werden
- Last Strom vermiedene Beseitigung 0. Lebensweg (Lebensweg des Vorgängerprodukts vor dem Lebensweg des Dämmstoffs): Abzug eines Teils des über GS Strom gegebenen Nutzens (s. unten) für die Beseitigung von Dämmstoffen aus sekundärem Material in der MVA, weil das vorangegangene Produkt, welches das Rohmaterial für den Dämmstoff liefert, einen Teil der endgültigen Beseitigung trägt und daher den damit verbundenen Stromnutzen angerechnet bekommt
- Last Wärme vermiedene Beseitigung 0. Lebensweg: Abzug eines Teils des über GS Wärme gegebenen Nutzens (s. unten) für die Beseitigung von Dämmstoffen aus sekundärem Material in der MVA, weil das vorangegangene Produkt, welches das Rohmaterial für den Dämmstoff liefert, einen Teil der endgültigen Beseitigung trägt und daher den damit verbundenen Wärmenutzen angerechnet bekommt

Auf Nutzenseite gibt es folgende Sektoren:

- Gutschrift (GS) Strom: Nutzen durch im Zuge von thermischen Prozessen erzeugten Strom, wodurch aktueller deutscher Netzstrommix mit dessen Bereitstellungslasten eingespart wird
- GS Wärme und Energie: Nutzen durch im Zuge von thermischen Prozessen erzeugte Wärme, wodurch dieselbe Menge sonst über Gasheizung gelieferter Wärme bzw. in Zementwerken die Verfeuerung von Steinkohle eingespart wird

- GS Materialallokation: Nutzen durch Material aus Dämmstoffen im Folgeprodukt, wodurch dort die Rohstoffbereitstellung mit ihren Lasten eingespart wird
- C-Aufnahme und -Weitergabe: Aufnahme biogener Kohlenstoff, dessen Freisetzung in den obigen Emissionen Entsorgung und thermisch angelastet und hier wieder abgezogen wird, so dass biogene Kohlendioxidemissionen als neutral behandelt werden

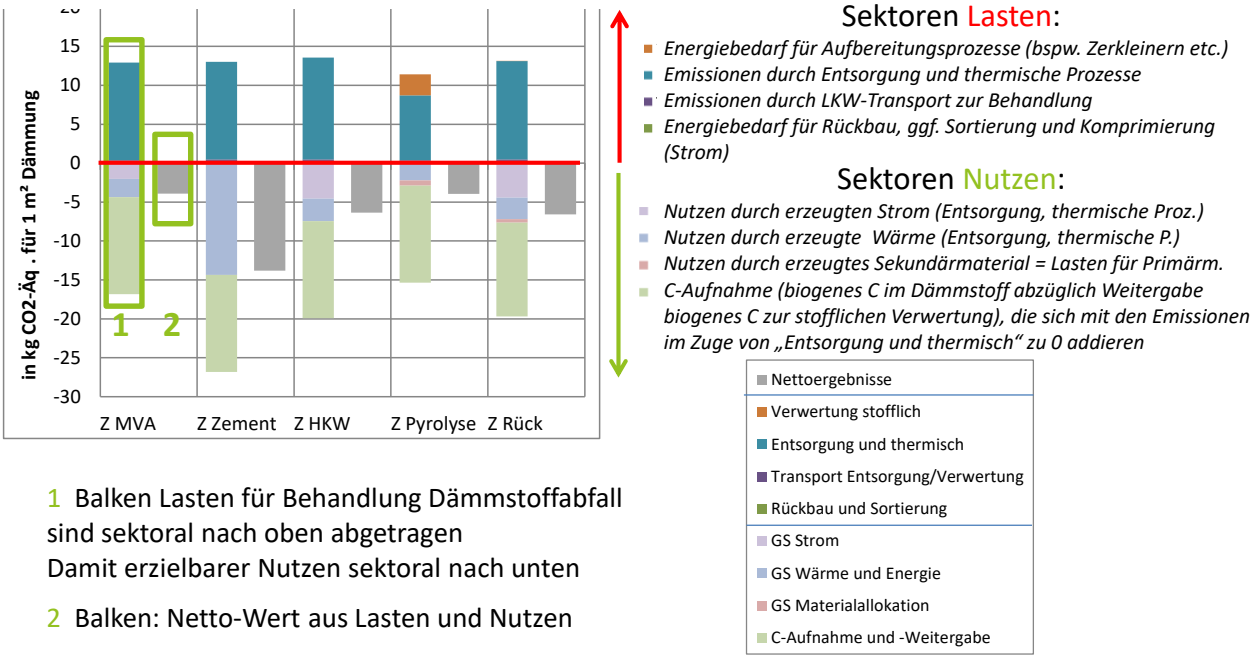
Beim 50:50-Ansatz kommt hinzu:

- GS vermiedene Beseitigung 0. Lebensweg: Entlastung von einem Teil der Emissionen aus dem Sektor Entsorgung und thermisch für die Beseitigung von Dämmstoffen aus sekundärem Material, weil das vorangegangene Produkt, welches das Rohmaterial für den Dämmstoff liefert, einen Teil der Lasten für die endgültige Beseitigung trägt

5 Entsorgung der Dämmstoffalternativen aus ökologischer Sicht - Abfallökobilanz

Dämmstoffe zur Entsorgung fallen entweder als Verschnittmaterial an den Baustellen oder aber bei Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen an. Für die Entsorgung gibt es jeweils unterschiedliche Optionen. Mit der Abfallökobilanz wird im Folgenden untersucht, wie die betrachteten Entsorgungswege der Dämmstoffe jeweils aus ökologischer Sicht zu beurteilen sind.

Die Lasten für die Dämmstoffproduktion werden hier nicht betrachtet. Jedes System hat zwei Balken, wobei der linke Balken nach oben über der x-Achse die mit dem jeweiligen Entsorgungsweg verbundenen Lasten und nach unten unter der x-Achse den damit verbundenen Nutzen beziffert. Der rechte Balken stellt den Netto-Wert aus Lasten und Nutzen und damit das eigentliche Ergebnis dar (Abbildung 5-1).



1 Balken Lasten für Behandlung Dämmstoffabfall sind sektoral nach oben abgetragen
Damit erzielbarer Nutzen sektoral nach unten

2 Balken: Netto-Wert aus Lasten und Nutzen

Abbildung 5-1: Erläuterung zur Darstellung der Ergebnissen aus der Abfallökobilanz; Z = Zelluloseeinblasdämmstoff

Die absoluten Werte beziehen sich auf die Dämmung von 1 m² leichtem Flachdach. Das Ergebnismuster gilt aber bauteilunabhängig.

Die verschiedenen Entsorgungswege für jeden Dämmstoffe werden im Anhang (Kap. 8.4) in …….. dargestellt.

5.1 Entsorgungsoptionen für den Zellulosedämmstoff

Tabelle 5-1: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen des Zellulosedämmstoffes (Z)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5
Beseitigung in MVA (Z MVA)	energetisch im Zementwerk (Z Zement)	energetisch im Biomasse Heizkraftwerk (Z HKW)	energetisch / stofflich über Pyrolyse (Z Pyrolyse)	Rückführung in Produktion (zu 3 %, Rest Opt. 4) (Z Rück)

In den drei betrachteten Entsorgungswegen Beseitigung in der MVA, energetische Verwertung im Zementwerk und Biomasse-HKW (Abbildung 5-2) findet eine thermische Behandlung statt. Dies führt im Treibhauseffekt zur Emission von v.a. Kohlendioxidemissionen im Sektor „Entsorgung und thermisch“, die über den Sektor „C-Aufnahme und –Weitergabe“ wieder rechnerisch “abgezogen“ werden, weil sie zuvor im Holz gebunden und damit der Atmosphäre entzogen wurden. Bei der Pyrolyse wird der Teil des biogenen Kohlenstoffs, der nicht zu Biokohle umgesetzt wird, spätestens mit der Verbrennung des Pyrolysegases ebenso freigesetzt. Der zugehörige Beitrag im Sektor „Entsorgung und thermisch“ fällt entsprechend dem Übergang in die Biokohle geringer aus, wird aber durch die Verfeuerung von Erdgas wiederum erhöht. Die so erzeugte Biokohle wird landwirtschaftlich genutzt und dort, der Biosphäre ausgesetzt, in Teilen abgebaut (angesetzt sind gut 50 %), so dass die im Sektor „stoffliche Verwertung“ subsummierten Kohlendioxidemissionen freigesetzt werden. In Summe wird durch die Beständigkeit eines Teils der Biokohle etwas mehr Kohlendioxid im Holz gebunden als wieder freigesetzt. Für die Rückführung in die Produktion ähnelt das Bild dem der Pyrolyse, weil in diesem Szenario nur 3 % Dämmstoff tatsächlich rückgeführt werden kann und für den Rest die Pyrolyse unterstellt ist.

Durch die Produktion von Strom und Wärme in der MVA und im Biomasse-HKW wird die jeweils äquivalente Energiemenge mit den zugehörigen Bereitstellungslasten eingespart, für die beim Strom der konventionelle Energieträgermix bzw. bei der Wärme Gasheizungen angesetzt sind, was sich in den Sektoren „GS Strom“ und „GS Wärme“ zeigt. Die höheren energetischen Wirkungsgrade des Biomasse-HKW führen zu höheren entsprechenden Einsparungen.
Für die im Zementwerk durch die Dämmstoffverbrennung produzierte Energie wird die Verbrennung von Steinkohle mit dementsprechend hohen Lasten als Einsparung gegengerechnet, die sich im hohen Beitrag im Sektor „GS Wärme“ wiederfinden.
Die Nutzung der Abwärme aus der Pyrolyse als Prozesswärme spart die im gleichen Sektor gezeigten Lasten aus einem Erdgaskessel ein. In der Pyrolyse und Rückführung in die Produktion sind Beiträge im Sektor „GS Materiallallokation“ sichtbar, worüber eine Quantifizierung der eingesparten Rohstofflasten erfolgt, die im Folgesystem durch die stoffliche Verwertung vermieden werden. Bei der Pyrolyse wird 1/5 der Bor-Menge in den Zellulosedämmstoffen in der Biokohle als pflanzenverfügbar angerechnet, so dass die Produktionslasten dieser Bormenge (Borsäure, Borax) als Einsparung ausgewiesen sind.
Durch die 3 % des Zellulosedämmstoffes, die rückgeführt werden, wird in der Dämmstoffproduktion der Einsatz von Holzschliff mit dessen Lasten, das Flammschutzmittel und ein Teil des Prozessstroms eingespart, so dass der Beitrag zu diesem Sektor auch schon trotz der kleinen Rückführungsmasse sichtlich größer ausfällt. Darüber wird das Einsparpotenzial deutlich, das durch eine Steigerungsrate der Rückführung in die Produktion über diesen Sektor gehoben werden könnte. In der Dämmstoffproduktion selbst wird zwar durch die Rückführung nur sekundärer Holzstoff eingespart, dieser kann dann aber in einem anderen Produkt primären Holzstoff ersetzen, so dass schlussendlich Holzschliff als Ausgangsstoff für bspw. Zeitungspapier, eingespart wird. Es sind dann mehr Sekundärrohstoffe für die Papierproduktion verfügbar.

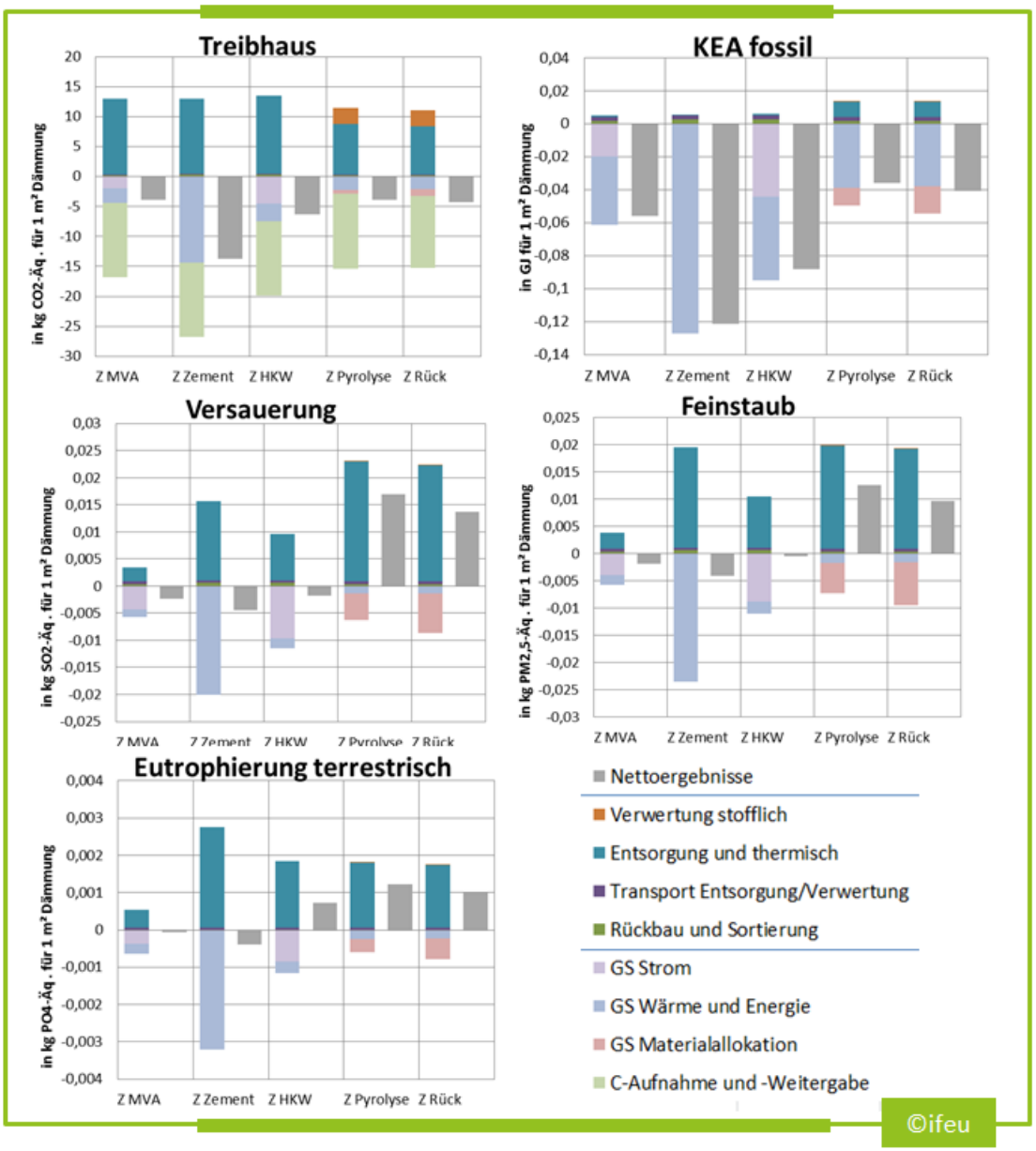


Abbildung 5-2: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege des Zellulosedämmstoffs; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Im fossilen kumulierten Energieaufwand ergibt sich ein ähnliches Bild, weil die vermiedenen Lasten für die erzeugte Energie, die als Einsparungen ausgewiesen sind, hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe entstehen. Bei der Pyrolyse zeigt sich im Sektor „Entsorgung und thermisch" der zusätzliche Erdgasbedarf.

Im Versauerungspotenzial ergeben sich wie im terrestrischen Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial (Feinstaub) nur geringe Lasten für die Beseitigung in der MVA und insbesondere höhere für das Zementwerk sowie mit Ausnahme des terrestrischen Eutrophierungspotenzials auch für die Pyrolyse. Bewertet werden hier NOx-, Ammoniak- sowie beim Versauerungspotenzial zusätzlich SO_2- und beim PM 2,5-Potenzial nochmals zusätzlich Staubemissionen. Die MVA hat die beste Abgasreinigungstechnik, die Zementwerke haben mit den hier angesetzten ifeu-Daten eine schlechtere, so dass dort höhere Emissionen durch die Verbrennung der Dämmstoffe entstehen. Die Abgaskonzentrationen für die Pyrolyse beruhen auf Versuchen mit Papierfaserschlamm und Getreidespelzen und können evtl. noch reduziert werden. Auffällig sind die relativ großen Beiträge im Sektor

„GS Materialallokation“ im System Pyrolyse durch die Einsparung von Bor (Borsäure, Borax), da dessen Produktion mit relativ hohen SO_2- und NOx-Emissionen verbunden ist.
Die größeren energetischen Einsparungen aufgrund der höheren Energiewirkungsgrade im Biomasse-HKW gegenüber der MVA können im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial (Feinstaub) die größeren Emissionen durch die schlechtere Abgasreinigung nicht ausgleichen, so dass die MVA hier besser abschneidet. Die Entsorgung über das Biomasse-HKW führt im terrestrischen Eutrophierungspotenzial zu einer Nettolast, die Pyrolyse und dadurch auch die Rückführung in die Produktion führt zusätzlich im Versauerungs- und PM 2,5-Potenzial (Feinstaub) zu einer Nettolast. Bei den übrigen Wirkungskategorien werden netto „Entlastungen“ erzielt.

Werden die Ergebnisse in den gerade betrachteten Indikatoren jeweils auf die diesbezüglichen pro-Kopf-Lasten eines Einwohners in Deutschland bezogen, so zeigt sich, dass die normierten Beiträge zu den verschiedenen Indikatoren in einer ähnlichen Größenordnung liegen (Abbildung 5-3). In Summe ist ersichtlich, dass im Status Quo die Entsorgung der Zellulosedämmstoffe im Zementwerk die ökologischste Option ist, solange im Zementwerk ansonsten Steinkohle verfeuert würde.

Die Rückführung in die Produktion bietet aber durch die Einsparung von Holzschliff ein deutliches Potenzial, das selbst schon mit nur 3 % Rückführung in den Ergebnissen deutlich sichtbar ist. Es sollte daher zukünftig möglichst viel in die Produktion rückgeführt werden.

Die Pyrolyse schneidet mit den hier getroffenen Annahmen zu den Abgaskonzentrationen und Einsparungen, wonach nur 1/5 des Borgehaltes und sonst nur die teilweise Kohlenstoffsequestrierung als Nutzen der Biokohle auf dem Acker angerechnet wird, nicht besser ab als eine Beseitigung in der MVA. Dies gilt dann, wenn durch die in der MVA produzierte Energie Strom mit dem bisherigen Energieträgermix bzw. Wärme aus Gasheizungen eingespart wird.

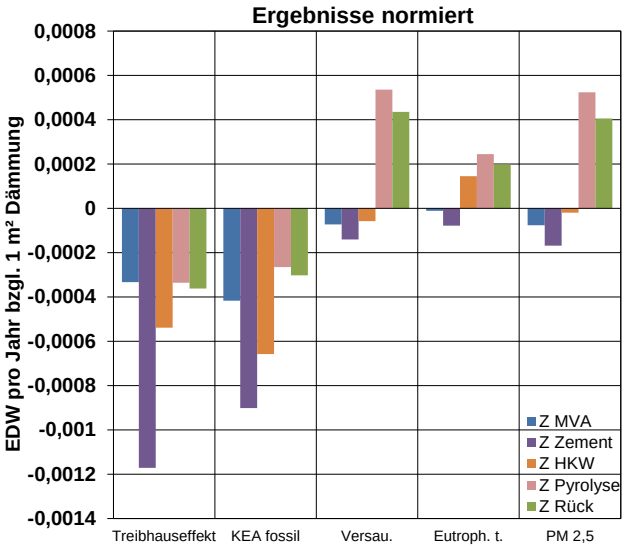


Abbildung 5-3: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz des Zellulosedämmstoffes; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.2 Entsorgungsoptionen für den Hanfdämmstoff

Tabelle 5-2: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen des Hanfdämmstoffes (Ha)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5
Beseitigung in MVA (Ha MVA)	Energetische Verwertung im Zementwerk (Ha Zement)	Energetische Verwertung im Biomasse Heizkraftwerk (Ha HKW)	Verarbeitung zu Formteilen (Ha sto)	Rückführung in die Produktion (zu 5%, Rest Opt. 4) (Ha Rück)

Die energetische Entsorgung in MVA, Zementwerk und Biomasse-HKW führt zu Emissionen im Sektor „Entsorgung und thermisch“. Im Treibhauseffekt werden diese Emissionen rechnerisch für den Hanfanteil über den Sektor „C-Aufnahme und –Weitergabe“ wieder abgezogen, weil sie zuvor in der Hanfpflanze gebunden wurden. Die Stützfasern, die aus fossilen Kunststoffen bestehen, führen zu weiteren Kohlendioxidemissionen, die als Last hinzukommen. Die Emissionen, die in den weiteren Wirkungskategorien betrachtet werden, fallen in der MVA aufgrund der besseren Abgasreinigungsgrade geringer aus. Dem steht der größere energetische Nutzen durch die höheren Energiewirkungsgrade im Biomasse-HKW gegenüber, so dass mehr aktueller deutscher Netzstrommix und Wärme aus Gasheizungen mit den zugehörigen Lasten eingespart werden. Netto schneidet das Biomasse-HKW aber gegenüber der MVA im terrestrischen Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial trotzdem schlechter ab, im Versauerungspotenzial im Gegensatz zum Zellulosedämmstoff nicht. Solange im Zementwerk Steinkohlefeuerung eingespart wird, überwiegt der zusätzliche Nutzen dadurch, obwohl die Emissionen noch größer ausfallen als im Biomasse-HKW.

Hanfdämmstoffe lassen sich stofflich zu Formteilen verarbeiten, der biogene Kohlenstoff wird nicht emittiert, sondern weitergegeben. (Abbildung 5-4). Die Lasten für die stoffliche Verwertung, die die Strombereitstellung für eine Zerkleinerung umfassen, sind kaum erkennbar klein. Dadurch werden im Folgesystem der Rohstoff Hanffaser und über die im Dämmstoff enthaltenen Stützfasern entsprechende Kunststoffe mit den jeweils zugehörigen Produktionslasten, die im Sektor „GS Materialallokation“ in Summe ausgewiesen sind, eingespart. Da auch hier nach derzeitigem Forschungsstand nur 5 % in die Produktion rückgeführt werden können und für den Rest die stoffliche Verwertung in Formteilen unterstellt wird, ähneln sich die Ergebnisse beider Entsorgungswege stark. Durch die Rückführung in die Produktion werden durch den Stützfaseranteil dort keine Stützfasern eingespart, sondern Hanffasern. Da die Lasten der Stützfasern deutlich größer ausfallen als diejenigen der Hanffasern, ist die ausgewiesene Einsparung entsprechend geringer. Die Lasten aus der landwirtschaftlichen Produktion von Hanf scheinen im herangezogenen Datensatz nur zu einem geringen Anteil den Fasern zugerechnet zu werden, weil es sonst keine Verwendungsmöglichkeit für die Fasern gibt, so dass die über die Substitution von Hanffasern erzielten Einsparungen relativ klein ausfallen. Die Lasten werden daher ggf. unterschätzt, falls nicht genügend entsprechende Restbiomasse zur Verfügung steht.

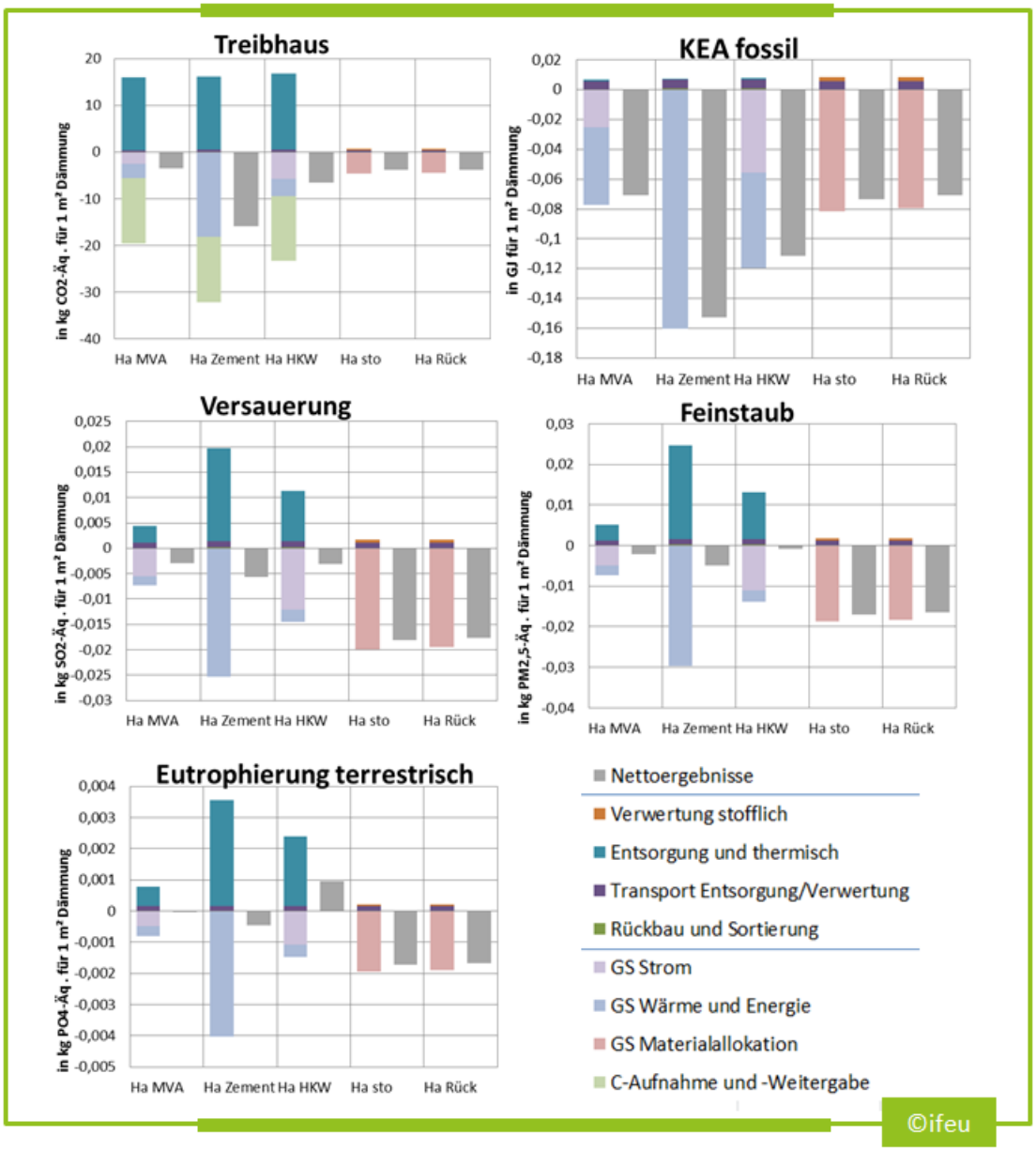


Abbildung 5-4: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege des Hanfdämmstoffs; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Insgesamt zeigt sich auch nach Normierung auf die pro-Kopf-Lasten (Abbildung 5-5), dass die stoffliche Verwertung in Formteilen insbesondere im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial Vorteile bietet, weil über die Stützfasern auch Kunststoffe eingespart werden. Dies gilt eingeschränkter auch für die Rückführung in die Produktion. Die stoffliche Verwertung sollte weiterentwickelt werden. Die energetische Verwertung im Zementwerk schneidet in der Kategorie Treibhauseffekt gut ab, solange dort stattdessen Steinkohle verfeuert würde.

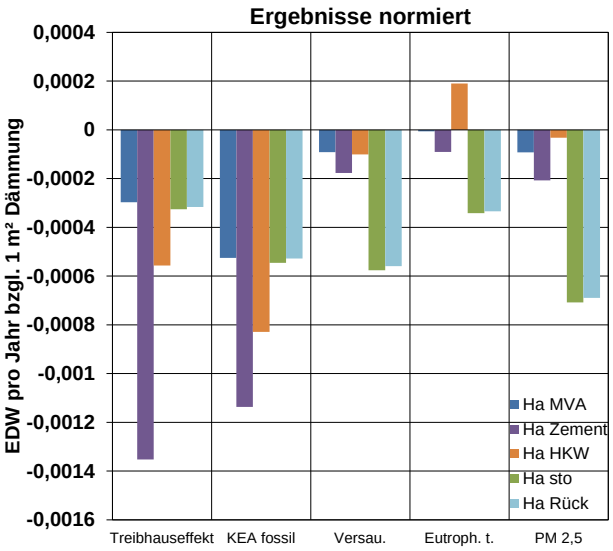


Abbildung 5-5: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz des Hanfdämmstoffes; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.3 Entsorgungsoptionen für den Jutedämmstoff

Tabelle 5-3: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen des Jutedämmstoffes (J)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5
Beseitigung in MVA (J MVA)	Energetische Verwertung im Zementwerk (J Zement)	Energetische Verwertung im Biomasse Heizkraftwerk (J HKW)	Verarbeitung zu Formteilen (J sto)	Rückführung in die Produktion (zu 5%, Rest Opt. 4) (J Rück)

Die Ergebnisse für den Jutedämmstoff (Abbildung 5-6) ähneln wiederum denen des Hanfdämmstoffes. Die Verbrennung der Stützfasern aus fossilen Kunststoffen führen auch hier zu weiteren Lasten im Treibhauseffekt durch die energetische Beseitigung, die nicht wie die biogenen Kohlendioxidemissionen aus dem Juteanteil aufgrund der vorausgegangen Aufnahme aus der Atmosphäre wieder rechnerisch über den Sektor „C-Aufnahme und –Weitergabe“ abgezogen werden. Der größere energetische Nutzen gegenüber der MVA durch Substitution von mehr aktuellem Strommix und Wärme aus Gasheizungen wird im Falle des Biomasse-HKW im terrestrischen Eutrophierungspotenzial und PM 2,5-Potenzial durch die höher ausfallenden Emissionen in ein schlechteres Ergebnis umgekehrt. Der diesbezügliche Nutzen durch die energetische Verwertung im Zementwerk durch die Einsparung von Steinkohlefeuerung ist hingegen so groß, dass er die größeren Lasten etwas mehr als ausgleichen kann.

Im Gegensatz zu Hanfdämmstoffen ist hier aber neben der Einsparung von Kunststoffen über die Stützfasern durch die stoffliche Verwertung in Formteilen auch die Einsparung von Jutefasern mit deutlichen Umweltentlastungseffekten verbunden. Die Lasten für die Produktion der eingesparten primären Jutefasern sind deutlich größer als diejenigen, die der Hanffaser angelastet werden. Es wird von einer Einsparung primärer Jutefasern ausgegangen, obwohl der Dämmstoff aus sekundären Jutefasern besteht, weil dadurch im Gesamtsystem mehr Sekundärjute verfügbar ist, die in einem anderen Produkt wie bspw. Formteilen primäre Jutefasern substituieren kann. Obwohl durch die Rückführung in die Produktion keine Kunststoffe eingespart werden, werden dabei aus diesem Grund ebenso großen Einsparungen erzielt wie durch die stoffliche Verwertung in Formteilen.

Durch die stoffliche Verwertung können daher unabhängig von der Kunststoffsubstitution relativ große Einsparungen erreicht werden. Dies führt auch dazu, dass die stoffliche Verwertung hier sogar im Treibhauseffekt und fossilem kumulierten Energieaufwand fast genauso gut abschneidet wie die energetische Verwertung im Zementwerk.

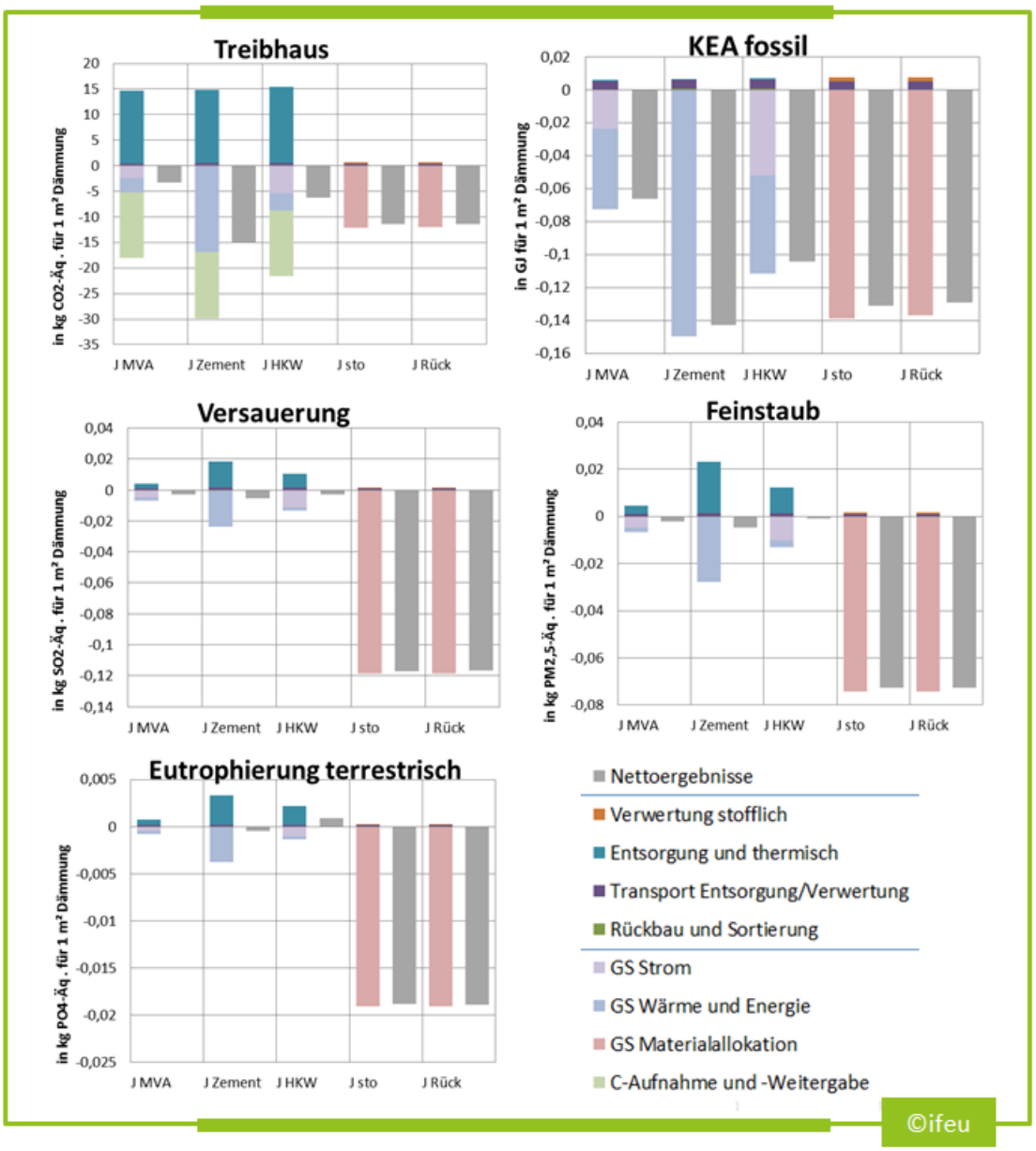


Abbildung 5-6: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege des Jutedämmstoffs; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Es zeigt sich, dass die stoffliche Verwertung sowohl in Formteilen als auch die Rückführung in die Produktion Vorteile bietet, weil dadurch insbesondere die landwirtschaftliche Produktion von Jutefasern und bei den Formteilen auch die Stützfasern aus Kunststoffen eingespart werden können (Abbildung 5-7). Beide substituierte Prozesse sind mit relativ hohen Lasten verbunden. Die stoffliche Verwertung sollte weiterentwickelt werden. Daneben schneidet die energetische Verwertung im Zementwerk in der Wirkungskategorie Treibhauseffekt gut ab, solange dort stattdessen Steinkohle verfeuert würde.

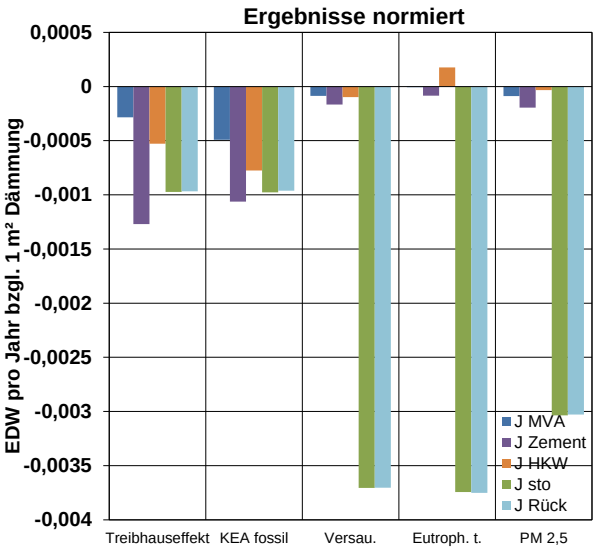


Abbildung 5-7: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz des Jutedämmstoffes; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.4 Entsorgungsoptionen für die Holzfasereinblasdämmung

Tabelle 5-4: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Holzfasereinblasdämmung (Hein)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5	Option 6
Beseitigung in MVA (Hein MVA)	Energetische Verwertung im Zementwerk (Hein Zement)	Energetische Verwertung im Biomasse Heizkraftwerk (Hein HKW)	energetisch / stofflich über Pyrolyse (Hein Pyrolyse)	Verarbeitung zu Formteilen (Hein sto)	Rückführung in die Produktion (zu 5%, Rest Opt. 5) (Hein Rück)

Durch die energetische Entsorgung des Holzes in MVA, Zementwerk und Biomasse-HKW entstehen kaum Nettolasten im Treibhauseffekt. Die dabei auftretenden Kohlendioxidemissionen („Entsorgung thermisch“) werden durch die vorausgegangene Bindung dieses Kohlendioxids aus der Atmosphäre im Holz ausgeglichen („C-Aufnahme und –Weitergabe“). Im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungspotenzial und PM 2,5-Potenzial zeigen sich im Falle einer Behandlung im Biomasse-HKW Netto-Lasten und damit im Gegensatz zum Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand schlechtere Werte als mit Beseitigung in der MVA. Grund dafür ist die im Vergleich zur MVA schlechtere Abgasreinigung in Verbindung mit relativ hohen Schwefelgehalten durch das Brandschutzmittel Ammoniumsulfat. Der im Vergleich zur MVA größere Nutzen durch die größere produzierte Menge an Strom und Wärme, die aktuellen deutschen Netzstrommix und Wärme aus Gasheizungen einspart, kann dies in diesen Wirkungskategorien nicht ganz ausgleichen. Durch die Einsparung von Steinkohlefeuerung im Zementwerk gelingt hingegen mehr als nur der Ausgleich.

Bei der Holzfasereinblasdämmung sind mit der stofflichen Verwertung wiederum nur kleinere Einsparungen zu erzielen, weil die dadurch eingesparte Holzproduktion mit nur relativ geringen Lasten verbunden ist (Abbildung 5-8). Durch die Rückführung in die Produktion können höhere Einsparungen erzielt werden, weil dadurch Flammschutzmittel und Teile der Prozessenergie (70 % des Stroms, 100 % der Wärme) eingespart werden können. Da im Rückführungsszenario aber nur 5 % rückgeführt werden und der Rest stofflich in Formteilen verwertet wird, unterscheiden sich die Ergebnisse für diese beiden Verwertungsoptionen kaum. Die 5 % entsprechen

eher der derzeitigen Praxis als den technischen Möglichkeiten, hier dürfte mehr machbar sein, weil das Material weitestgehend den sonst zugeführten Rohstoffen entspricht.

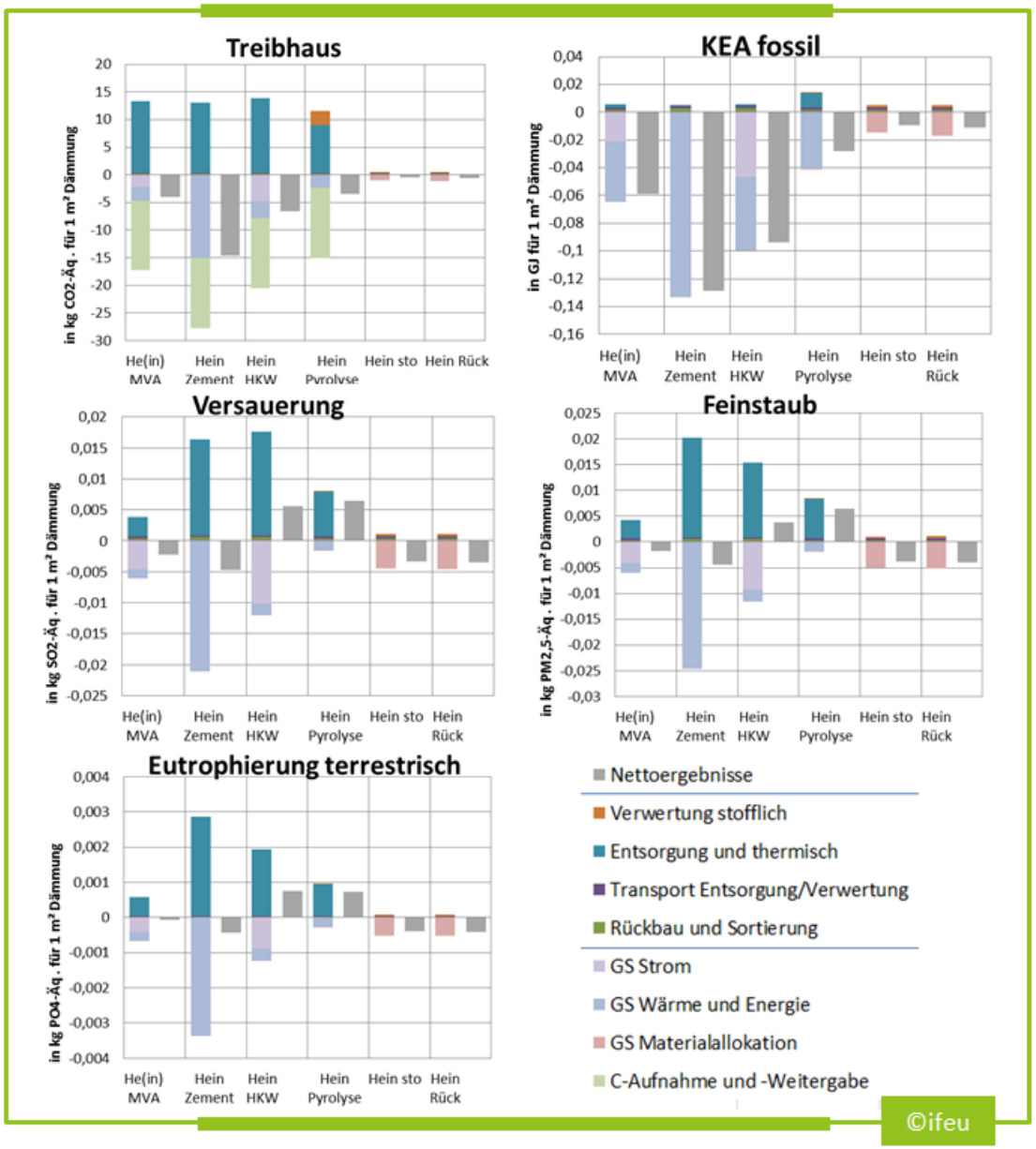


Abbildung 5-8: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Holzfasereinblasdämmung; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Wie bei den Zellulosedämmstoffen kann die Holzfasereinblasdämmung auch über eine Pyrolyse zu Biokohle verwertet werden. Hierdurch wird in Summe weniger biogenes Kohlendioxid abgegeben als ursprünglich von der Pflanze aufgenommen wurde (teilweise Kohlenstoffsequestrierung), es kommen aber noch Lasten aus der Erdgaszufeuerung hinzu. Dass bei dieser landwirtschaftlichen Verwertung der Biokohle auch 20 % des als Flammschutzmittel enthaltenen Ammoniumsulfats als Dünger angerechnet werden können, schlägt sich nicht merklich in den Ergebnissen nieder. Die Einsparung, die sich aus der Nutzung der Abwärme aus der Pyrolyse als Prozesswärme anstelle deren Erzeugung in Gaskesseln ergibt, zeigt sich im Sektor „GS Wärme und Energie“. Die in der Pyrolyse den Sektor „Entsorgung und thermisch“ bestimmenden Datensätze, die zur Abbildung der Abgaskonzentrationen herangezogen wurden, stammen aus Versuchen mit einer Holzhackschnitzeltrocknung. Sie fallen deutlich niedriger aus als die für die Pyrolyse von Zellulose angesetzten. Insgesamt verbleiben bei der Pyrolyse Netto-Lasten im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial.

Insgesamt zeigt sich (Abbildung 5-9), dass die energetische Verwertung im Zementwerk Vorteile bietet, solange dort der Einsatz von Steinkohle substituiert werden kann. Die stofflichen Verwertungswege schneiden ebenfalls gut ab. Insbesondere die Rückführung in die Produktion hat Potenziale, die aufgrund der unterstellten geringen Rückführungsraten in den Ergebnissen noch kaum deutlich wird.

Die Pyrolyse schneidet mit den hier getroffenen Annahmen zu Substitutionserfolgen durch den Einsatz der Biokohle (20%des Ammoniumsulfats und nur teilweise Kohlenstoffsequestrierung), nicht besser ab als eine Beseitigung des Dämmstoffes in der MVA, obwohl für die Abgaskonzentrationen aus der Pyrolyse vergleichsweise geringe Werte angesetzt wurden. Dies gilt dann, wenn durch die in der MVA produzierte Energie Strom mit dem bisherigen Energieträgermix bzw. Wärme aus Gasheizungen eingespart werden kann.

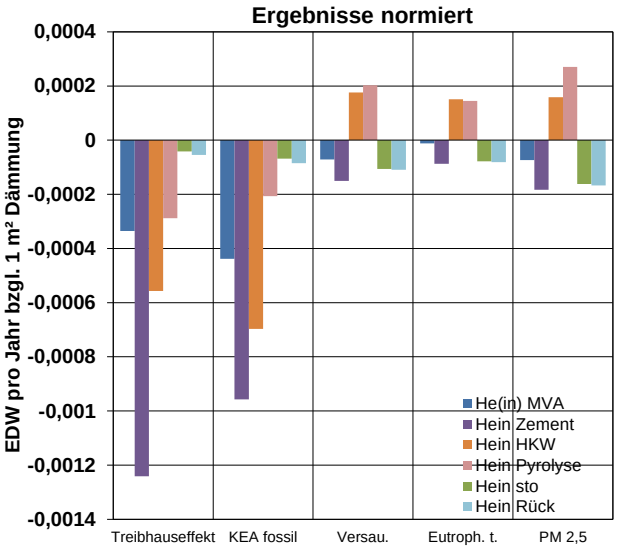


Abbildung 5-9: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Holzfasereinblasdämmung; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.5 Entsorgungsoptionen für die Holzfasermatten

Tabelle 5-5: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Holzfaserdämmmatte (HM)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5
Beseitigung in MVA (HM MVA)	Energetische Verwertung im Zementwerk (HM Zement)	Energetische Verwertung im Biomasse Heizkraftwerk (HM HKW)	Verarbeitung zu Formteilen (HM sto)	Rückführung in die Produktion (zu 5%, Rest O. 4) (HM Rück)

Die Ergebnisse der Holzfasermatten ähneln denen der Hanfdämmstoffe, weil eingespartes Holz zum einen ähnlich geringe Lasten wie Hanffasern hat, zum anderen die Holzfasermatten wie auch die Hanfdämmstoffe neben dem Hauptmaterial zusätzlich Stützfasern aus Kunststoffen besitzen. Letztere können durch den Einsatz in Formteilen dort entsprechende Kunststoffe einsparen, so dass sich die Stützfaserlasten als Einsparpotenzial im Sektor „GS Materialallokation“ zeigen. Durch die Rückführung in die Produktion wird durch die Summe der Holz- und Stützfasermatrix nur Holz eingespart, aber dafür auch relativ viel Prozessenergie (200 kWh/t Strom, 50 % des Prozesswärmebedarfs der nassen Holzfaserdämmplattenproduktion), so dass in Summe die Rückführung in die Produktion nicht viel schlechter abschneidet als die stoffliche Verwertung in Holzformteilen. Die

stofflichen Einsparungen sind daher ein Stück weit unabhängiger von den Kunststoffen aus den Stützfasern als bei Hanfdämmstoffen. Die angesetzte Einsparung für Prozesswärme wird über die Lasten eines Gaskessels abgebildet.

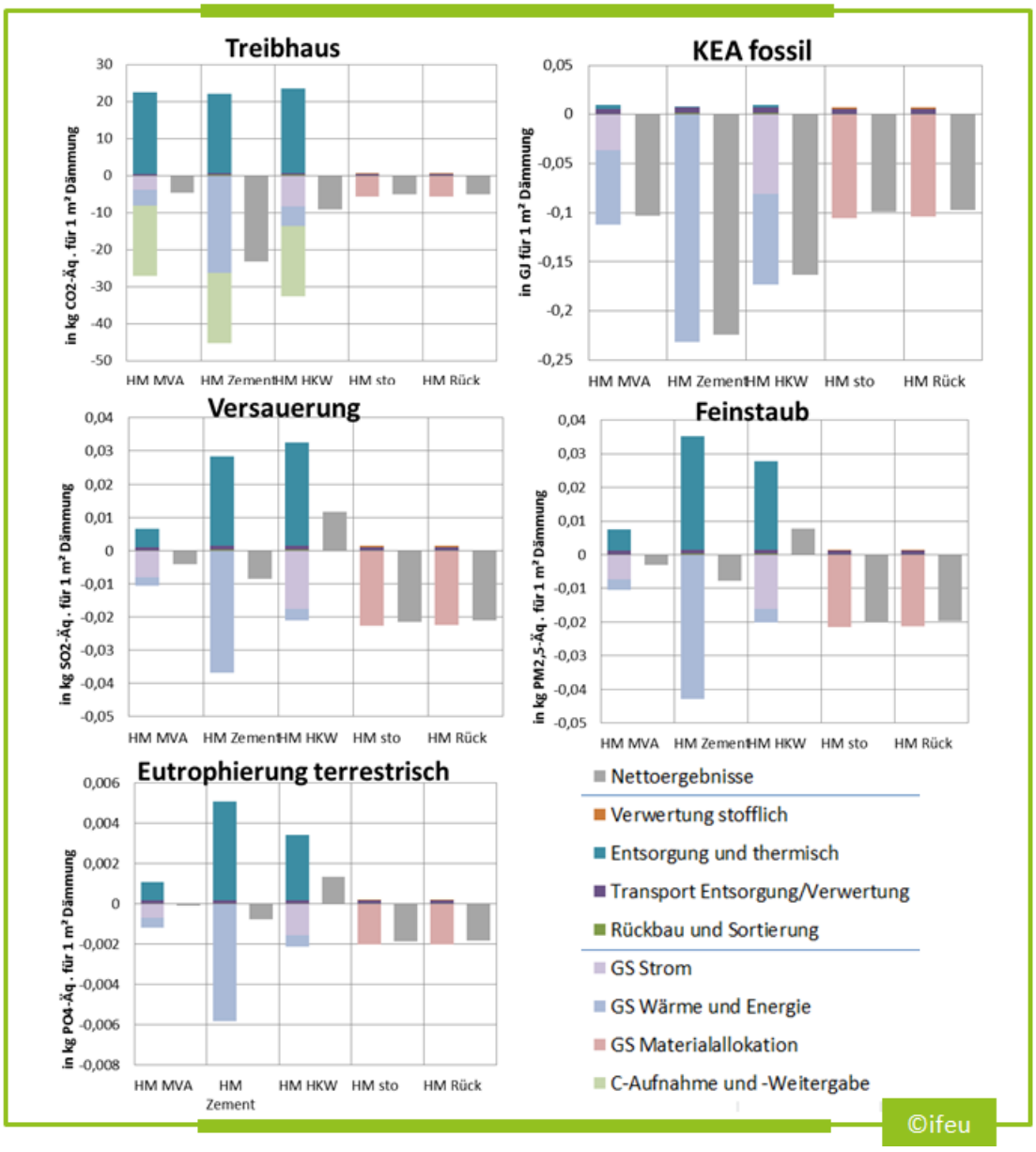


Abbildung 5-10: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Holzmattendämmung; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Die vergleichsweise hohen Lasten durch die energetische Entsorgung in MVA, Zementwerk und Biomasse-HKW im Versauerungspotenzial (Sektor „Entsorgung thermisch“) resultieren aus dem höheren Schwefelgehalt des Dämmstoffes (Flammschutzmittel Ammoniumsulfat). Die schlechtere Abgasreinigung führt trotz des größeren energetischen Nutzens im Falle des Biomasse-HKW zu Netto-Lasten im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial und damit im Gegensatz zum Treibhauseffekt und fossilem kumulierten Energieaufwand zu einem schlechteren Abschneiden als die Beseitigung in der MVA. Der energetische Nutzen umfasst die Einsparung von aktuellem deutschem Netzstrommix und von Wärme aus Gasheizungen, im Zementwerk hingegen die Einsparung von Steinkohlefeuerung mit entsprechend größeren Beiträgen, die die größeren Lasten mehr als ausgleichen. Die Verbrennungslasten im Treibhauseffekt werden für den Holzanteil durch die

vorausgegangene Aufnahme aus der Atmosphäre (Sektor „C-Aufnahme und –Weitergabe) ausgeglichen. Die Stützfasern aus fossilen Kunststoffen bedingen aber eine zusätzliche Last.

Insgesamt zeigt sich (Abbildung 5-11), dass die stoffliche Verwertung in Formteilen wie auch die Rückführung in die Produktion insbesondere im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial Vorteile bietet, weil in Formteilen über die Stützfasern auch Kunststoffe bzw. durch die Rückführung in die Produktion Prozessenergie eingespart werden. Die stoffliche Verwertung sollte weiterentwickelt werden. Die energetische Verwertung im Zementwerk schneidet in der Kategorie Treibhauseffekt gut ab, solange dort stattdessen Steinkohle verfeuert würde.

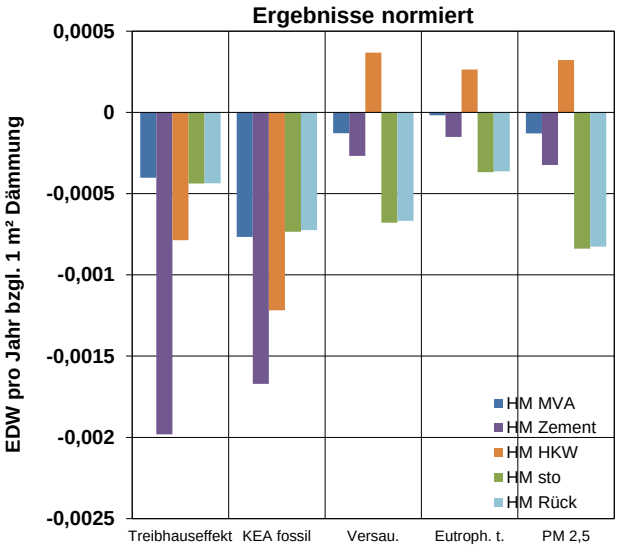


Abbildung 5-11: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Holzmatten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.6 Entsorgungsoptionen für Holzfaserdämmplatten

Tabelle 5-6: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Holzfaserdämmplatte (nass und trocken produzier) (HPn bzw. HPt)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5
Beseitigung in MVA (HPn / HPt MVA)	Energetische Verwertung im Zementwerk (HPn / HPt Zement)	Energetische Verwertung im Biomasse Heizkraftwerk (HPn / HPt HKW)	Verarbeitung zu Formteilen (HPn / HPt sto)	Rückführung in die Produktion (zu 5%, Rest Opt. 4) (HPn / HPt Rück)

Die Ergebnismuster für nasse (Abbildung 5-12) und trocken produzierte Holzfaserdämmplatten (Abbildung 5-13) fallen sehr ähnlich aus, weil hier nur die Entsorgung und nicht die Produktion betrachtet wird und sich die Heizwerte und die stoffliche Zusammensetzung kaum unterscheiden, obwohl bei den trocken produzierten Platten PU-Klebstoff zum Einsatz kommt. Die absoluten Ergebniswerte liegen für die nass produzierten Holzfaserdämmplatten höher. Gegenüber den trocken hergestellten Holzfaserdämmplatten wird mehr Masse benötigt, um dieselbe Dämmwirkung zu erreichen.

Die Ergebnisse ähneln denen der Holzeinblasdämmung. Durch die werkstoffliche Verwertung in einem anderen Produkt kann jeweils Holz durch die Summe aus Holz und Leim/Additive eingespart werden. Die mit der Holzproduktion verbundenen Lasten, die eingespart werden, sind vergleichsweise gering und resultieren hauptsächlich aus dem Holztransport (Sektor „GS Materialallokation“). Bislang besteht für diese werkstoffliche Verwertung noch keine technische Lösung. Es handelt sich um einen rein hypothetischen Entsorgungsweg. Besonders schwierig könnte sich in der Praxis diese Verwertung für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten erweisen, da der enthaltene PU-Kleber eine Verwertung als „Holz“ möglicherweise ausschließt.
Durch die Rückführung in die Produktion wird neben Holz auch ein Teil der Prozessenergie der Dämmstoffproduktion eingespart, der genauso hoch angesetzt ist wie bei Holzmatten. Dadurch schneidet die Rückführung in die Produktion besser ab als die werkstoffliche Verwertung in anderen Produkten, was aber in den Ergebnissen durch die geringe Rückführrate von 5 % jedoch kaum sichtbar wird.

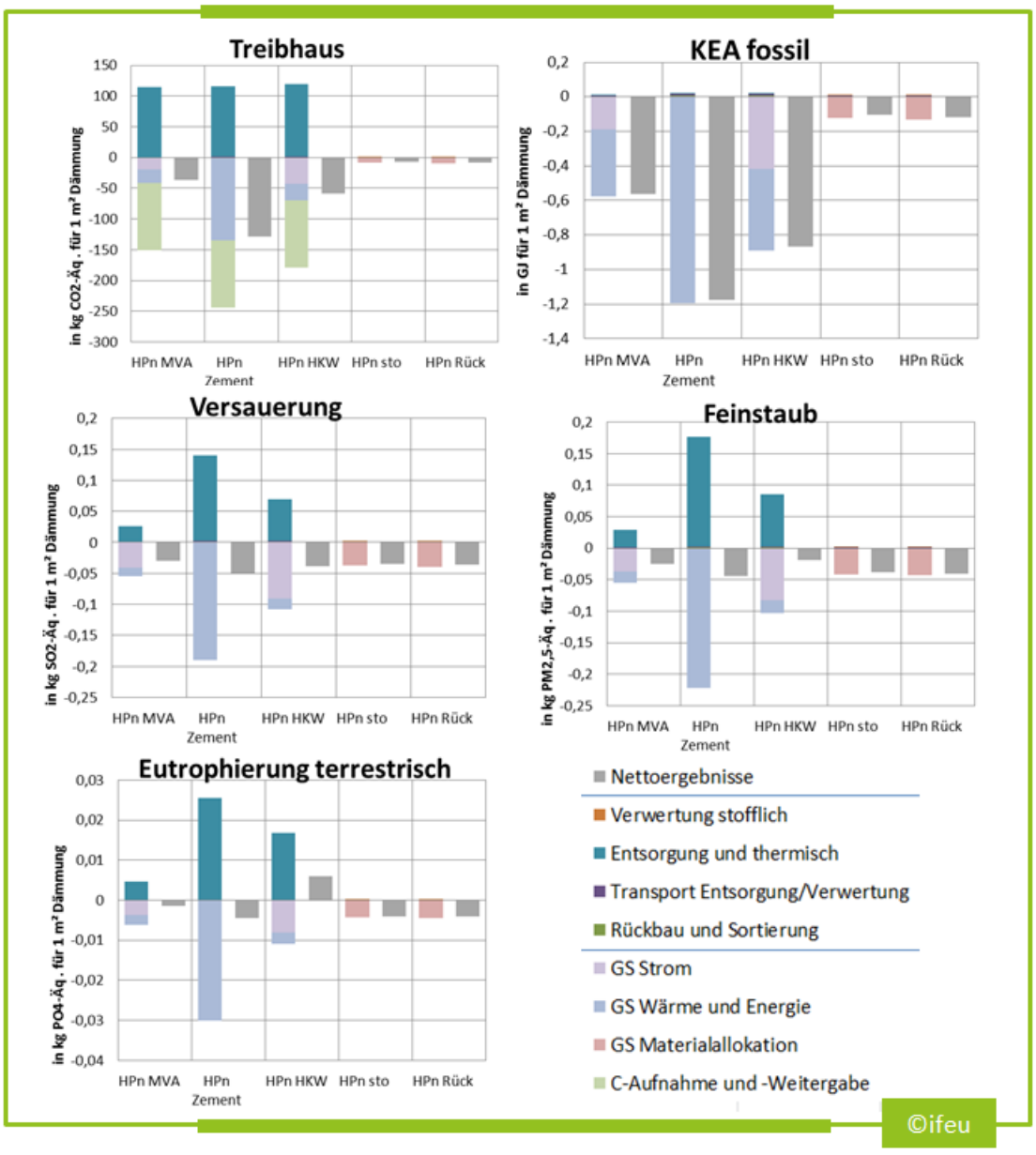


Abbildung 5-12: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der nass produzierten Holzfaserdämmplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Die Ergebnisse in der Wirkungskategorie Versauerungspotenzial sind im Vergleich zur Holzfasereinblasdämmung für die thermischen Behandlungsoptionen günstiger, da keine schwefelhaltigen Flammschutzmittel die Emissionen bestimmen (Sektor „Entsorgung und thermisch“). Die schlechtere Abgasreinigung im Biomasse-HKW führt daher nur im terrestrischen Eutrophierungspotenzial zu Netto-Lasten und einem deutlich schlechteren Abschneiden als die Beseitigung in der MVA. Die im Vergleich zur MVA größere produzierte Menge an Strom und Wärme, die deutschen Netzstrommix und Gasheizung einspart, kann die Lasten durch die höheren Emissionen im Versauerungs- und PM 2,5-Potenzial (fast) ausgleichen. Beim Zementwerk ist der zusätzliche Nutzen durch die Einsparung von Steinkohlefeuerung größer als die zusätzlichen Lasten. Im Treibhauseffekt werden die Lasten aus der Holzverbrennung durch die vorangegangene Aufnahme von Kohlendioxid in der Biomasse neutralisiert (Sektor „C-Aufnahme und –Weitergabe“). Es verbleiben netto die zusätzlichen Lasten für die Verbrennung der fossilen Additive bzw. Kleber. Durch den größeren Nutzen schneidet das Biomasse-HKW hier und im fossilen kumulierten Energieaufwand besser ab als die MVA.

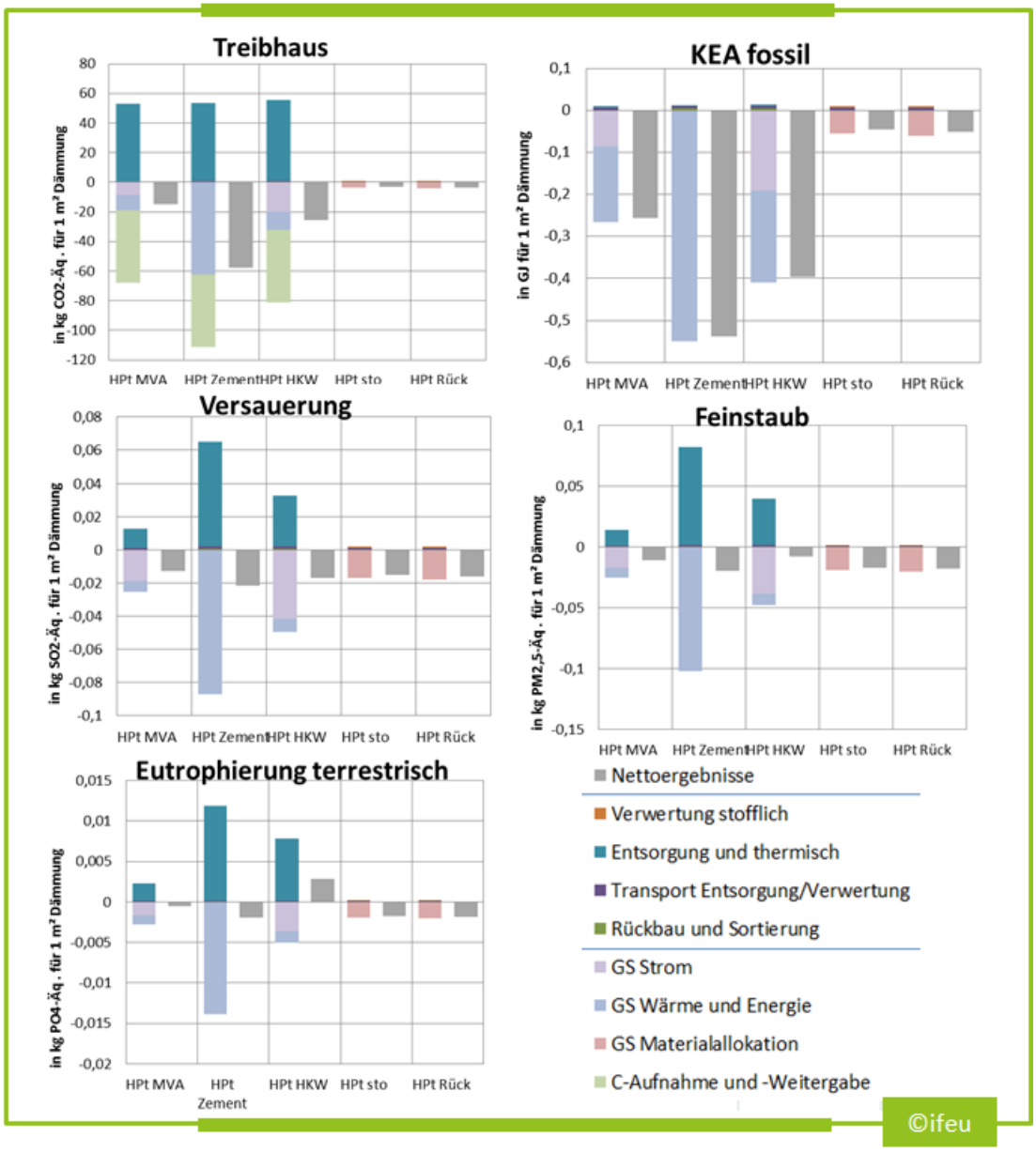


Abbildung 5-13: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der trocken produzierten Holzfaserdämmplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Insgesamt zeigt sich (Abbildung 5-14), dass die energetische Verwertung im Zementwerk im Treibhauseffekt Vorteile bietet, solange dort stattdessen Steinkohle verfeuert würde. Die stofflichen Verwertungswege schneiden aber auch gut ab, insbesondere die Rückführung in die Produktion liefert im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungspotenzial und PM 2,5-Potenzial bessere Ergebnisse als das Zementwerk. Die werkstoffliche Verwertung in andere Produkte existiert bislang so nicht, müsste aber technisch möglich sein. Auch im Hinblick auf die Ergebnisse sollten diese Wege entwickelt werden. Es sollte zukünftig versucht werden, möglichst viel in die Produktion rückzuführen, da die Einsparungen dafür größer ausfallen. Die bisher aus produktionstechnischen Gründen angesetzten 5 % für den möglichen Anteil an alten Dämmstoffen in der Produktion sind sehr niedrig.

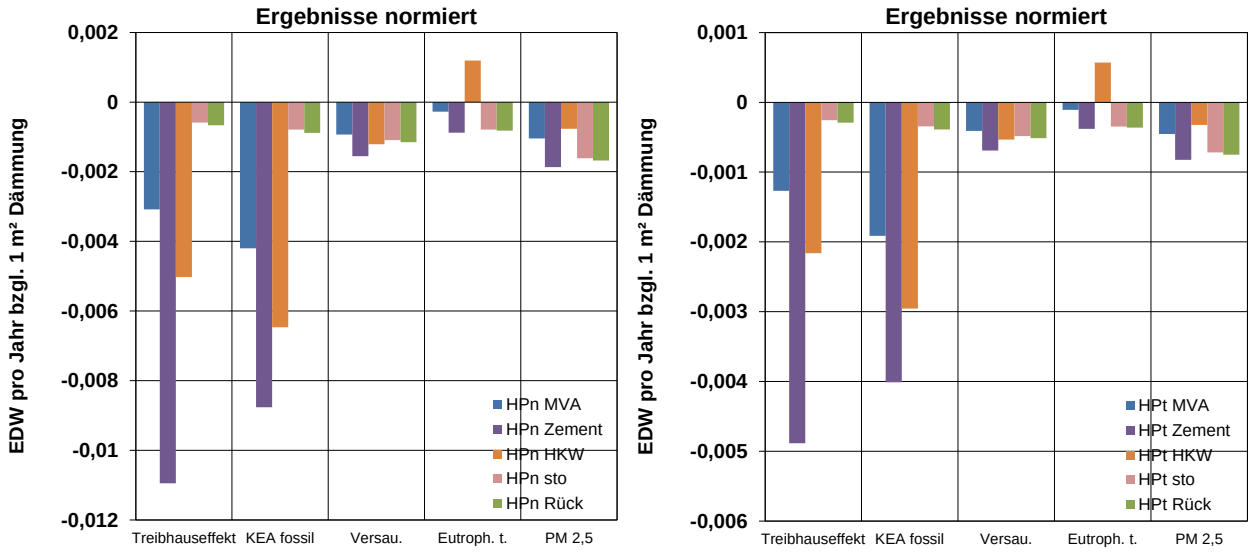


Abbildung 5-14: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der nass (links) bzw. trocken (rechts) produzierten Holzfaserdämmplatten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.7 Entsorgungsoptionen für Mineralfaserplatten (Steinwolle)

Tabelle 5-7: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Mineralfaserdämmplatte (Steinwolle) (St)

Option 1	Option 2	Option 3
Beseitigung über Deponie (St Deponie)	Stoffliche Verwertung im Zementwerk (St Zement)	Rückführung in die Produktion (zu 30%, Rest Opt. 2) (St Rück)

Bei den Mineralfaserplatten fällt zunächst auf, dass sowohl die Lasten als auch die möglichen Substitutionen gegenüber anderen Dämmstoffen auf einem niedrigen Niveau liegen (Abbildung 5-15). Dadurch werden hier auch die kleinen Beiträge von Abfallentsorgungsprozessen wie Sortierung der Abfallmassen vor dem Zementwerk im Sektor „Rückbau und Sortierung“ und der angesetzte Transport von der Baustelle zum Ort der Abfallbehandlung im Sektor „Transport Entsorgung und thermisch“ deutlich. Die geringen Lasten für die Beseitigung auf der Deponie resultieren vor allem aus dem Einbau der Massen in den Deponiekörper. Mit der Ablagerung auf Deponien können keine Nutzen und damit Substitutionserfolge erzielt werden, so dass eine Netto-Last verbleibt.

Im Zuge der stofflichen Verwertung im Zementwerk entstehen Emissionen durch die damit verbundene Verbrennung der Bindemittel, die sich im Sektor „Entsorgung und thermisch“ zeigen. Es wird angenommen, dass das Bindemittel aus fossilen Rohstoffen besteht, so dass hieraus auch im Treibhauseffekt ein entsprechender Beitrag resultiert. Auch bei der Rückführung in die Produktion werden die Bindemittel verbrannt, die zugehörigen Lasten sind im Sektor „Verwertung stofflich“ subsummiert. Die Beiträge zum Versauerungs-, Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial (Feinstaub) fallen demgegenüber etwas geringer aus, weil für die Dämmstoffproduktion eine bessere Abgasreinigung als in einem Zementwerk üblich, angesetzt ist. Da nur 30 % des Dämmstoffes in die Dämmstoffproduktion rückgeführt werden können, wird der Rest über die stoffliche Verwertung ins Zementwerk abgebildet, so dass die Ergebnisse für die Verwertungsoption Rückführung ein Stück weit denen der Verwertung über ein Zementwerk ähneln.

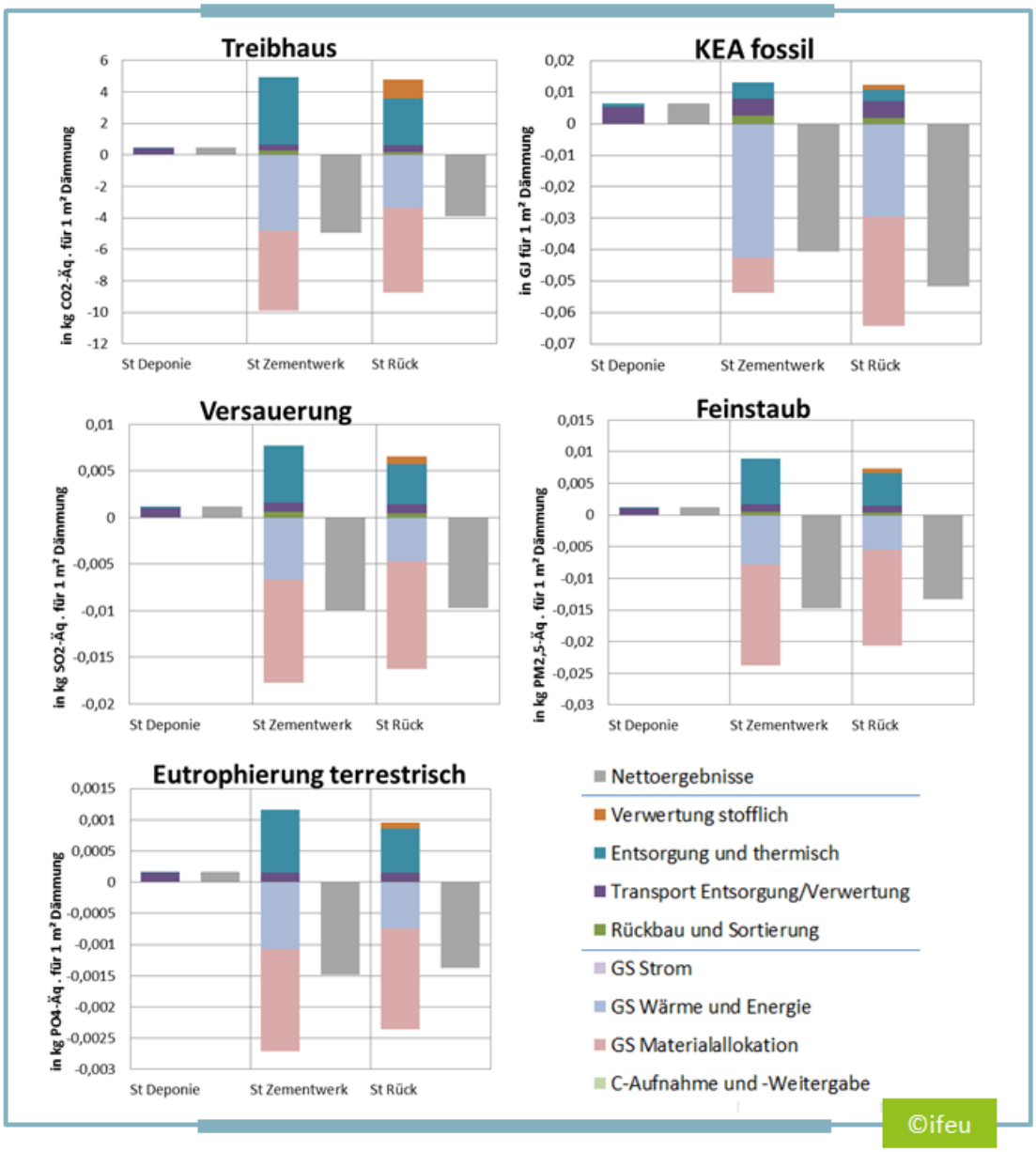


Abbildung 5-15: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Mineralfaserplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Durch die stoffliche Verwertung im Zementwerk können dort Rohstoffe eingespart werden, weil sonst das in den Dämmstoffen enthaltene CaO, Al_2O_3, SiO_2 und Fe_2O_3 in Form von Kalkstein, Ton, Quarzsand und Eisenerz zugeführt werden müsste. Zusätzlich wird angenommen, dass sich durch die Einsparung von Rohstoffen auch die Emissionen mindern lassen, die sich aus deren Inhaltsstoffe (bspw. Schwefel) ergeben. Dies führt zum ausgewiesenen Beitrag im Sektor „GS Materialallokation". Für die über das Bindemittel erzeugte Wärme wird die Einsparung der Verbrennung einer entsprechenden Menge Steinkohle im Sektor „GS Wärme und Energie" angerechnet.

Für die Rückführung in die Produktion werden ebenso die dort eingesparten Rohstoffe mit ihren Bereitstellungslasten im Sektor „GS Materialallokation" ausgewiesen. Hinzu kommt noch die Einsparung von Prozesswärme. Das Aufschmelzen des alten Dämmstoffes benötigt weniger Schmelzenergie als das der primären Rohstoffe. Andererseits liefert das im Altmaterial enthaltene Bindemittel bei der Verbrennung zusätzlich Wärme. Die dadurch eingesparten Lasten eines Erdgaskessels werden ebenso im Sektor „GS Materialallokation" mit dargestellt.

In Summe fällt die Einsparung durch die Rückführung in die Produktion etwas geringer aus als diejenige durch die Verwertung im Zementwerk (Abbildung 5-16). Dies liegt zum einen daran, dass für die über das Bindemittel erzeugte Wärme im Zementwerk eine Einsparung von Steinkohleverbrennung angesetzt wird. Zum anderen wird im Zementwerk im Sektor „GS Materialallokation" für den CaO-Anteil die Einsparung von Kalkstein angerechnet, wodurch Kohlendioxidemissionen aus der Umwandlung von Kalkstein zu CaO eingespart werden. Für die Rückführung in die Produktion wird hingegen davon ausgegangen, dass durch die alte Dämmstoffmasse kein Zement, sondern nur die anderen mineralischen Rohstoffe in ihrem Verhältnis zueinander eingespart werden können. Bei der Rückführung in die Produktion wird weiterhin im Gegensatz zum Zementwerk von keiner Verminderung der Prozessemissionen durch die eingesparten Rohstoffe ausgegangen. Die Einsparungen über die stoffliche Verwertung im Zementwerk werden daher ggf. überschätzt oder diejenigen über die Rückführung in die Produktion unterschätzt. Da diese aber absolut nicht hoch ausfallen, ist der diesbezügliche Fehler nicht groß.

Die Verwertung im Zementwerk und die Rückführung in die Produktion sollten weiter entwickelt werden, so dass eine Deponierung vermieden werden kann.

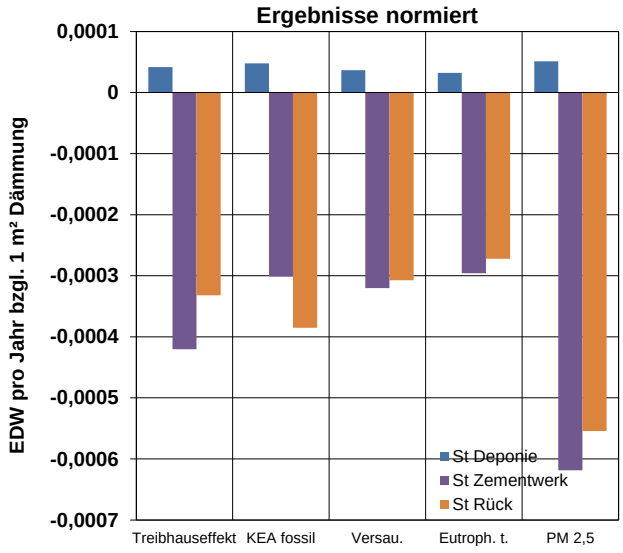


Abbildung 5-16: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Mineralfaserplatten (Steinwolle); Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.8 Entsorgungsoptionen für die Glaswolle

Tabelle 5-8: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen des Glaswolledämmstoffes (Gw)

Option 1	Option 2	Option 3
Beseitigung auf Deponie (Gw Deponie)	Stoffliche Verwertung im Zementwerk (Gw Zement)	Rückführung in die Produktion (zu 4%, Rest Opt. 2) (Gw Rück)

Bei Glaswolle liegen Lasten und Nutzen auf einem noch niedrigeren Niveau als bei Mineralfaserplatten (Steinwolle), so dass die Lasten für Sortierung vor der stofflichen Verwertung in Zementwerken (Sektor „Rückbau und Sortierung“) und der Transport (Sektor „Transport Entsorgung/Verwertung“) noch deutlicher hervortreten. Bei der Deponierung beinhaltet der Sektor „Entsorgung und thermisch“ auch die Lasten für die Komprimierung vor der Ablagerung (Einsatz von Diesel). In der Glaswolle ist anteilig weniger Bindemittel als in der Steinwolle enthalten, so dass durch die Verbrennung im Zuge der stofflichen Verwertung in Zementwerken bzw. der Rückführung in die Produktion geringere Beiträge als bei der Steinwolle im Sektor „Entsorgung und thermisch“ bzw. „Verwertung stofflich“ resultieren und im Gegenzug auch geringere Beiträge auf Nutzenseite.

Durch die stoffliche Verwertung im Zementwerk wird neben etwas Ton v.a. Quarzsand eingespart, was, wie hier angenommen, auch die Emissionen mindern lässt, die ansonsten aus den Inhaltsstoffen dieser Rohstoffe resultierend im Zementwerk freigesetzt würden (Sektor „GS Materialallokation“). Diese eingesparten Emissionen sind hier im Unterschied zur Mineralfaserplatte aber weniger bedeutend, weil über den SiO_2-Anteil hauptsächlich Quarzsand eingespart wird, aus dessen Inhaltsstoffen sich nur geringe Prozessemissionen ergeben. Die durch die Bindemittelverbrennung eingesparte Steinkohleverbrennung ist im Sektor „GS Wärme und Energie“ ausgewiesen.

Durch die Rückführung in die Produktion werden wiederum nur die Rohstoffe mit den im Sektor „GS Materialallokation“ ausgewiesenen Lasten und keine Prozessemissionen eingespart. Es wird in der Abfallökobilanz davon ausgegangen, dass auch durch die Rückführung des Altglasanteils Rohstoffe für die Primärglasproduktion eingespart werden können, weil dadurch im Gesamtsystem mehr Altglas zur Verfügung steht, das in einem anderen Produkt diese Rohstoffe substituieren kann. Hinzu kommt im gleichen Sektor wieder die Einsparung von Prozesswärme einerseits durch die Wärme aus der Bindemittelverbrennung und andererseits aus der Rückführung selbst. Das Aufschmelzen des alten Dämmstoffes benötigt weniger Energie als dasjenige der primären Rohstoffe. Dieses Potenzial zur Energieeinsparung wird aber durch den Einsatz von kleineren, weniger energieeffizienten Schmelzwannen geschmälert.

Im Gegensatz zur Mineralfaserplatte schneidet die Rückführung in die Produktion hier besser ab als die stoffliche Verwertung im Zementwerk. Möglicherweise werden die Substitutionserfolge durch die Rückführung in die Produktion wie auch bei der Mineralfaserplatte eher noch unterschätzt, weil von keiner Verminderung der Prozessemissionen durch die Einsparung der Rohstoffe ausgegangen wird. Da nur von einer 4 %-igen Rückführung der Dämmstoffe in die Produktion ausgegangen wird und der Rest stofflich im Zementwerk verwertet wird, ähneln die Ergebnisse für die Rückführung stark denen des Zementwerks.

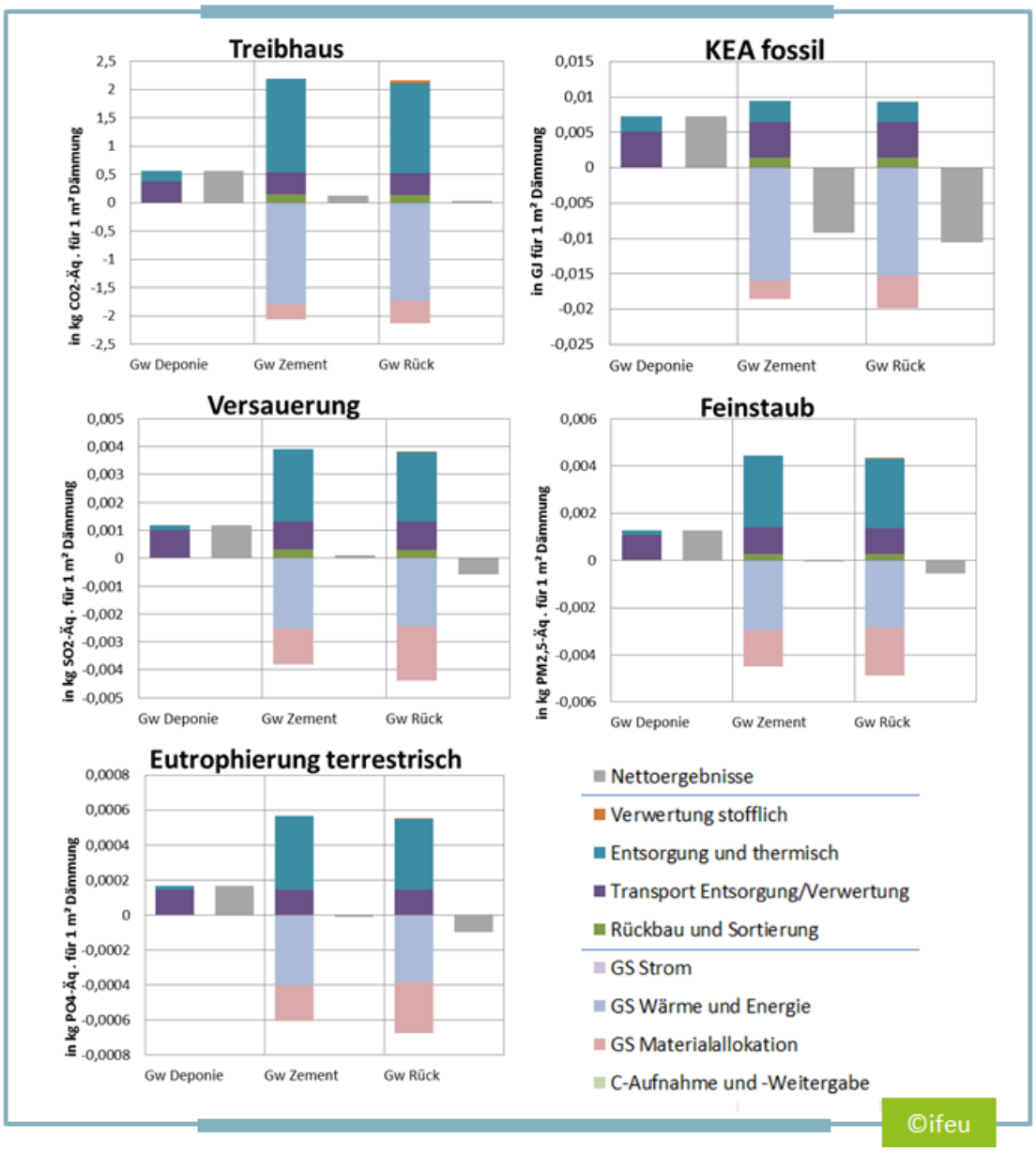


Abbildung 5-17: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Glaswolledämmstoffe; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Wie aus den Ergebnissen deutlich wird, hat die Rückführung in die Produktion ökologische Vorteile (Abbildung 5-18). Dieser Verwertungsweg sollte daher zukünftig deutlich ausgebaut werden.

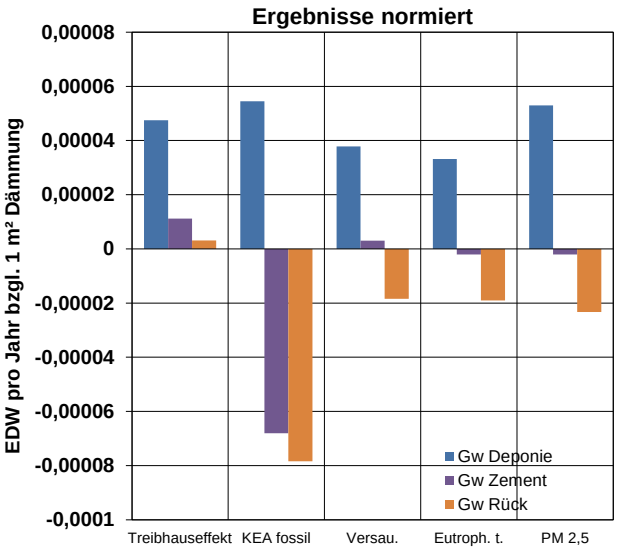


Abbildung 5-18: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Glaswolle; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.9 Entsorgungsoptionen für die Schaumglasplatte

Tabelle 5-9: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Schaumglasdämmplatte (Sc)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5
Verwertung als Teil des Bauschutts (Sc Bau)	Als Schallschutzmaterial (Sc Schall)	Als Schaumglasschotter (Sc Schotter)	Als Leichtzuschlag (Sc Leicht)	Rückführung in die Produktion (zu 40%, Rest Opt.4) (Sc Rück)

Durch die stoffliche Verwertung von Schaumglasplatten können Substitutionserfolge durch eingesparte Primärrohstoffe erzielt werden, die im Sektor „GS Materialallokation“ ausgewiesen sind und den dafür nötigen Aufwand für eine Zerkleinerung deutlich übertreffen (Abbildung 5-19). Die Verwertung im Baubereich als Material für den Straßen- und Wegebau führt nur zu kleinen Einsparungen, weil die Lasten für die Bereitstellung des dadurch eingesparten Splitts, die hier über gebrochenen Kalkstein approximiert werden, nur relativ gering sind. Durch die stoffliche Verwertung als Leichtzuschlag können die sonst für diesen Zweck eingesetzten Bimse und Blähtone mit ihren Produktionslasten eingespart werden, wodurch eine deutlich sichtbare Einsparung erreicht wird, die aber hinter denen der weiteren Entsorgungswege zurückbleibt. Die Produktion von Blähton ist aufwändiger als die für Bims; hier ist eine Einsparung von jeweils 50 % Blähton- und 50 % Bimsmasse durch die Schallschutzdämmplattenmasse angesetzt.

Die stoffliche Verwertung zu Schallschutzmaterial und die Rückführung in die Produktion ermöglichen die Einsparung von primären Rohstoffen zur Glasherstellung. Zusätzlich wird dadurch Schmelzenergie eingespart, weil die Einschmelzung des Altglases aus dem Dämmstoff weniger Energie benötigt als diejenige der primären Rohstoffe. Die eingesparten Lasten dieser Schmelzenergie werden über die entsprechende Wärme aus einem Erdgaskessel beziffert und zusammen mit den eingesparten Lasten für die Bereitstellung der primären Rohstoffe im Sektor „GS Materialalloaktion“ dargestellt. Zwar wird sowohl durch die Verwertung zu Schallschutzmaterial als auch die Rückführung in die Produktion in der Praxis jeweils nur anderes Altglas eingespart und auch der Dämmstoff selbst besteht nur zu einem Teil aus Primärglas. Dieses zusätzlich verfügbare Altglas kann dann aber

wiederum in einem anderen Produkt die Produktion von Primärglas einsparen, so dass in der Abfallökobilanz schlussendlich die Rohstoffe und die zusätzliche Energie für die Produktion von Primärglas gegengerechnet werden. Da nur eine Rückführung von 40 % der Dämmstoffe in die Produktion möglich ist, werden die verbleibenden 60 % über die Verwertung zu Schaumglasschotter abgebildet, so dass die Ergebnisse für das Szenario Rückführung in die Produktion ungefähr zwischen denen der Verwertung zu Schallschutz und Schaumglasschotter (s. unten) liegen.

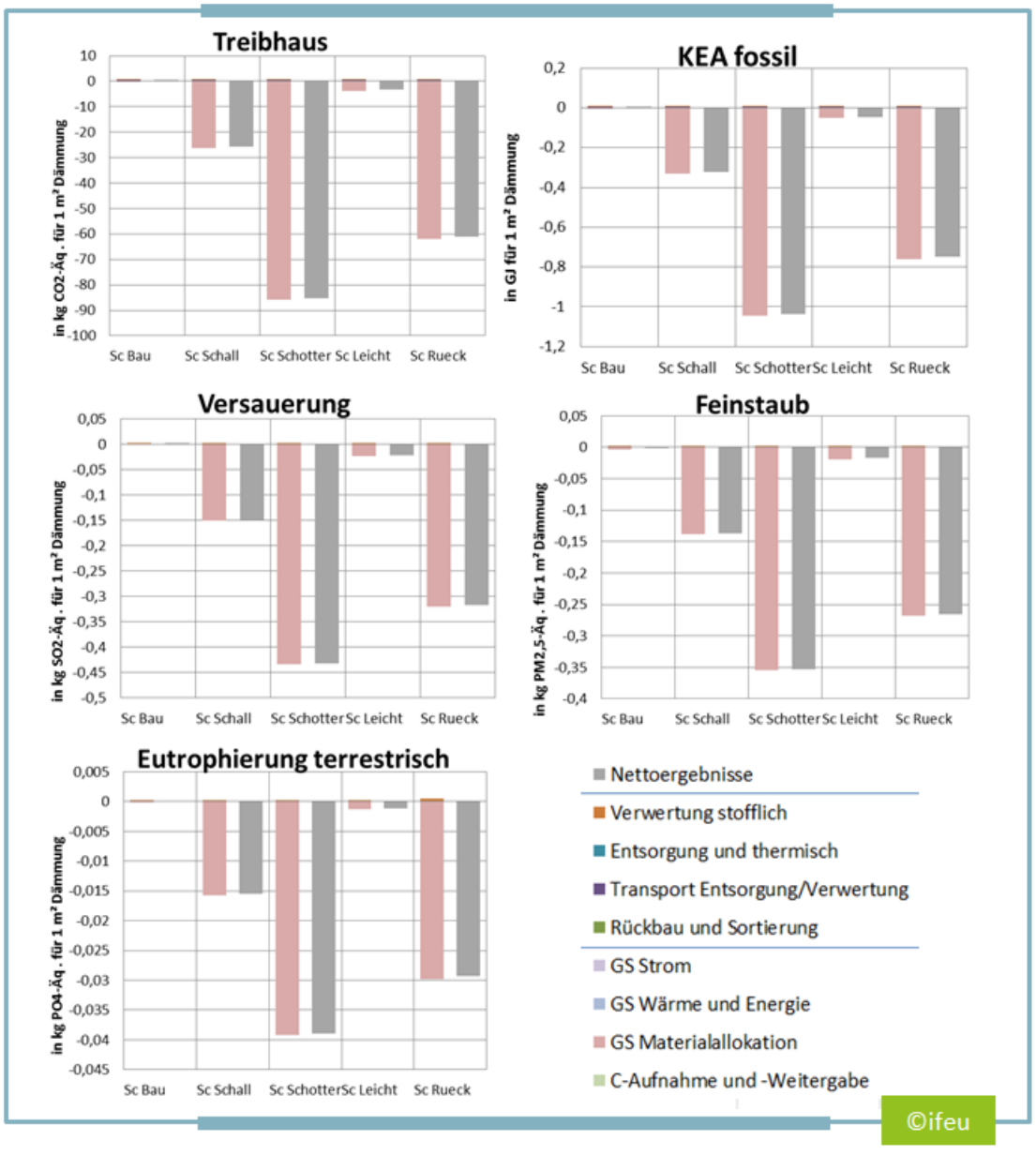


Abbildung 5-19: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Schaumglasplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Die größten Einsparungen sind über die Verwertung zu Schaumglasschotter zu erzielen, weil der Schaumglasschotter sonst in einem der Dämmplattenproduktion ähnlichen Prozess hergestellt werden müsste. Neben den Rohstoffen und der zusätzlichen Schmelzenergie für die Produktion von Primärglas und den Prozessemissionen wird dadurch ein Großteil der weiteren Lasten der Schaumglasplattenproduktion aus dem Energieeinsatz eingespart, angesetzt sind 80 %. Da diese Lasten recht groß sind, ist die dadurch erzielbare Einsparung mehr als doppelt so groß wie die über die Verwertung zu Schallschutzmaterial oder die Rückführung in die Produktion.

Das zeigt sich auch in Abbildung 5-20.

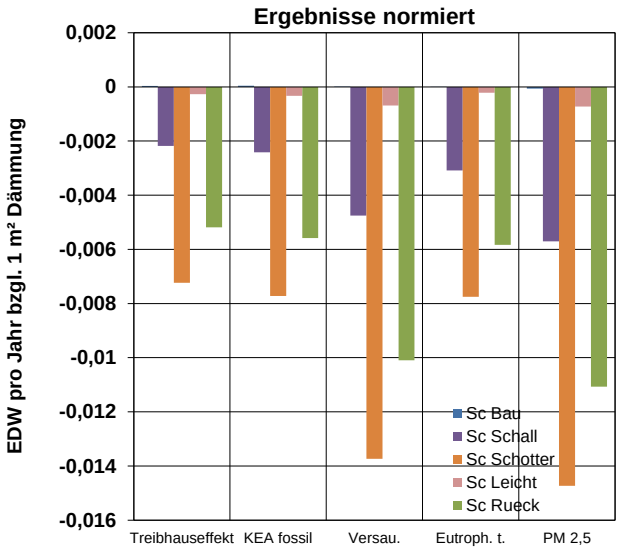


Abbildung 5-20: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Schaumglasplatten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.10 Entsorgungsoptionen für die Mineralschaumplatte

Tabelle 5-10: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der Mineralschaumdämmplatte (Mi)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Beseitigung über Deponie (Mi Deponie)	In Porenbetonprodukten (Mi sto min)	Als Leichtzuschlag (Mi sto Leicht)	Rückführung in die Produktion (zu 20%, Rest Opt. 2) (Mi Rück)

Mit der Deponierung ist eine relativ geringe Netto-Last verbunden. Wenn die Mineralschaumplatten in die Produktion zurückgeführt werden, kann dadurch nur gemahlener Kalkstein mit relativ geringen Produktionslasten eingespart werden, die sich im Sektor „GS Materialallokation“ zeigen. Da nur 20 % der Dämmstoffe auf diese Weise rückgeführt werden können, wird der Rest in diesem Szenario über die stoffliche Verwertung in der Porenbetonproduktion abgebildet. Durch diesen Verwertungsweg werden nicht nur die im Porenbeton benötigten und im Dämmstoff enthaltenen Rohstoffe (Zement nur teilweise) eingespart, sondern ebenso die Energie für das Vorschäumen, die bei Einsatz des alten Mineralschaums entfallen kann. Es wird angenommen, dass die dadurch eingesparte Menge an Strom, Wärme und Diesel 25 % des jeweiligen Gesamtverbrauchs für die Mineralschaumplattenproduktion beträgt und zusätzlich 25 % des Zements eingespart wird, so dass die im Sektor „GS Materialallokation“ ausgewiesenen Einsparungen entsprechend groß ausfallen. Dadurch steigen auch die Einsparungen für das Szenario Rückführung in die Produktion. Die stoffliche Verwertung der Dämmmasse als Leichtzuschlag, bei der wie bei Schaumglasplatten eine Substitution von 50 % Blähton- und 50 % Bimsmasse angesetzt ist, liefert demgegenüber zwar geringere Einsparungen, diese sind aber immer noch größer als die Einsparungen für Kalkstein im Zuge der Rückführung in die Produktion.

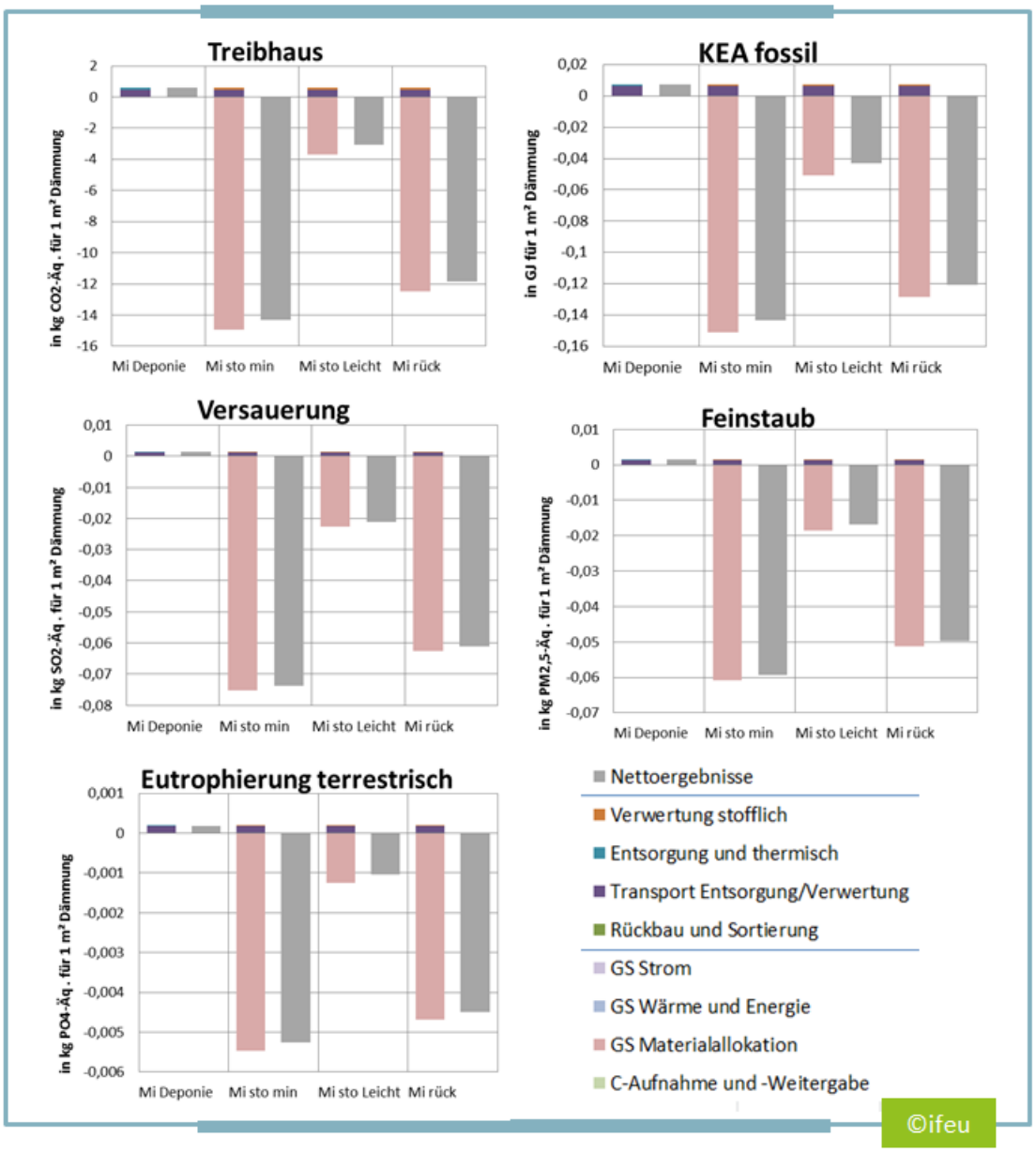


Abbildung 5-21: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der Mineralschaumplatten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Die stoffliche Verwertung in der Porenbetonproduktion und die Verwertung als Leichtzuschlag bspw. im Leichtdämmputz sollten weiterentwickelt werden. Auch die Rückführung in die Produktion ist gegenüber der Ablagerung auf der Deponie deutlich vorteilhafter (Abbildung 5-22).

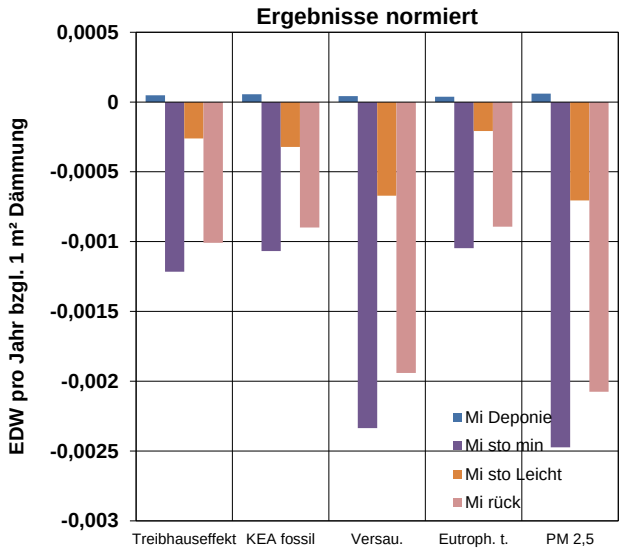


Abbildung 5-22: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der Schaumglasplatten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.11 Entsorgungsoptionen für EPS-Platten

Tabelle 5-11: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der EPS-Dämmplatte (EPS)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5	Option 6
Beseitigung in MVA (EPS MVA)	Energetisch im Zementwerk (EPS Zement)	Rohstofflich über CreaSolv® (EPS Creasolv)	Als EPS Kügelchen (EPS Sekundär)	Über Regranulierung (EPS Regran)	Rückführung in die Produktion (zu 30%, Rest Opt. 4) (EPS Rück)

Bei der Entsorgung der EPS-Platten in einer MVA oder im Zementwerk entstehen Emissionen, die im Treibhauseffekt relativ groß sind, weil der darin enthaltene fossile Kohlenstoff aus dem Ausgangsmaterial Erdöl dabei als fossiles Kohlendioxid emittiert wird (Sektor „Entsorgung und thermisch“ in Abbildung 5-23). Da die EPS-Platten einen hohen Heizwert haben, wird dabei relativ viel Energie gewonnen. Die darüber erzielte Einsparung reicht aber im Treibhauseffekt nicht aus, um die Lasten auszugleichen (Sektor „GS Strom“ und „GS Wärme und Energie“), so dass eine Netto-Last verbleibt. In den anderen Umweltwirkungskategorien werden hingegen auch mit der MVA Netto-Entlastungen erreicht. Beim Zementwerk gelingt dies aufgrund der angesetzten Einsparung von Steinkohlefeuerung durch die über die energetische Verwertung des Dämmstoffes gewonnene Wärme auch im Treibhauseffekt. In den anderen Indikatoren sind mit dem Zementwerk die Lasten aufgrund der schlechteren Abgasreinigung im Vergleich zur MVA höher. Dies wird aber durch die höhere Einsparung etwas mehr als kompensiert.

Über die stoffliche Verwertung werden Einsparungen erzielt, die im Treibhauseffekt und terrestrischen Eutrophierungspotenzial etwas unter, in den anderen Umweltwirkungskategorien über den mit dem Zementwerk bei substituierter Steinkohleverfeuerung erreichten Werten liegen (Sektor „GS Materialallokation“). Gleichzeitig sind aber die mit der stofflichen Verwertung verbundenen Lasten (Sektor „Verwertung stofflich“) mit Ausnahme des kumulierten fossilen Energieaufwandes deutlich geringer, so dass die stofflichen Verwertungswege in Summe besser abschneiden als die energetischen. Lasten in der stofflichen Verwertung sind beim CreaSolv®-Verfahren und der Regranulierung zu erkennen, wohingegen die Lasten für die Zerkleinerung der EPS-

Dämmplatte für die Nutzung als Sekundärrohstoff oder Rückführung in die Produktion sehr gering sind. Bei CreaSolv® und Regranulierung wird hier der hohe Strombedarf sichtbar.

Mit CreaSolv® wird der Rohstoff Polystyrol aus dem EPS chemisch extrahiert, welcher dann für andere Produkte zur Verfügung steht und dort eingespart werden kann. Über die Regranulierung wird PS-Rezyklat mechanisch durch Zerkleinerung und Aufschmelzen hergestellt, welches dann ebenso für die Produktion anderer Produkte eingesetzt werden kann. Da die Lasten für die PS-Produktion einen großen Anteil an den gesamten Produktionslasten der EPS-Dämmplatte ausmachen, fallen die dafür ausgewiesenen Substitutionserfolge in allen Indikatoren hoch aus. Im fossilen kumulierten Energieaufwand wird nicht nur die in den zur Energiegewinnung verfeuerten Energierohstoffen, sondern auch die in den verwendeten Materialien enthaltene Energie (Feedstock) entsprechend ihrem Heizwert subsummiert, so dass das eingesparte PS einen entsprechenden Beitrag liefert.

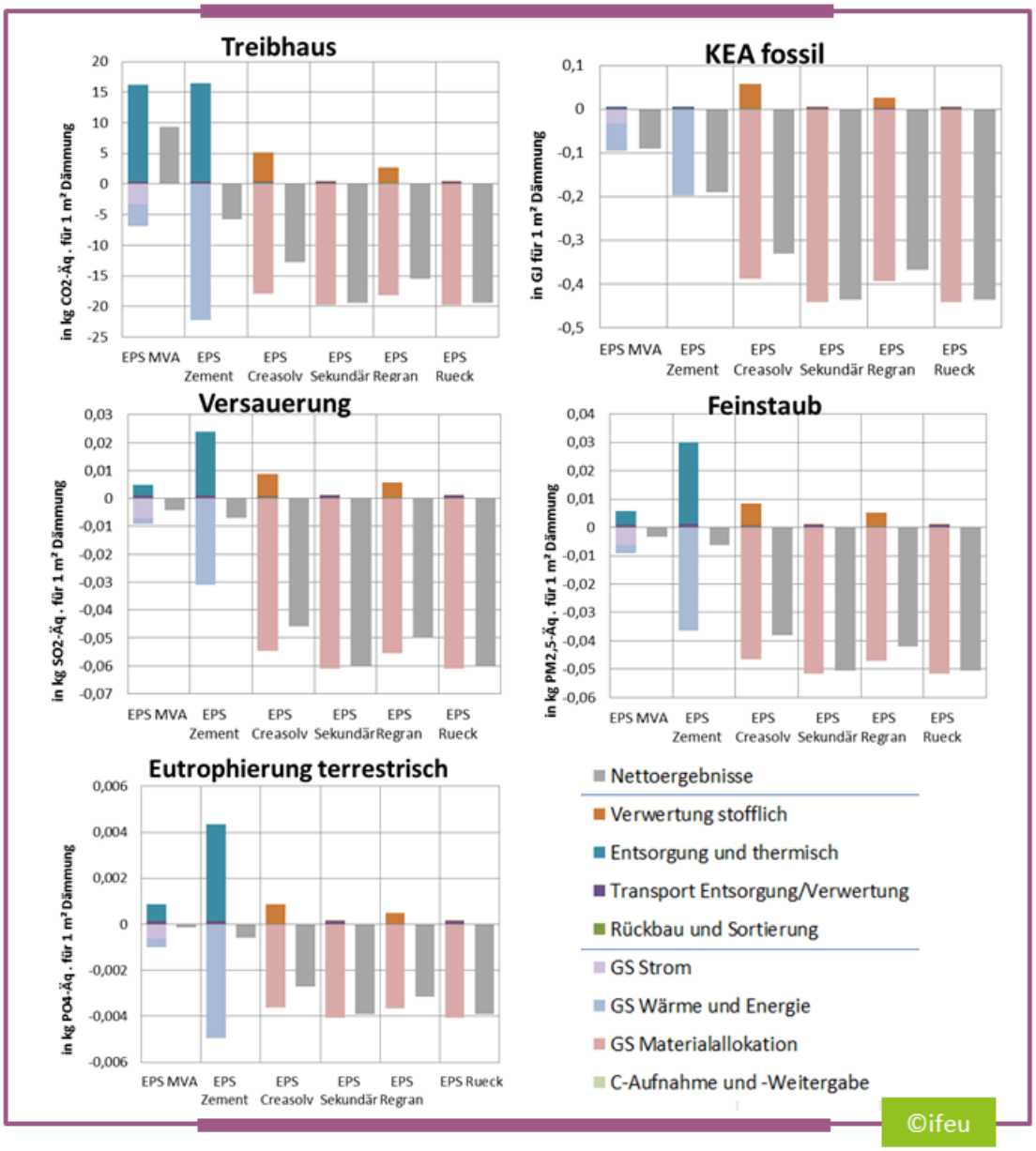


Abbildung 5-23: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der EPS-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Mit der stofflichen Verwertung als Sekundärrohstoff bspw. in Wärmedämmputzen und durch die Rückführung in die Produktion werden dort EPS-Kügelchen eingespart und damit neben dem PS auch die Energie zum Vorschäumen. Für diese wird jeweils 35 % des Wärme- und Strombedarfs der gesamten EPS-Plattenproduktion veranschlagt, so dass die Einsparungen noch etwas größer ausfallen als bei CreaSolv® und Regranulierung. Auch hier kann nur ein Teil der Dämmstoffe in die Produktion rückgeführt werden, angesetzt sind 30 %. Der Rest wird aber durch die stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff abgebildet, die aus Umweltsicht nahezu gleichrangig ist.

Die stoffliche Verwertung besitzt deutliche Vorteile gegenüber einer thermischen Behandlung (Abbildung 5-24). Es sollte zukünftig versucht werden, sowohl möglichst viel in die Produktion zurückzuführen als auch als Sekundärrohstoff zu nutzen und damit die Produktion von EPS-Kügelchen einzusparen sowie den Rest möglichst vollständig über Regranulierung zu nutzen. Auch die rohstoffliche Verwertung über das CreaSolv®-Verfahren schneidet günstig ab.

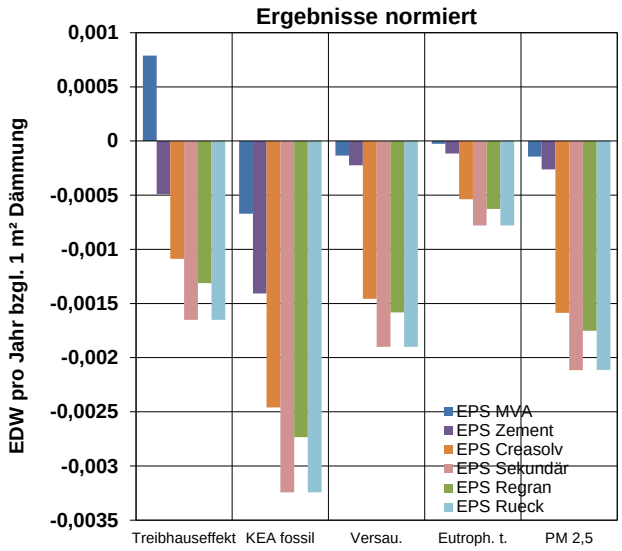


Abbildung 5-24: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der EPS-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.12 Entsorgungsoption für XPS-Platten

Tabelle 5-12: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der XPS-Dämmplatte (XPS)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Beseitigung in MVA (XPS MVA)	Energetisch im Zementwerk (XPS Zement)	Rohstofflich über CreaSolv® (XPS Creasolv)	Über Regranulierung (XPS Regran)

Die Ergebnisse für die XPS-Platten entsprechen größtenteils denen der EPS-Platten (Abbildung 5-25). Die absoluten Werte sind entsprechend der größeren Masse, die zur Erreichung derselben Dämmeigenschaften benötigt werden, höher. Die energetische Entsorgung ist im Treibhauseffekt aufgrund der Verbrennung eines fossilen Rohstoffs mit relativ hohen Lasten verbunden, die im Treibhauseffekt nicht über den Nutzen durch die dabei produzierte Energie in Form von Strom und Wärme ausgeglichen werden kann; der energetische Wirkungsgrad

ist relativ gering. Der Nutzen wird über die Einsparung der Lasten für aktuellen deutschen Netzstrommix bzw. Wärme aus Gasheizungen beziffert. Durch die angerechnete Einsparung von Steinkohlefeuerung im Zementwerk ist der dort erzielte Nutzen auch im Treibhauseffekt größer als die Lasten.

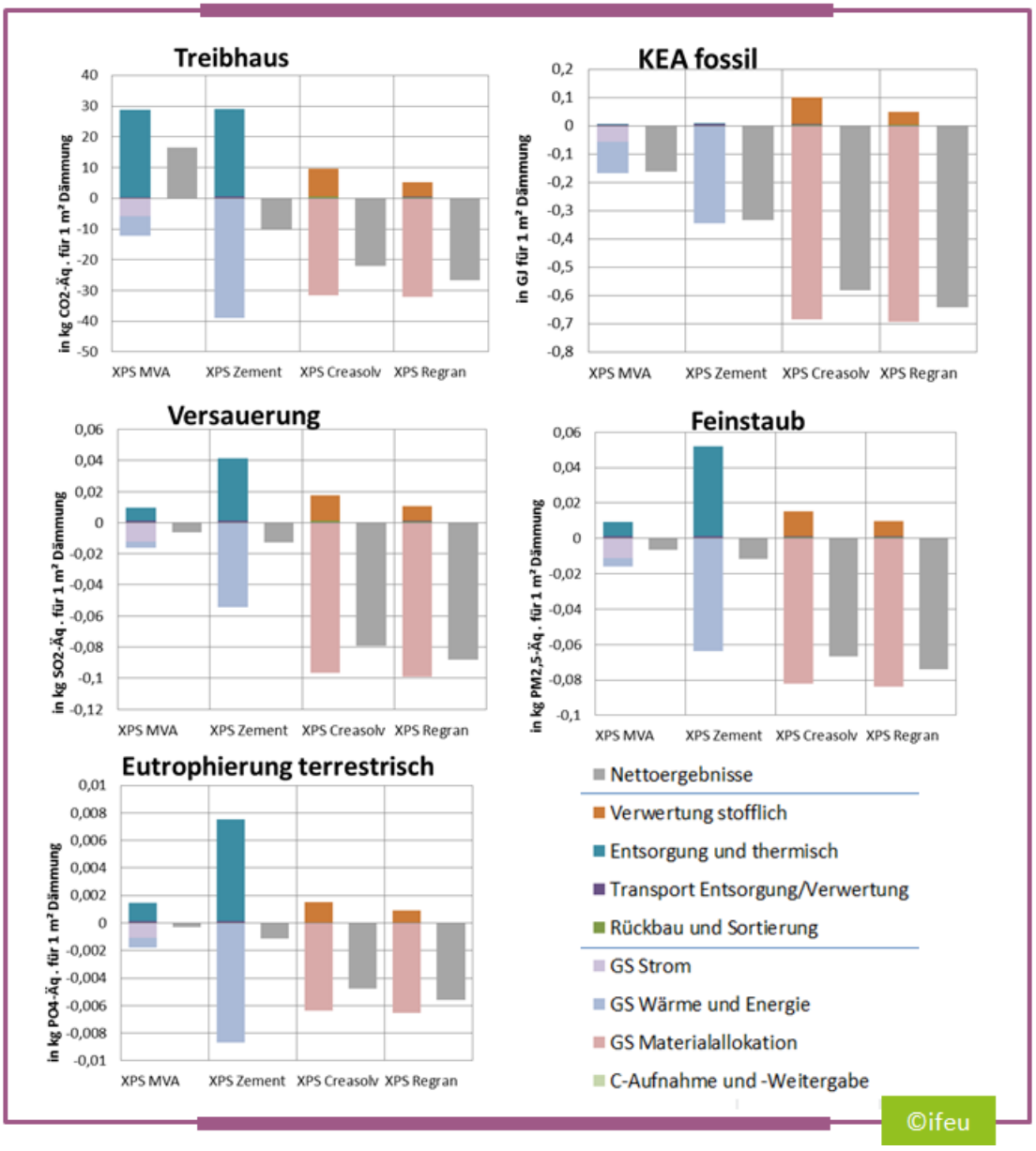


Abbildung 5-25: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der XPS-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Nicht möglich ist hier die stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff und die Rückführung in die Produktion, weil XPS eine homogene Masse bildet, die nach Zerkleinerung wieder neu aufgeschäumt werden muss. Auch hier zeigt sich entsprechend, dass die stoffliche Verwertung über Regranulierung oder CreaSolv® deutlich besser abschneidet als die thermische Behandlung. Die dadurch eingesparten Lasten für die Bereitstellung von PS (Sektor „GS Materialallokation“) machen einen Großteil der XPS-Dämmplattenproduktion aus und fallen entsprechend groß aus. Gleichzeitig sind die Lasten, die den Strombedarf für das CreaSolv®-Verfahren bzw. die Regranulierung abbilden (Sektor „Verwertung stofflich“), nicht so groß wie die Lasten durch die Emissionen,

welche durch die energetische Verwertung im Zementwerk entstehen und aufgrund schlechterer Abgasreinigung größer ausfallen als die der MVA.

Die stoffliche Verwertung besitzt deutliche Vorteile gegenüber einer thermischen Behandlung (Abbildung 5-26). Es sollte zukünftig versucht werden, über Regranulierung wieder PS bereitzustellen. Auch die rohstoffliche Verwertung über das CreaSolv®-Verfahren schneidet günstig ab.

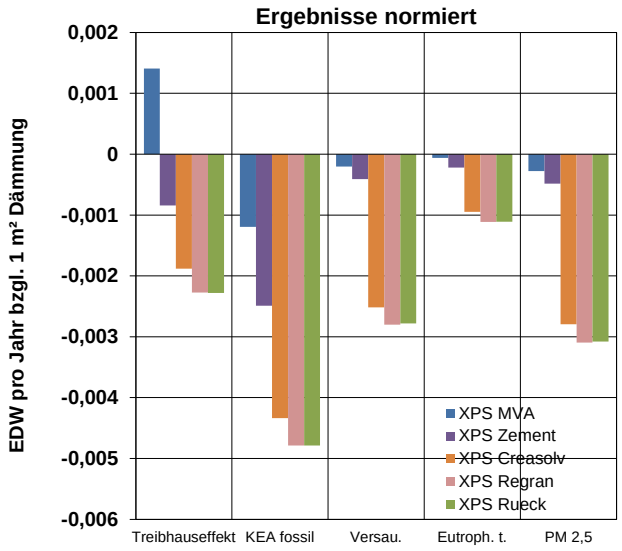


Abbildung 5-26: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der XPS-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.13 Entsorgungsoptionen für PU-Platten

Tabelle 5-13: Überblick über die untersuchten Entsorgungsoptionen der PU-Dämmplatte (PU)

Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Beseitigung in MVA (PU MVA)	Energetisch im Zementwerk (PU Zement)	Rohstofflich über Glykolyse (PU Glyko)	Als Klebepressplatte (PU Sekundär)

Auch bei den PU-Platten führt die thermische Behandlung analog zu EPS- und XPS-Platten zu Lasten und Einsparungen durch die gewonnene Energie. Die Einsparungen durch die stoffliche Verwertung fallen aber in allen hier dargestellten Indikatoren größer aus. Im Treibhauseffekt ist auch hier die Beseitigung in der MVA aufgrund der Verbrennung eines fossilen Rohstoffes mit Netto-Lasten verbunden (Sektor „Entsorgung und thermisch“). Die produzierte Energie in Form von Strom und Wärme, für die ein Nutzen für dadurch eingesparten aktuellen Netzstrommix und Wärme aus Gasheizung angerechnet wird, reicht nicht aus, um die fossilen Kohlendioxidemissionen auszugleichen. Der Nutzen im Zementwerk durch die Einsparung von Kohlefeuerung fällt größer aus und kann auch die aufgrund der schlechteren Abgasreinigung höheren Lasten im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungspotenzial und PM 2,5-Potenzial etwas mehr als ausgleichen.

Mit der Glykolyse sind in allen Kategorien deutliche Lasten im Sektor „Verwertung stofflich“ verbunden. Diese werden hauptsächlich durch die Produktion des Diethylenglkyols, das den Dämmstoffen dabei massegleich

zugesetzt wird, verursacht, wohingegen der Bereitstellung von Energie für die Glykolyse nur eine kleine Bedeutung zukommt. Das zugesetzte Diethylenglykol geht aber nahezu massegleich in das durch die Glykolyse gewonnene RC-Polyol, welches primäres Polyol in der PU-Produktion einsparen kann, ein und erhöht die damit verbundenen Einsparungen („GS Materialallokation“) entsprechend. Da die Lasten des für das Diethlyenglykol herangezogenen Datensatzes etwas geringer ausfallen als diejenigen des eingesparten Polyols, verbleibt dadurch eine kleine Nettoeinsparung. Damit sind Unsicherheiten verbunden. Eventuell sind die durch die Glykolyse erzielbaren Netto-Einsparungen etwas überschätzt.

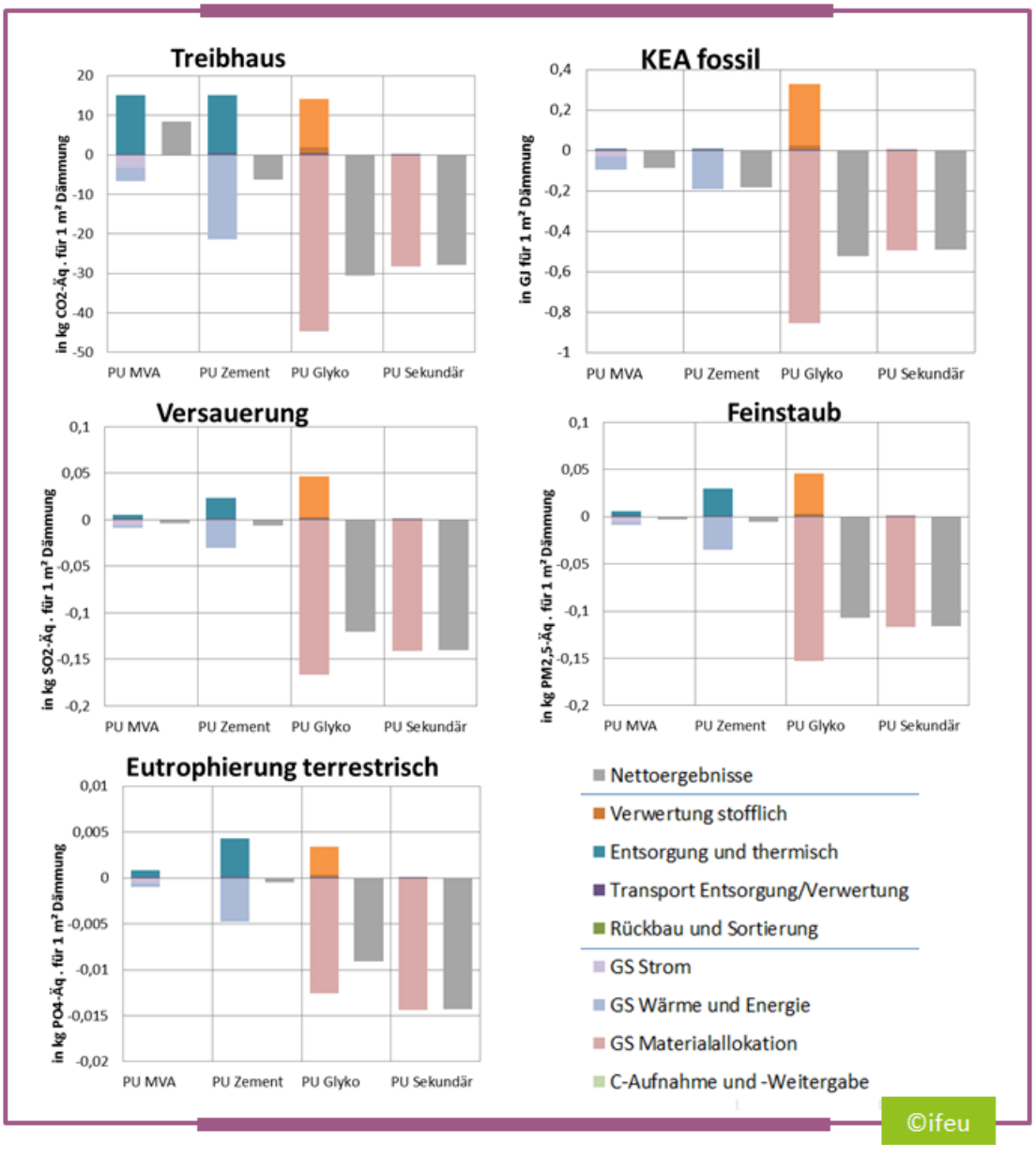


Abbildung 5-27: Ergebnisse der Abfallökobilanz für die verschiedenen Entsorgungswege der PU-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach, leicht

Wenn die PU-Dämmplatten stofflich zu Klebepressplatten verwertet werden, sind damit keine aus der Aufbereitung resultierenden Lasten verbunden. Mit dieser Verwertung ist ein hohes Einsparpotenzial verbunden; angesetzt sind hier 80 % der Lasten der PU-Dämmplattenproduktion (siehe „GS Materialallokation“) ohne Prozessstrom. Durch diese stoffliche Nutzung wird rechnerisch die Produktion entsprechender Pressplatten aus Primärmaterial eingespart, wobei in der Praxis die Klebepressplatten niemals aus primärem Material hergestellt

würden. Das Produkt existiert nur zur Verwertung der alten PU-Dämmplattenreste. Die Pressplatten werden zu einem bestimmten Zweck im Baubereich eingesetzt, welcher Baustoff und welches Material aber dadurch tatsächlich eingespart werden kann, ist unklar. Der hier gewählte Ansatz überschätzt daher möglicherweise das Einsparpotenzial.

Die große Bedeutung der rohstofflichen und stofflichen Verwertung zeigt sich auch in Abbildung 5-28.

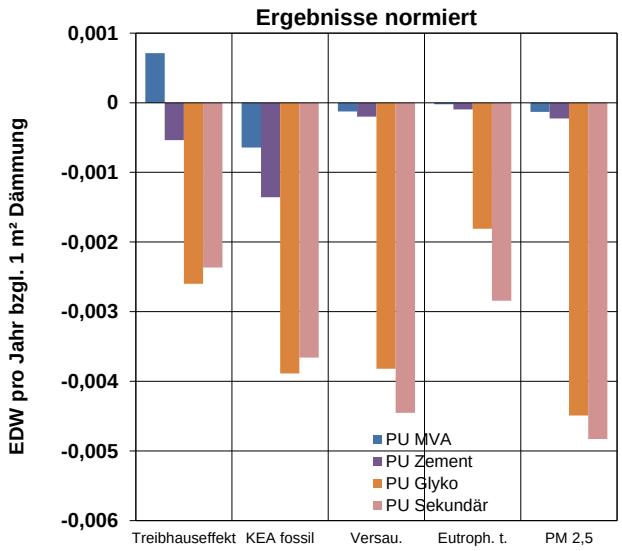


Abbildung 5-28: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Ergebnisse für die Abfallökobilanz der PU-Platten; Referenz: Dämmung Flachdach leicht

5.14 Beste Entsorgungswege nach der Abfallökobilanz

Folgende Entsorgungswege weisen für die einzelnen Dämmstoffalternativen das jeweils beste Lasten- zu Nutzenverhältnis auf:

- Zellulose: energetische Verwertung im Zementwerk (Z Zement)
- Hanf: energetische Verwertung im Zementwerk (Ha Zement)
- Jute: stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (J sto)
- Holzfasereinblasdämmung: energetische Verwertung im Zementwerk (Hein Zement)
- Holzmatten: energetische Verwertung im Zementwerk (HM Zement) oder stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (HM sto)
- Holzfaserplatten nass produziert: energetische Verwertung im Zementwerk (HPn Zement)
- Holzfaserplatten trocken produziert: energetische Verwertung im Zementwerk (HPt Zement)
- Mineralfaserplatten (Steinwolle): stoffliche Verwertung im Zementwerk (St Zement)
- Glaswolle: Stoffliche Verwertung durch Rückführung eines kleinen Teils in die Produktion bzw. des Rests im Zementwerk (Gw Rück)
- Schaumglasplatten: stoffliche Verwertung als Schaumglasschotter (Sc Schotter)
- Mineralschaumplatten: stoffliche Verwertung als aufgeschäumter mineralischer Baustoff, bspw. in der Produktion von Porenbeton (Mi sto min)
- EPS: stoffliche Verwertung der EPS-Kügelchen als Sekundärrohstoff in Recycling-Platten oder Wärmedämmputzen (EPS sto)
- XPS: stoffliche Verwertung des PS als Sekundärrohstoff nach Regranulierung (XPS Regran)

- PU: rohstoffliche Verwertung durch Glykolyse (PU Glyko)

Bei vielen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist demnach die energetische Verwertung im Zementwerk im Treibhauseffekt die beste Option, solange dadurch die Verbrennung von Steinkohle eingespart werden kann. Wie in den vorangegangenen Kapiteln gesehen, schneidet die stoffliche Verwertung aber ebenfalls günstig ab und ist damit eindeutig die zukunftsweisende Option.

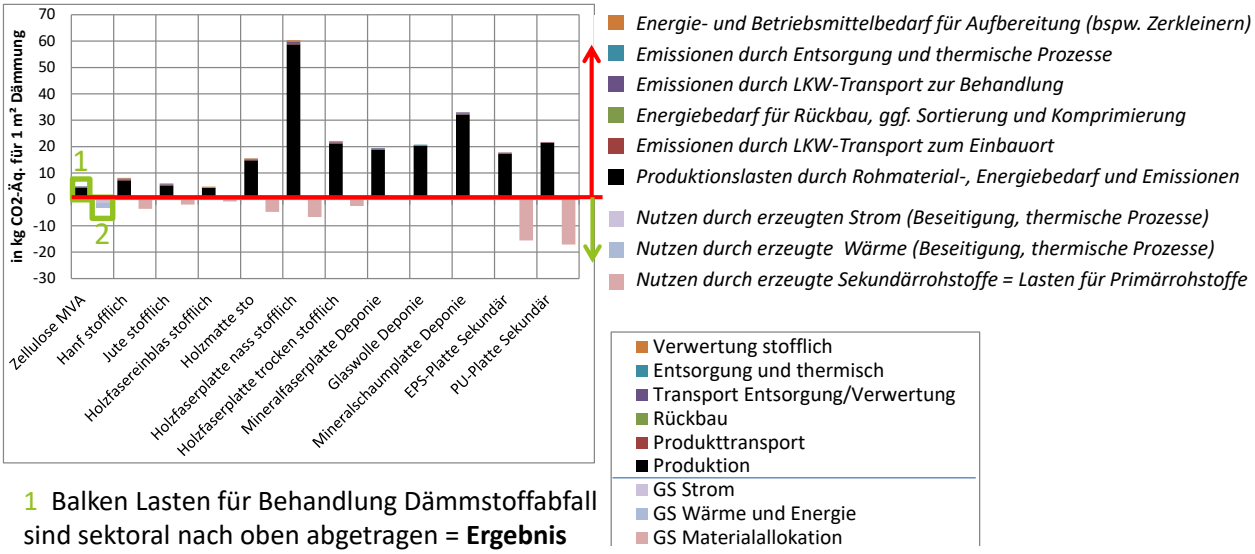
Die stoffliche Verwertung sollte weiterentwickelt und ausgebaut werden. Bei den Holzfasereinblasdämmstoffen und den Holzplatten ist dabei unter den getroffenen Annahmen zur Einsparung von Prozessenergie jeweils die Rückführung in die Dämmstoffproduktion der rohstofflichen Verwertung in Holzwerkstoffen überlegen. Bei Hanf ist hingegen die stoffliche Verwertung in Formteilen vorteilhaft. Ebenso können bei Mineralfaserplatten durch die stoffliche Verwertung im Zementwerk, bei den Schaumglasplatten durch die Verwertung zu Schaumglasschotter und bei den Mineralschaumplatten durch den Einsatz in der Porenbetonproduktion höhere Substitutionserfolge erzielt werden als durch die Rückführung in die Produktion. Dies gilt unter den gegebenen Annahmen zur Einsparung von Rohstoffen und Emissionen im Zementwerk bzw. zu den vermiedenen Lasten in der Schaumglasschotter- bzw. Porenbetonproduktion.

Bei den mineralischen Dämmstoffen ist die stoffliche Verwertung immer der Deponierung vorzuziehen. Bei den synthetischen Dämmstoffen schneidet die stoffliche Verwertung besser ab als alle energetischen Verwertungsvarianten. Hier ist es wichtig, dass zumindest der chemische Grundstoff aus den Dämmstoffen wieder für dieselbe oder andere Anwendungen zurückgewonnen wird.

6 Ganzheitliche Bewertung der Dämmstoffalternativen

6.1 Nach der EN 15804-Methode

Die EN 15804 unterscheidet zwischen Lasten, die dem betrachteten Dämmstoff anzulasten sind und rein informativen, nicht anrechenbaren Substitutionspotenzialen, die mit der stofflichen Verwertung des Dämmstoffes in einem Folgesystem bestehen, weil dort dann die Bereitstellung primärer Rohstoffe entfällt. Die mit der Verwertung einhergehenden Lasten werden dem betrachteten Dämmstoff angelastet, wenn dadurch erst das Ende der Abfalleigenschaft erreicht wird, bzw. im Substitutionspotenzial als Gegenlast berücksichtigt, wenn die weitere Aufbereitung schon nach dem Erreichen des Endes der Abfalleigenschaft stattfindet. Jedes System hat zwei Balken, wovon der linke Balken das Ergebnis nach EN 15804 darstellt, wohingegen der rechte Balken nur informativ das Substitutionspotenzial ausweist und nicht verrechnet werden darf (Abbildung 6-1).



1 Balken Lasten für Behandlung Dämmstoffabfall sind sektoral nach oben abgetragen = **Ergebnis**

2 Balken Nutzen aus ~ sind informativ sektoral nach unten abgetragen; nicht mit 1 verrechenbar!!

Abbildung 6-1: Erläuterung zur Darstellung der Ergebnissen aus der Produktökobilanz nach EN 15804

6.1.1 Bedeutung von Rückbau und Reinheit für das Ergebnis

In folgender Abbildung 6-2 sind anhand des Bauteils Außenwand die Ergebnisse für den Treibhauseffekt, die sich nach der EN 15804 für verschiedene Entsorgungsoptionen von verklebtem EPS ergeben, dargestellt. Daran zeigt sich, dass die mit dem Rückbau und ggf. Sortierung verbundenen Lasten aus ökobilanzieller Sicht im Gesamtkontext von minimaler Bedeutung sind.

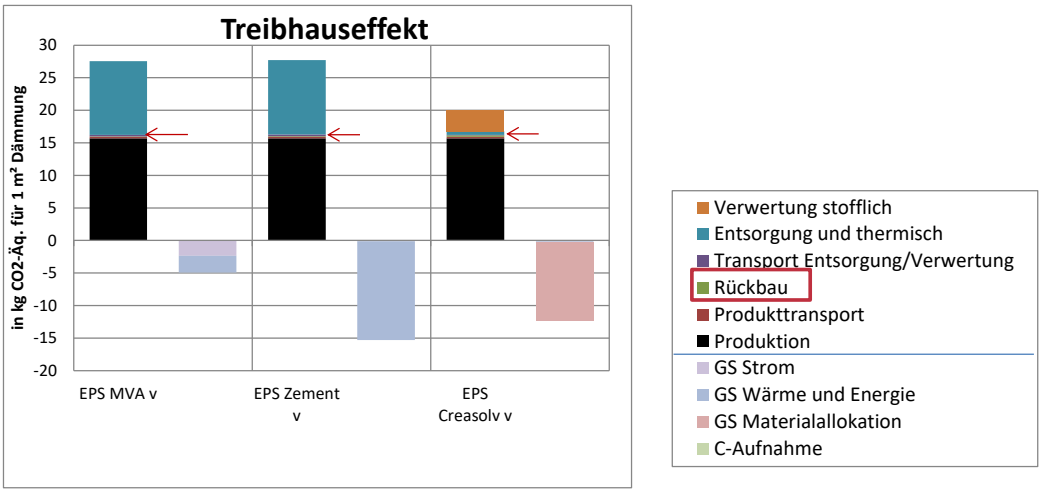


Abbildung 6-2: Bedeutung des Rückbau an den Ergebnissen im Treibhauseffekt für verklebtes EPS nach der EN 15804

Für unverklebtes EPS oder für entsprechend gereinigtes und aufbereitetes verklebtes EPS stehen die weiteren Entsorgungswege der stofflichen Verwertung Richtung Sekundärmaterial, Rückführung in die Produktion und Regranulierung zu PS offen. Dadurch können die Lasten im Treibhauseffekt aus der thermischen Entsorgung/Verwertung der synthetischen Dämmstoffe im betrachteten Lebensweg vermieden werden. Nach der EN 15804, die die Lasten für die endgültige Beseitigung in einem anderen Lebensweg nicht berücksichtigt, ergibt sich daher ein im Treibhauseffekt deutlich besseres Ergebnis für die stofflichen Verwertungswege. Verschmutzte Dämmstoffe werden hingegen im Zementwerk energetisch verwertet oder in der MVA entsorgt. Der geringe Aufwand für die Reinigung lohnt sich daher bei den synthetischen Dämmstoffen aus ökologischer Sicht deutlich, wenn dadurch dann stofflich verwertet werden kann.

6.1.2 Beste Entsorgungswege nach der EN 15804

Die geringsten Lasten für die Aufbereitung der Dämmstoffe und damit die besten Ergebnisse nach der EN 15804 ohne Berücksichtigung des dadurch erzielten Nutzens ergeben sich für folgende Entsorgungswege:

- Zellulose: Beseitigung in der MVA (Z MVA)
- Hanf: stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (Ha sto)
- Jute: stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (J sto)
- Holzfasereinblasdämmung: stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (Hein sto)
- Holzmatten: stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (HM sto)
- Holzfaserplatten nass produziert: stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (HPn sto)
- Holzfaserplatten trocken produziert: stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (HPt sto)
- Mineralfaserplatten (Steinwolle): Beseitigung auf der Deponie (St Deponie)
- Glaswolle: Beseitigung auf der Deponie (Gw Deponie)
- Schaumglasplatten: stoffliche Verwertung im Straßen- und Wegebau (Sc Bau)
- Mineralschaumplatten: Beseitigung auf der Deponie (Mi Deponie)
- EPS: stoffliche Verwertung der EPS-Kügelchen als Sekundärrohstoff in Recycling-Platten oder Wärmedämmputzen (EPS sto)
- XPS: stoffliche Verwertung des PS als Sekundärrohstoff nach Regranulierung (XPS Regran)
- PU: stoffliche Verwertung der PU-Platten durch Weiterverarbeitung zu Klebepressplatten (PU Sekundär)

Im den folgenden Kapiteln werden die Dämmstoffe in verschiedenen Bauteilen aus ökologischer Sicht miteinander verglichen, wobei die jeweils nach der EN 15804 besten, oben aufgeführten Entsorgungswege und in einem weiteren Vergleich jeweils die Entsorgung nach dem Status-Quo angesetzt sind. Eine vergleichende Zusammenstellung der Ergebnisse aller Entsorgungswege für jeden Dämmstoff bezüglich des Treibhauseffektes bzw. Versauerungspotenzials findet sich im Anhang (Kap. 8.1) in Tabelle 8-1 bzw. Tabelle 8-2.

6.1.3 Ergebnisse für das Steildach

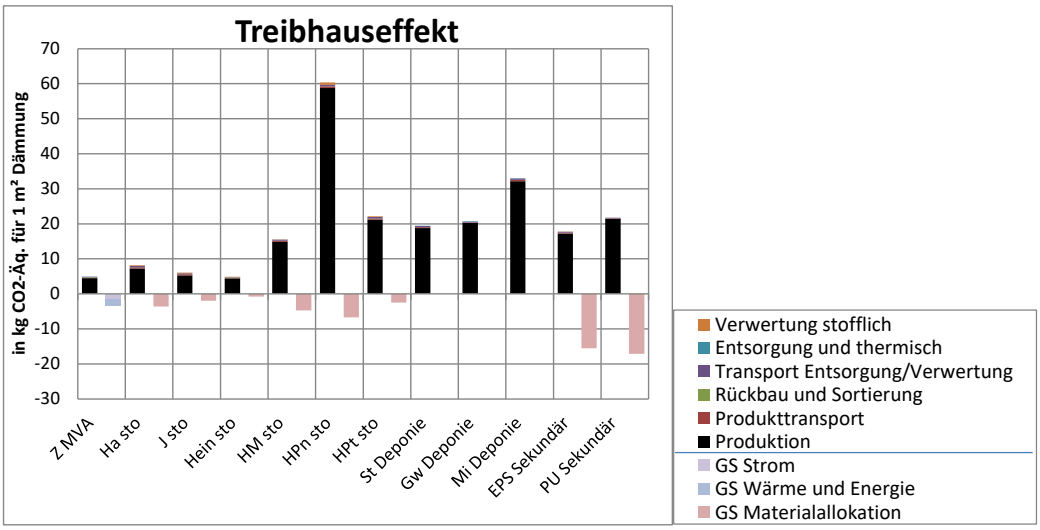
In Abbildung 6-3 sind die Beiträge zu den Lasten (links) und den nicht verrechenbaren Einsparpotenzialen (rechts) in der Kategorie Treibhauseffekt für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe dargestellt. Bezug ist die Dämmstoffmasse, die zur Dämmung einer Fläche von 1 m² benötigt wird.

Nicht nur für die Wirkungskategorie **Treibhauseffekt** zeigt sich, dass die diesbezüglichen Hauptlasten bei allen Dämmstoffen durch die Produktion verursacht werden. Die im Vergleich zwischen den Dämmstoffen geringsten Lasten sind mit den Einblasdämmstoffen und Matten aus erneuerbaren Dämmstoffen verbunden (die ersten vier von links). Zellulose- und Jutedämmstoffe werden aus Sekundärrohstoffen gefertigt, so dass als Lasten für die Rohstoffbereitstellung nur der Aufbereitungsaufwand verbleibt. Für die landwirtschaftliche Produktion der Hanffaser sind nur sehr geringe Lasten angesetzt, was den Schluss nahelegt, dass ein Großteil davon den Hanfsamen angelastet wird und die Hanffasern quasi eine Restbiomasse darstellen. Die größten Lasten zeigen sich bei Mineralschaumplatten und nochmals deutlich mehr bei den im nassen Verfahren produzierten Holzfaserdämmplatten. Bei Letzteren liegt dies an der großen Masse, die davon benötigt wird, um dieselbe Dämmwirkung wie die anderen Dämmstoffe zu erzielen. Die Lasten für die Produktion einer bestimmten Menge an im Trockenverfahren hergestellten Holzfaserplatten fallen bezüglich des Treibhauseffekts zwar ähnlich groß aus, aber es wird nur die Hälfe der Masse benötigt. Bei den Mineralschaumplatten wird Zement eingesetzt, bei dessen Herstellung zusätzliche Kohlendioxidemissionen durch das Brennen von Kalkstein aus dem Gestein freigesetzt werden. Alle anderen Dämmstoffe liegen mit ihren Treibhauseffektlasten dazwischen und nahezu gleichauf.

Die mit der Aufbereitung verbundenen Lasten werden jeweils voll angerechnet, weil sie noch vor dem Erreichen des Endes der Abfalleigenschaft anfallen. Es handelt sich aber zumeist um Zerkleinerungsschritte, die mit nur geringem Aufwand verbunden sind und daher kaum im Sektor „Verwertung stofflich“ zu sehen sind. Ebenso wenig fällt der Transport ins Gewicht. Für die Zelluloseeinblasdämmung wird die Beseitigung in einer MVA betrachtet. Da es sich dabei um biogenes Material aus Holz handelt, sind keine Lasten im Sektor „Entsorgung und thermisch“ sichtbar, weil hier auf die fossilen Kohlendioxidemissionen fokussiert wird. Wenn hingegen alle Kohlendioxidemissionen betrachtet werden, dann zeigt sich, wie hoch die biogenen Kohlendioxidemissionen ausfallen (Anhang Kap. 8.2.1, Abbildung 8-1). Diese werden dann in derselben Höhe über den Sektor „C-Aufnahme abzgl. Weitergabe“ wieder abgezogen, weil das Kohlendioxid zuvor durch den Baum der Atmosphäre entzogen und als Kohlenstoff im Holz gespeichert wurde und daher als neutral angesehen wird. Bei den synthetischen Dämmstoffen wird der enthaltene fossile Kohlenstoff bei den betrachteten stofflichen Verwertungswegen nicht als Kohlendioxid emittiert. Die Beseitigung der mineralischen Dämmstoffe auf der Deponie ist hingegen mit relativ geringen Treibhausgasemissionen verbunden.

Die größten materiell bedingten, nur informatorisch ausgewiesenen, Einsparpotenziale im Sektor „GS Materialallokation“ zeigen sich bei PU und EPS. Bei PU-Dämmplatten wird angenommen, dass durch die stoffliche Nutzung des Dämmstoffes in Klebepressplatten ein Großteil der Lasten der Dämmplattenproduktion als Einsparpotenzial angesetzt werden kann. Durch die stoffliche Verwertung der EPS-Dämmplatten als Sekundärmaterial ergibt sich ein Einsparpotenzial in Höhe der Produktionslasten von EPS-Kügelchen, die fast genauso hoch ausfallen wie diejenigen der Dämmplattenproduktion. Dahingegen ist die stoffliche Verwertung der Holzfaserdämmplatten als Holzsubstitut mit geringen Einsparpotenzialen verbunden. Die bei Holzmatten, Hanf und Jute sichtbaren Einsparpotenziale für die stoffliche Verwertung in Formteilen werden durch die über die Stützfaseranteile dort einsparbaren Kunststoffe mit ihren größeren Produktionslasten gestützt. Bei Jute ist das Einsparpotenzi-

al geringer, weil nach der EN 15804 das Einsparpotenzial aus der stofflichen Verwertung des Juteanteils nicht angesetzt werden darf, da Jutedämmstoff schon aus sekundärer Jute produziert wird. Die im Falle von Zelluloseeinblasdämmung in der MVA produzierte Energie wird in den Sektoren „GS Strom“ bzw. „GS Wärme und Energie“ als entsprechendes Einsparpotenzial an aktuellem deutschem Netzstrommix bzw. Gasheizung sichtbar.

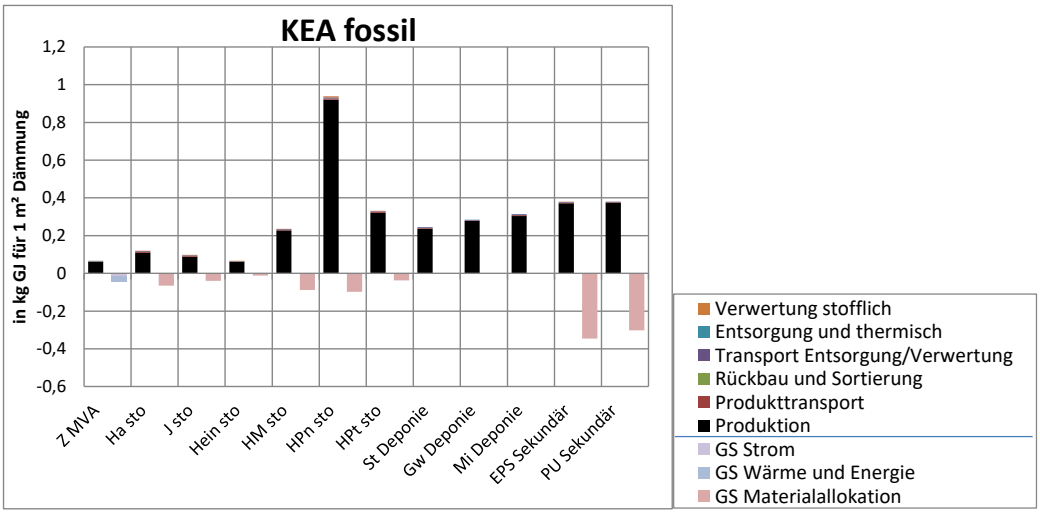


Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-3: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

Im **fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil)** werden die zur Energiebereitstellung verbrannten fossilen Energierohstoffe sowie die in den Materialien enthaltenen fossilen Rohstoffe (= Feedstock) als Energieäquivalente entsprechend ihres Heizwertes aufsummiert. Das Bild ähnelt teilweise dem des Treibhauseffektes, weil dieser zu einem Großteil über die Verbrennung fossiler Energierohstoffe verursacht wird (Abbildung 6-4). Die synthetischen Dämmstoffe schneiden aber relativ schlechter ab, weil hier auch der Verbrauch fossiler Ressourcen, die dort als Rohstoff im Dämmstoff fungieren, abgebildet wird; diese werden nicht treibhauswirksam freigesetzt, weil eine stoffliche Verwertung stattfindet.

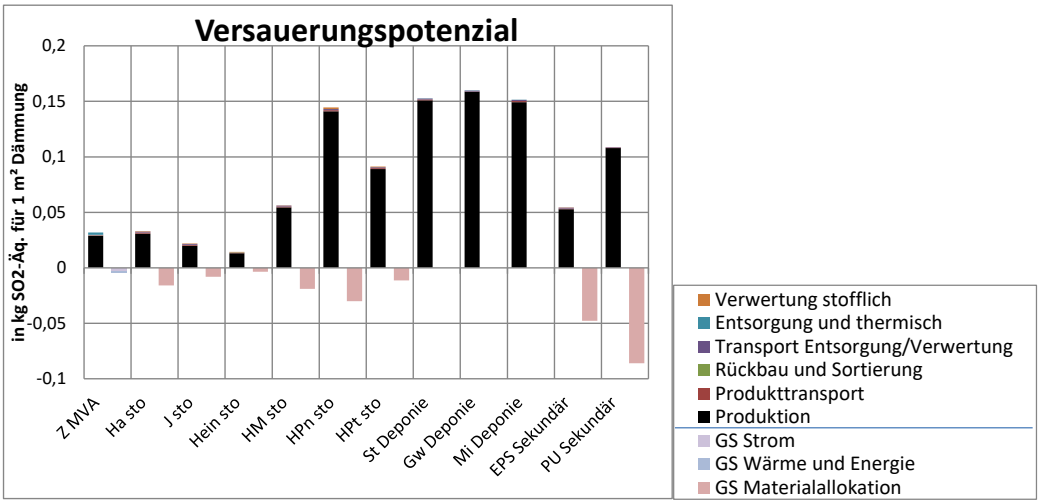
Mineralschaumplatten schneiden relativ besser ab, weil die bei der Produktion von Zement aus dem Gestein freigesetzten Kohlendioxidemissionen keinen Zusammenhang mit dem KEA fossil haben. Die Einsparpotenziale sind entsprechend des größeren Heizwertes bei den EPS-Platten größer als bei den PU-Platten. Bei Hanf-, Jutedämmstoffen und Holzmatten ist wiederum ersichtlich, dass durch die stoffliche Verwertung in Pressformteilen aufgrund der enthaltenen Stützfasern als Einsparpotenzial die Lasten der Kunststoffproduktion mit den darin enthaltenen fossilen Rohstoffen ausgewiesen sind.



Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-4: Ergebnisse für den fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

Im **Versauerungspotenzial**, in welchem v.a. die NOx-, Ammoniak- und SO_2-Emissionen sowie der Ausstoß von Säuren bewertet werden, zeigt sich teilweise ein anderes Muster (Abbildung 6-5). Die mineralischen Dämmstoffe schneiden hier aufgrund der Produktionslasten zusammen mit den im nassen Produktionsverfahren produzierten Holzfaserdämmplatten am schlechtesten ab. EPS verbessert sich relativ gegenüber den anderen Dämmstoffen, wohingegen sich PU verschlechtert. Damit weist jetzt das Einsparpotenzial durch die Weiterverarbeitung von PU-Dämm- zu Klebepressplatten den mit Abstand absolut höchsten Wert auf, weil dieses 80 % der Produktionslasten entspricht.

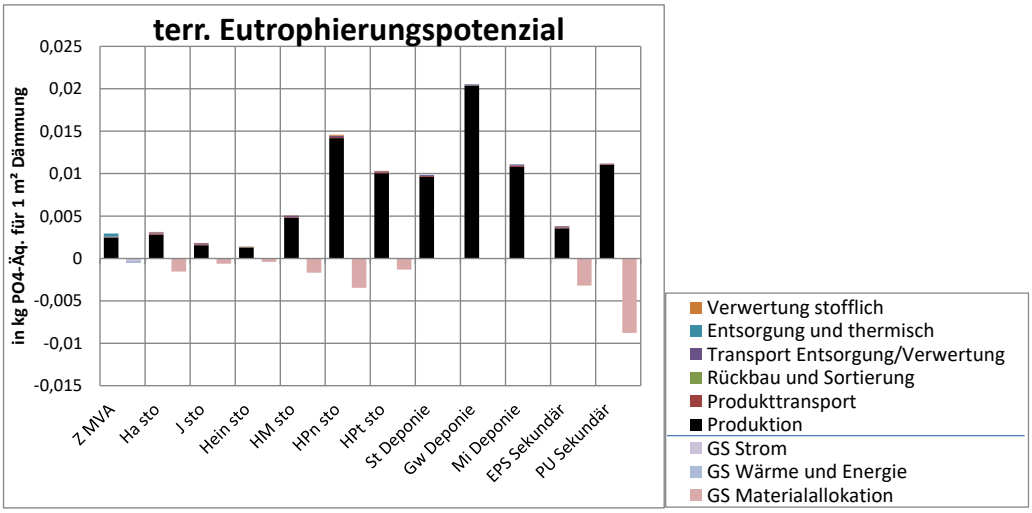


Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-5: Ergebnisse für das Versauerungspotenzial für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

Im **terrestrischen Eutrophierungspotenzial**, in welchem v.a. die NOx-Emissionen sowie Ammoniak bewertet werden, bleibt das Bild aus dem Versauerungspotenzial bestehen mit der Ausnahme, dass Mineralfaserplatten

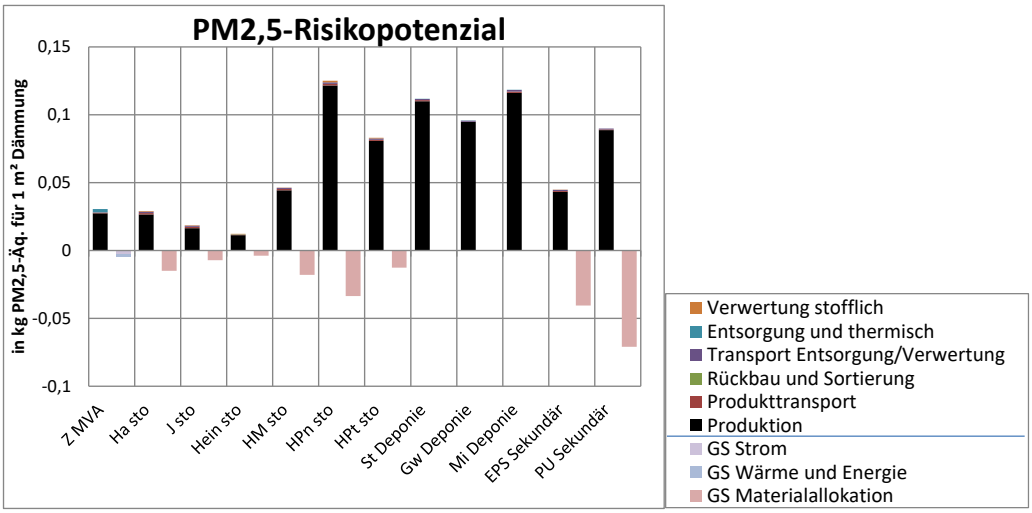
(Steinwolle) und Mineralschaumplatten besser abschneiden (Abbildung 6-6). Dies legt den Schluss nahe, dass bei letzteren beiden der große Beitrag der Produktion zum Versauerungspotenzial SO_2- und Säureemissionen zuzuschreiben ist, die bspw. im Zuge der Kohleverbrennung anfallen, wohingegen bei Glaswolle die Ammonium- und Ammoniakemissionen direkt aus dem Prozess dominieren. Ammoniakemissionen treten weiterhin bspw. im Zuge der landwirtschaftlichen Produktion auf, sind bei Hanfdämmstoffen aber kaum zu erkennen. Jutedämmstoffe sind hingegen aus sekundärer Jutefaser hergestellt, so dass die Lasten für die landwirtschaftliche Produktion im hiesigen System nach der EN 15804 nicht erscheinen.



Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-6: Ergebnisse für das terrestrische Eutrophierungspotenzial für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

Das Muster im **Feinstaubpotenzial** ähnelt wiederum dem des Versauerungs- und terrestrischen Eutrophierungspotenzials (Abbildung 6-7), weil hier neben dem direkten Ausstoß von Staub auch der Ausstoß von NOx und SO_2 bewertet werden, woraus sich Sekundärpartikel bilden. Die mineralischen Dämmstoffe schneiden hierin fast so schlecht ab wie beim Versauerungspotenzial, wobei Glaswolle relativ diesbezüglich geringere Lasten bewirkt. Dies lässt auf geringere Staubentwicklung im Prozess schließen.



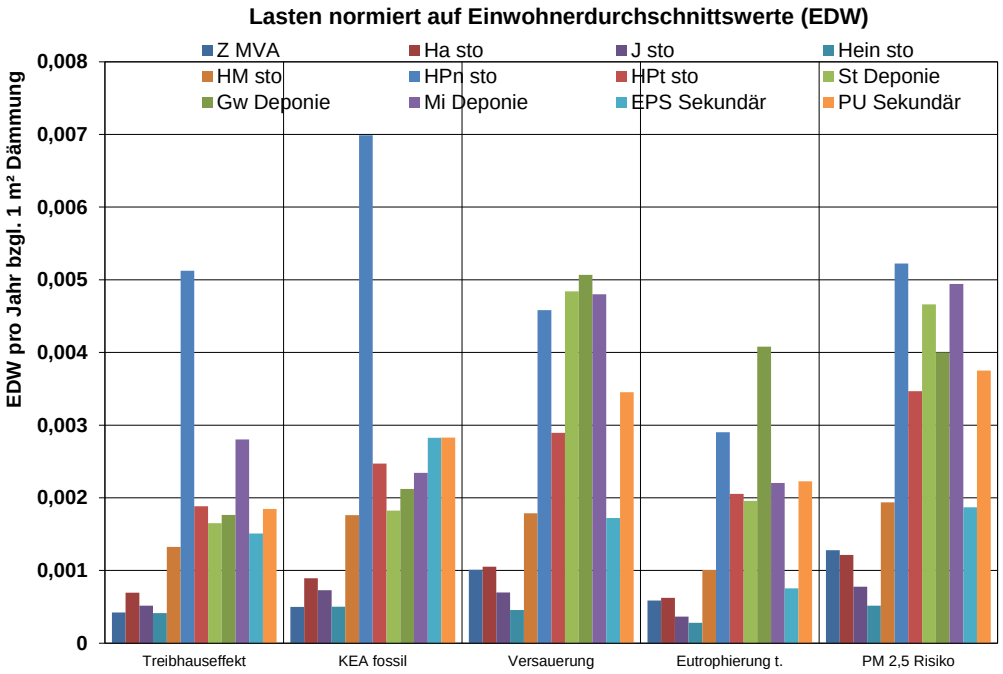
Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-7: Ergebnisse für das PM 2,5-Risikopotenzial (Feinstaub) für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

Fazit

Wenn die eben gezeigten Lasten (linker Balken) für die Indikatoren auf die jeweils diesbezüglichen pro-Kopf-Lasten eines Jahres über die gesamte deutsche Volkswirtschaft hinweg bezogen werden, so zeigt sich, dass die Lasten in den verschiedenen Indikatoren, die jetzt nebeneinander dargestellt werden können, in einer ähnlichen Größenordnung liegen (Abbildung 6-8). Alle Indikatoren sind daher quantitativ gleich bedeutsam. Über alle betrachteten Indikatoren und unter Berücksichtigung der ökologischen Bedeutung lassen sich folgende fünf Cluster finden, in welche die verschiedenen Dämmstoffe entsprechend ihrer Lasten einsortiert werden können. Um die Einsparpotenziale qualitativ zu berücksichtigen, wird benannt, wenn Dämmstoffe ein großes Einsparpotenzial mit sich bringen:

1. Zelluloseeinblasdämmung, Hanf-, Jutedämmstoff, Holzfasereinblasdämmung
2. Holzmatten mit sichtbarem Substitutionspotenzial
3. Dicht gefolgt von EPS mit sehr großem Substitutionspotenzial
4. Holzplatten trocken hergestellt, Mineralfaserplatten (Steinwolle), Glaswolle, PU mit sehr großem Substitutionspotenzial, Mineralschaum
5. Holzplatten nass hergestellt mit großem Substitutionspotenzial



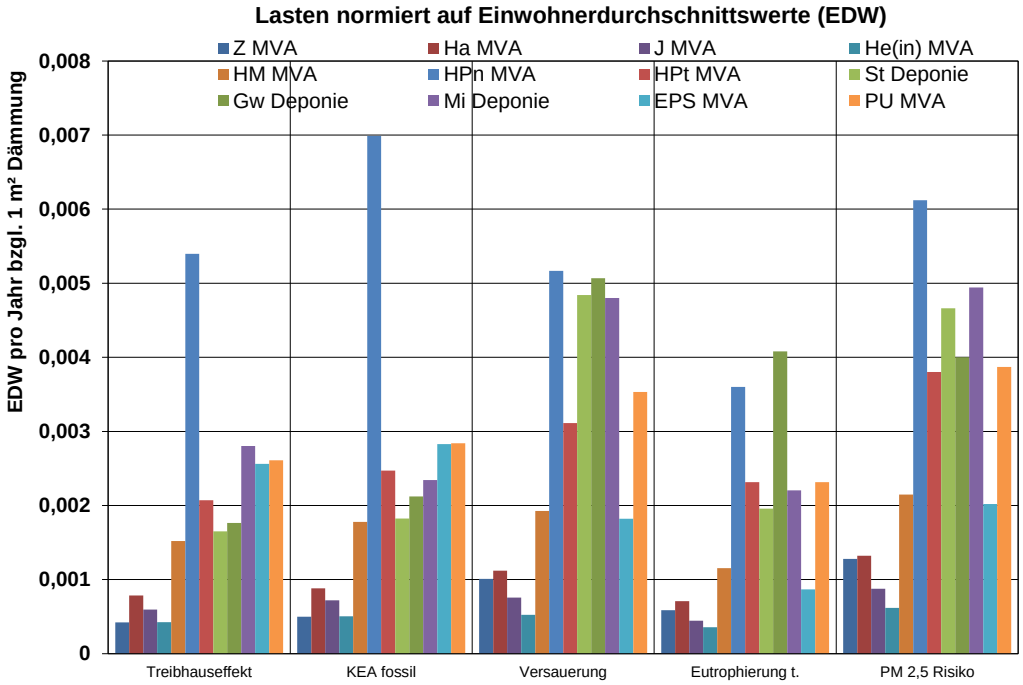
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 6-8: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Steildach mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

Eine Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo bedeutet mit Ausnahme der mineralischen Dämmstoffe eine Verbrennung in der MVA. Wenn statt der jeweils besten Entsorgungsoption nach EN 15804 am Lebensende die Entsorgung wie im Status Quo gewählt wird (Abbildung 6-9), erhöhen sich die Lasten für alle Dämmstoffe entsprechend den Verbrennungsemissionen mit Ausnahme der Dämmstoffe, für die dies der beste Entsorgungsweg nach EN 15804 darstellt (Zellulose, mineralische Dämmstoffe). Im Treibhauseffekt bedeutet das v.a. eine Verschlechterung für die synthetischen Dämmstoffe EPS und PU. Auch bei den Dämmstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen treten in geringerem Maße mit Ausnahme von Zellulose fossile Kohlendioxidemissionen auf, weil Stützfaser aus Kunststoffen bzw. bei Holzfaserdämmplatten Paraffine und Kleber aus synthetischem Material eingebaut sind. Im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungs- und PM 2,5-Risikopotenzial ist aufgrund von NOx-, SO_2- und Feinstaubemissionen im Zuge der Verbrennung eine Verschlechterung für alle nicht mineralischen Dämmstoffe mit Ausnahme von Zellulose festzustellen. Am deutlichsten ist die diesbezügliche Verschlechterung bei den nass produzierten Holzfaserdämmplatten, weil aufgrund der großen benötigten Massen auch viel verbrannt werden muss.

Insgesamt verbessern sich die Holzmatten gegenüber EPS noch etwas weiter. Der Unterschied zwischen EPS und den mineralischen Dämmstoffen verringert sich deutlich. Insbesondere die mineralischen Dämmstoffe verbessern sich relativ. Das zeigt sich auch innerhalb des vierten Clusters, weil PU und die trocken hergestellten Holzfaserdämmplatten sich verschlechtern. An der oben getroffenen Clusterung ändert sich dadurch aber nichts. EPS-Platten schneiden aber im Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand dann schlechter ab als Mineralfaserplatten, Glaswollematten und trocken produzierte Holzfaserdämmplatten.

Die nicht normierten Ergebnisse für das Steildach in Tabellenform sind im Anhang (Kap. 8.5.1) in Tabelle 8-4 und Tabelle 8-5 dargestellt.



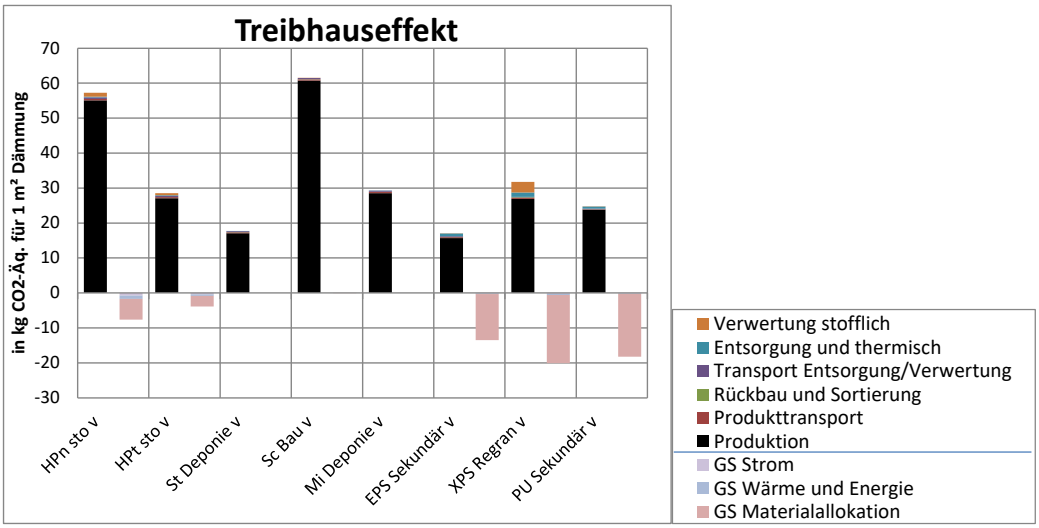
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 6-9: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Steildach nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo

6.1.4 Ergebnisse für die Außenwand

In Abbildung 6-10 sind analog zum Steildach (Kap. 6.1.3) die Ergebnisse im **Treibhauseffekt** für die an der Außenwand verklebt vorliegenden Dämmstoffe, wenn der jeweils nach EN 15804 beste Entsorgungsweg gewählt wird, dargestellt. Die Auswahl ist gegenüber dem Steildach auf Dämmstoffe in Plattenform eingeschränkt. Die neu hinzugekommenen Schaumglasplatten verursachen eine noch etwas größere Last als die nass produzierten Holzfaserdämmplatten. Es wird zwar eine verhältnismäßig relativ große Masse an Schaumglasplatten benötigt, die in etwa derjenigen von trocken produzierten Holzfaserdämmplatten entspricht. Das stellt aber weniger als die Hälfte der benötigten Masse an nass produzierten Holzfaserdämmplatten dar. Die ebenso neu hinzugekommenen XPS-Platten ähneln denen der anderen Dämmstoffe.

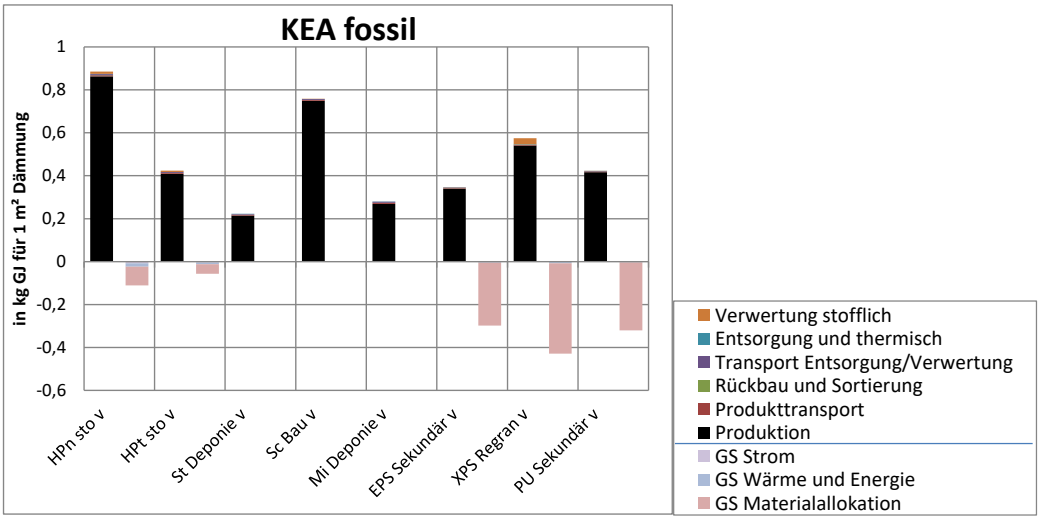
Neben den wiederum dominierenden Produktionslasten zeigen sich insbesondere bei EPS, XPS und PU auch Beiträge im Sektor „Entsorgung und thermisch“. Es handelt sich dabei um die Beseitigung der angesetzten Verluste, die beim Rückbau der verklebten Dämmstoffe entstehen. Wenn die biogenen Kohlendioxidemissionen mit gezeigt werden, ist auch der entsprechende Beitrag bei den Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen sichtbar (Anhang Kap. 8.2.1, Abbildung 8-2). Bei XPS zeigt sich der angesetzte Strombedarf für die Regranulierung deutlich im Sektor „Verwertung stofflich“. Darüber wird wie bei EPS ein Einsparpotenzial durch die Nutzung des PS in einem weiteren Lebensweg erschlossen, das einen Großteil der Produktionslasten der Dämmplatte beträgt. Aufgrund der im Vergleich zu EPS fast doppelten Masse an XPS-Dämmplatten, die zum Erreichen derselben Dämmwirkung benötigt werden, sind sowohl die Produktionslasten als auch das Einsparpotenzial entsprechend größer.



Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-10: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

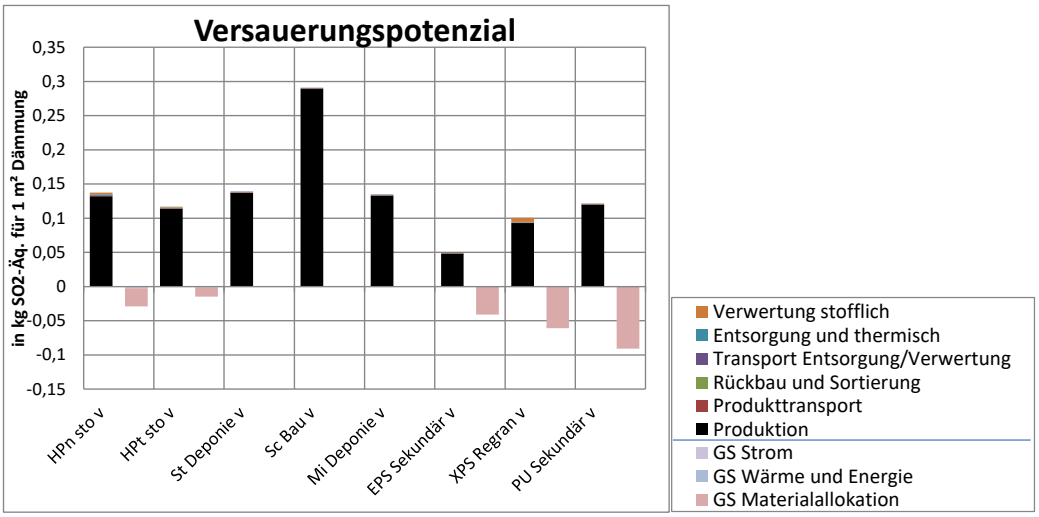
Im **fossilen kumulierten Energieaufwand** (Abbildung 6-11) schneiden die synthetischen Dämmstoffe EPS, XPS und PU aufgrund ihrer fossilen Rohstoffbasis wiederum wie beim Steildach relativ schlechter ab. Schaumglasplatten liegen diesbezüglich vor den nass produzierten Holzfaserdämmplatten.



Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-11: Ergebnisse für den fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

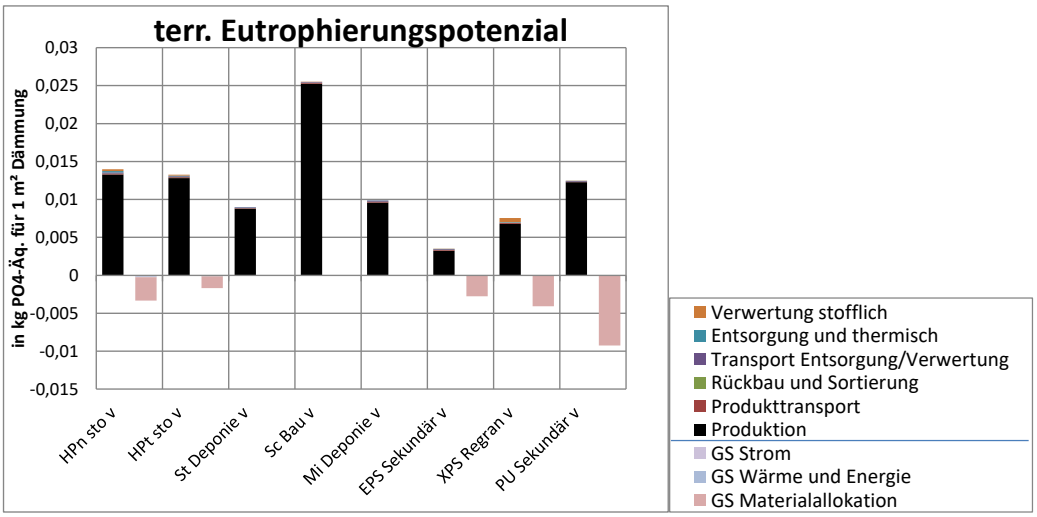
Im **Versauerungspotenzial** wird das wie im Steildach relativ schlechtere Abschneiden der mineralischen Dämmstoffe und der PU-Dämmplatten von der Schaumglasplatte überschattet (Abbildung 6-12). Dies liegt u.a. am großen Strombedarf, dessen Bereitstellunglasten über den derzeitigen europäischen Strommix abgebildet werden. Dieser ist bezüglich des Versauerungspotenzials mit deutlich größeren Lasten verbunden als der aktuelle deutsche Strommix.



Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-12: Ergebnisse für das Versauerungspotenzial für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

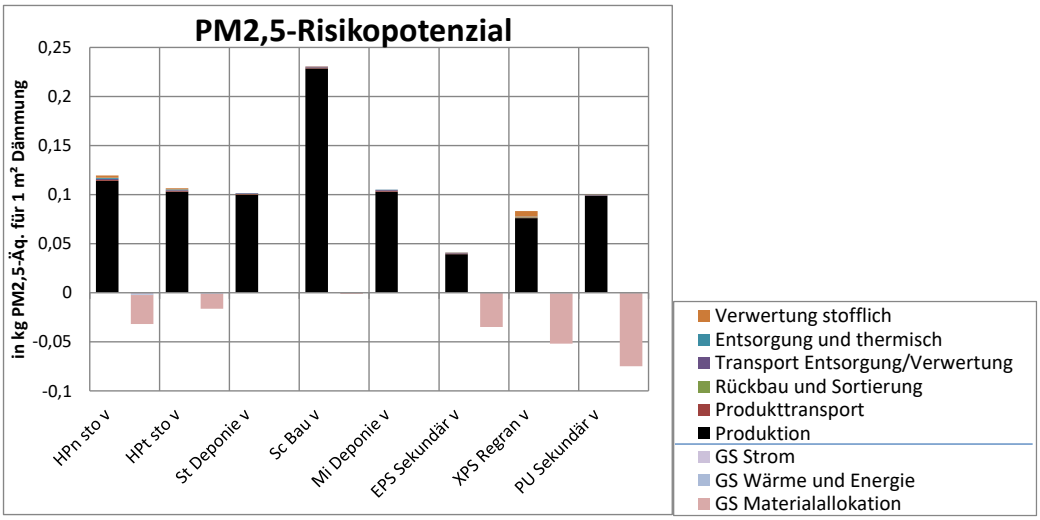
Im **terrestrischen Eutrophierungspotenzial** (Abbildung 6-13) schneiden wie beim Steildach die Mineralfaser- (Steinwolle) und Mineralschaumplatten relativ besser ab. Die Schaumglasplatten verursachen die größten Lasten ebenso wie beim Versauerungspotenzial aufgrund der Bereitstellung des benötigten Stroms.



Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-13: Ergebnisse für das terrestrische Eutrophierungspotenzial für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

Im **PM 2,5-Risikopotenzial** (Feinstaub) schneiden die mineralischen Dämmstoffe analog zum Steildach wieder fast so schlecht ab wie beim Versauerungspotenzial (Abbildung 6-14).



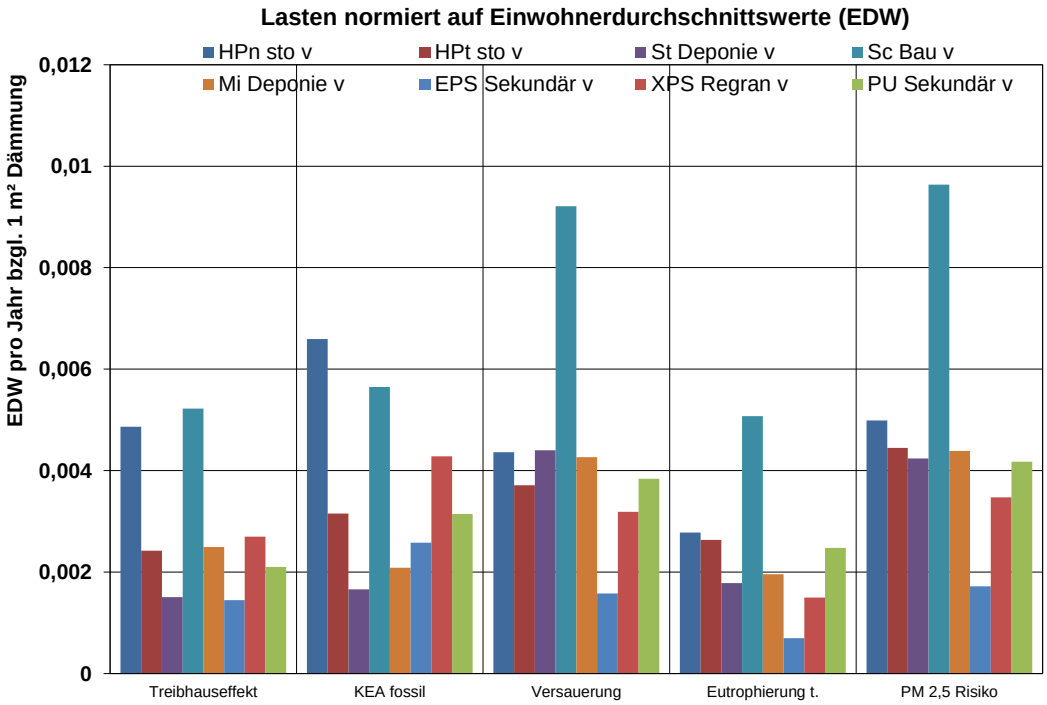
Ausschlaggebend = Linker Balken jedes Systems; Rechter Balken jedes Systems: Nur informatorisch, darf nicht mit dem jeweils linken Balken verrechnet werden!!!
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-1; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-14: Ergebnisse für das PM 2,5-Risikopotenzial (Feinstaub) für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

Fazit

Nach der Normierung der eben gezeigten Indikatoren auf die jeweiligen jährlichen pro-Kopf-Lasten können die Ergebnisse für die betrachteten Indikatoren nebeneinander gestellt werden (Abbildung 6-15). Die Dämmstoffe werden wiederum wie beim Steildach entsprechend ihrer Lasten über alle Indikatoren unter Berücksichtigung der jeweiligen ökologischen Bedeutung in vier Cluster eingeteilt; um die Einsparpotenziale qualitativ zu berücksichtigen, wird benannt, wenn Dämmstoffe ein großes Einsparpotenzial mit sich bringen:

1. EPS mit großem Substitutionspotenzial
2. Mineralfaserplatten (Steinwolle); PU-Platten mit sehr großem Substitutionspotenzial; Mineralschaumplatte; trocken hergestellte Holzfaserdämmplatten mit sichtbarem Substitutionspotenzial; XPS mit sehr großem Substitutionspotenzial
3. Holzplatten nass hergestellt mit noch recht großem Substitutionspotenzial
4. Schaumglasplatten

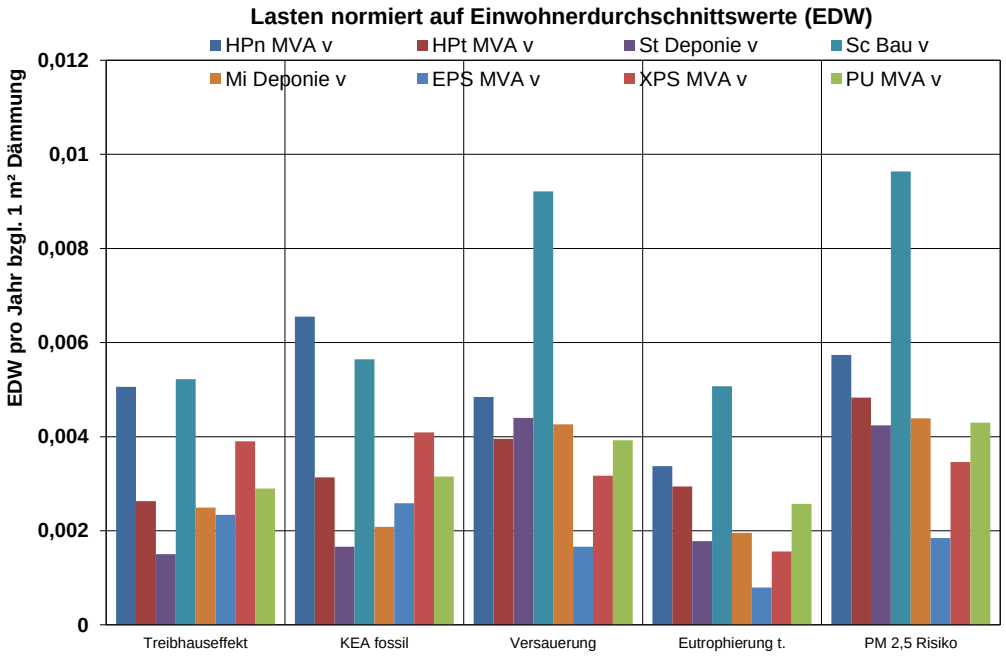


Betrachtete Dämmstoffe: Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 6-15: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen

Mit einer Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo statt der besten Entsorgungsoption nach EN 15804 erhöhen sich wie im Steildach für alle Dämmstoffe mit Ausnahme der mineralischen die Lasten aufgrund der Verbrennungsemissionen aus der MVA (Abbildung 6-16). Besonders stark ist die Zunahme im Treibhauseffekt für die synthetischen Dämmstoffe EPS, XPS und PU, weil dann der in diesen Dämmstoffen enthaltene fossile Kohlenstoff als Kohlendioxid freigesetzt wird. Auch die synthetischen Anteile in den Holzfaserdämmplatten führen zu einer leichten Zunahme der Treibhauseffektlasten bei diesen Dämmstoffen durch die Beseitigung. Die Verbrennungsemissionen führen für alle nicht mineralischen Dämmstoffe zu einer Verschlechterung im Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungs- und PM2,5-Risikopotenzial, wobei der Anstieg bei den nass produzierten Holzfaserdämmplatten aufgrund der großen Masse, die verbrannt wird, wie im Steildach am größten ist. Bei XPS ist mit Ausnahme des terrestrischen Eutrophierungspotenzials kaum ein Anstieg zu verzeichnen, da die Regranulierung im besten Entsorgungsweg nach EN 15804 Strom benötigt, dessen Bereitstellung ebenso mit entsprechenden Verbrennungslasten verbunden ist. Diese entfallen im Beseitigungsweg, aber an deren Stelle treten die Lasten der MVA.

Insgesamt verbessern sich durch eine Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo anstatt des nach EN 15804 besten Entsorgungsweges die mineralischen Dämmstoffe relativ zu den anderen Dämmstoffen. Dies gilt auch für die Holzfaserdämmplatten im Treibhauseffekt. An der oben getroffenen Clusterung ändert sich dadurch aber wiederum nichts, wobei sich der Unterschied zwischen EPS und den mineralischen Dämmstoffen deutlich verringert bzw. sich die Reihenfolge im 2. Cluster zugunsten der mineralischen Dämmstoffe verbessert, weil PU, die trocken hergestellten Holzfaserdämmplatten und XPS sich verschlechtern. EPS-Platten schneiden im Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand dann schlechter ab als Mineralfaserplatten.



Betrachtete Dämmstoffe: Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 6-16: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo

Die nicht normierten Ergebnisse für die Außenwand in Tabellenform sind im Anhang (Kap. 8.5.1) in Tabelle 8-6 und Tabelle 8-7 dargestellt.

6.1.5 Ergebnisse für die weiteren Bauteile und Fazit

Die Ergebnisse der weiteren Bauteile ähneln dem des Steildaches und der Außenwand. In Tabelle 6-1 ist die daraus abgeleitete Reihenfolge der Dämmstoffe bezüglich der mit der Produktion und Entsorgung verbundenen ökologischen Lasten dargestellt. Bei den kursiv dargestellten Bauteilen beschränkt sich die Auswahl auf die plattenförmigen Dämmstoffe, die dort verklebt eingebaut werden. Die zugehörigen auf die pro-Kopf-Lasten normierten Ergebnisse finden sich im Anhang (Kap. 8.6) in Abbildung 8-12 bis Abbildung 8-18 für die nach EN 15804 besten Entsorgungswege bzw. Abbildung 8-19 bis Abbildung 8-25 für eine Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo.

Tabelle 6-1: Zusammenfassende bauteilabhängige Einordnung der Dämmstoffe mit dem jeweils nach EN 15804 besten Entsorgungsweg in Cluster, entsprechend der ökologischen Bewertung nach der EN 15804

Bauteil/Rang	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Steildach	Hein, J, Ha, Z	HM	EPS	HPt, St, Gl, PU, Mi	HPn	
Außenwand	EPS	St, PU, Mi, HPt, XPS	HPn	Sc		
Außenwand leicht	Hein, J, Ha, Z	HM	EPS	St, Gl, HPt, Mi	HPn	
Flachdach leicht	Hein, J, Ha, Z	HM	EPS	St, Gl, HPt, PU, Mi, XPS	HPn	Sc
Flachdach schwer	EPS	St, PU, HPt, Mi, XPS	HPn	Sc		
O. Geschoss-decke leicht	Hein, J, Ha, Z	HM	EPS	St, Gl, PU, HPt, Mi, XPS	Hpn	Sc
O. Geschoss-decke schwer	Hein, Z	EPS	St, PU, HPt, Mi, XPS	HPn	Sc	
Kellerdecke unten	Hein, J, Ha, Z	HM	EPS	St, Gl, PU, HPt, Mi, XPS	HPn	Sc
Kellerwand außen	EPS	PU, XPS	Sc			

Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte

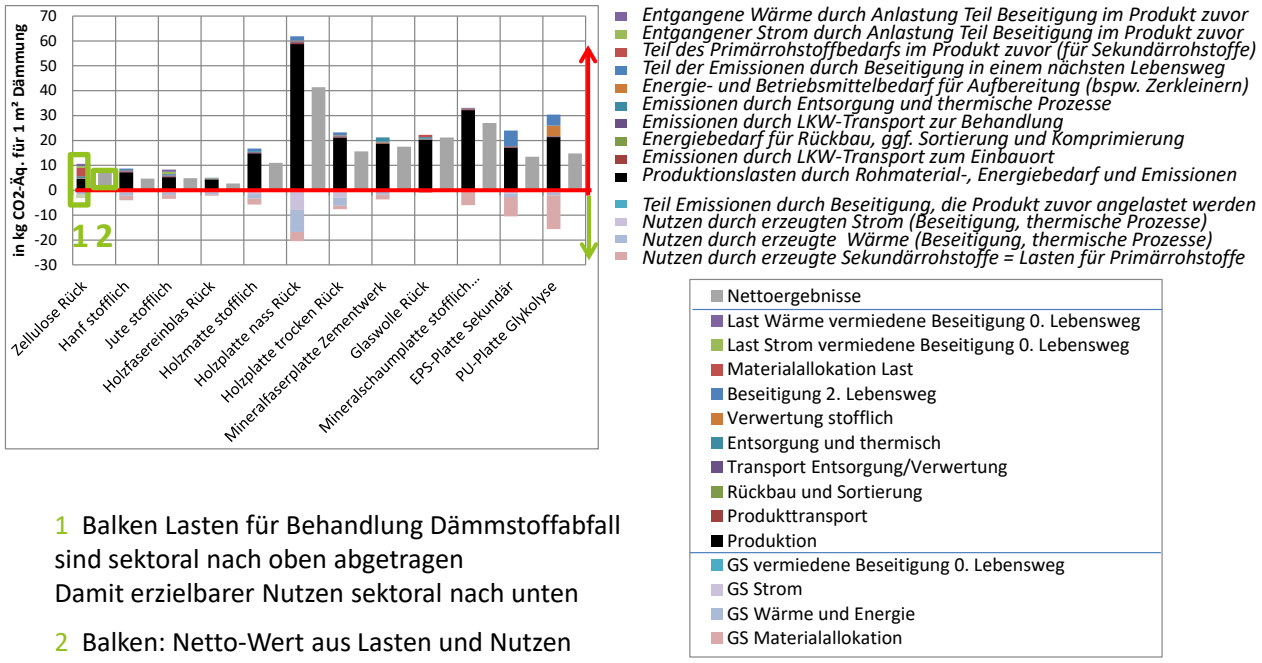
Relativ bauteilunabhängig schneiden die nicht-plattenförmigen Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen am besten ab, wenn die beste Entsorgung nach der EN 15804 zugrunde gelegt wird. Mit Ausnahme von Holzfasereinblasdämmung greifen diese entweder auf sekundäre Rohstoffe ohne große Lasten oder Restbiomasse zu, der nur ein geringer Teil der landwirtschaftlichen Produktion angelastet wird. Diese lassen sich mit Ausnahme von Außenwand, schwerem Flachdach und Kellerwand außen und im Falle der Matten auch der schweren obersten Geschossdecke in allen Bauteilen verbauen. Darauf folgen EPS-Platten, die von den plattenförmigen Dämmstoffen am besten abschneiden. Dann folgt eine Mischgruppe aus Mineralfaserplatten (Steinwolle), Glaswolle, PU-Platten, trocken produzierten Holzfaserdämmplatten, Mineralschaum- und XPS-Platten. Schlechter schneiden nass produzierte Holzfaserdämmplatten ab, gefolgt von Schaumglasplatten. Durch eine Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo verschlechtern sich im Treibhauseffekt insbesondere die synthetischen Dämmstoffe, die mineralischen Dämmstoffe verbessern sich relativ. EPS-Platten sind dann im Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand schlechter als Mineralfaserplatten, Glaswollematten und in manchen Bauteilen auch als trocken produzierte Holzfaserdämmplatten.

Bei der Interpretation muss auch der spezielle Nutzen der Dämmstoffe betrachtet werden. Vereinfachend wird hier angenommen, dass das Bauteil so vorliegt, dass jeder Dämmstoff auf dieselbe Weise eingebaut werden kann. Dabei wird aber noch nicht berücksichtigt, dass manche Dämmstoffe neben dem Dämm- noch einen erweiterten Nutzen haben. Schaumglasplatten haben einen solchen erweiterten Nutzen, weil sie voll belast-, nicht durchwurzelbar und absolut wasserundurchlässig sind und sich daher besonders für anspruchsvolle Spezialanwendungen wie die Perimeterdämmung oder die Flachdach-Umkehrdämmung eignen. Dadurch sind sie nur eingeschränkt über den Dämmnutzen direkt mit den anderen Dämmstoffen vergleichbar. Die Nutzung von Schaumglasplatten wie die anderen Dämmstoffe zur großflächigen Außenwanddämmung wird in der Praxis eher nicht erfolgen.

6.2 Nach dem 50:50-Ansatz

Im vorangegangenen Kapitel 6.1 ist deutlich geworden, dass die Produktion einen sehr bedeutenden Faktor in der ökologischen Bewertung der Dämmstoffe darstellt. Bei stofflicher Verwertung können die alten Dämmstoffe als Rohstoffe in neuen Produkten verwertet werden. Der damit verbundene Nutzen ist umso größer, je größer die Lasten für die Bereitstellung des primären Rohstoffes sind, weil diese Lasten dadurch eingespart werden. Die Last teilt sich dann auf die Lebenswege auf. Wenn die Bereitstellung der Rohstoffe einen großen Teil der Produktionslasten der Dämmstoffe verursacht, kann durch den Nutzen aus der stofflichen Verwertung entsprechend viel Last eingespart werden; durch die Aufteilung der Lasten für die Rohstoffbereitstellung verringern sich die Gesamtlasten für die Dämmstoffproduktion dann erheblich.

Die EN 15804 erlaubt keine Anrechnung des Nutzens, der hier betrachtete 50:50-Ansatz nimmt hingegen eine hälftige Aufteilung der Lasten für die Rohmaterialbereitstellung über die Anrechnung des hälftigen Nutzens vor. Über den 50:50-Ansatz werden die Dämmstoffe in jedem Bauteil mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen aus ökologischer Sicht miteinander vergleichen und daraus eine Empfehlung für jedes Bauteil abgeleitet. Jedes System hat wie in der Abfallökobilanz zwei Balken, wobei der linke Balken nach oben über der x-Achse die Lasten und nach unten unter der x-Achse den mit dem jeweiligen Entsorgungsweg verbundenen Nutzen beziffert. Der rechte Balken stellt den Netto-Wert aus Lasten und Nutzen und damit das eigentlich Ergebnis dar (Abbildung 6-17).



1 Balken Lasten für Behandlung Dämmstoffabfall sind sektoral nach oben abgetragen
Damit erzielbarer Nutzen sektoral nach unten

2 Balken: Netto-Wert aus Lasten und Nutzen

Abbildung 6-17: Erläuterung zur Darstellung der Ergebnissen aus der Produktökobilanz nach dem 50:50-Ansatz

6.2.1 Beste Entsorgungswege nach dem 50:50-Ansatz

Das beste absolute Lasten- zu Nutzenverhältnis und damit die besten Ergebnisse nach dem 50:50-Ansatz liefern die unten aufgeführten Entsorgungswege. Dabei werden zum einen die insgesamt besten Entsorgungswege / und zum anderen die innerhalb der stofflichen Verwertung besten Verwertungswege dargestellt. Durch die Bezifferung des Nutzens der im Zementwerk im Zuge der Dämmstoffverbrennung produzierten Energie über dadurch eingesparte Verbrennung von Steinkohle bzw. des in der MVA produzierten Stroms über den aktuellen

deutschen Netzstrommix bzw. der Wärme über eingesparte Gasheizung schneiden teilweise bei den Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen thermische Optionen besser ab als stoffliche:

- Zellulose: energetische Verwertung im Zementwerk (Z Zement) / stoffliche Verwertung durch Rückführung eines kleinen Teils in die Produktion bzw. Pyrolyse des Rests (Z Rück)
- Hanf: energetische Verwertung im Zementwerk (Ha Zement) oder / stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (Ha sto)
- Jute: stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (J sto)
- Holzfasereinblasdämmung: energetische Verwertung im Zementwerk (Ha Zement) / stoffliche Verwertung durch Rückführung eines kleinen Teils in die Produktion bzw. des Rests als Sekundärrohstoff in Formteilen (Hein Rück)
- Holzmatten: energetische Verwertung im Zementwerk (HM Zement) oder / stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Formteilen (HM sto)
- Holzfaserplatten nass produziert: energetische Verwertung im Zementwerk (HPn Zement) / stoffliche Verwertung durch Rückführung eines kleinen Teils in die Produktion bzw. des Rests als Sekundärrohstoff in Formteilen (HPn Rück)
- Holzfaserplatten trocken produziert: energetische Verwertung im Zementwerk (HPt Zement) / stoffliche Verwertung durch Rückführung eines kleinen Teils in die Produktion bzw. des Rests als Sekundärrohstoff in Formteilen (HPt Rück)
- Mineralfaserplatten (Steinwolle): stoffliche Verwertung im Zementwerk (St Zement)
- Glaswolle: Stoffliche Verwertung durch Rückführung eines kleinen Teils in die Produktion bzw. des Rests im Zementwerk (Gw Rück)
- Schaumglasplatten: stoffliche Verwertung als Schaumglasschotter (Sc Schotter)
- Mineralschaumplatten: stoffliche Verwertung als aufgeschäumter mineralischer Baustoff, bspw. in der Produktion von Porenbeton (Mi sto min)
- EPS: stoffliche Verwertung der EPS-Kügelchen als Sekundärrohstoff in Recycling-Platten oder Wärmedämmputzen (EPS sto) /
- XPS: stoffliche Verwertung des PS als Sekundärrohstoff nach Regranulierung (XPS Regran) /
- PU: rohstoffliche Verwertung durch Glykolyse (PU Glyko) /

Im folgenden Kapitel werden die Dämmstoffe in verschiedenen Bauteilen aus ökologischer Sicht miteinander verglichen, wobei die jeweils nach dem 50:50-Ansatz besten stofflichen Entsorgungswege (wie oben hinter dem / ausgeführt) und in einem weiteren Vergleich jeweils die Entsorgungswege wie im Status Quo angesetzt sind. Dabei werden für den ersten Vergleich nur stoffliche Verwertungswege herangezogen, weil aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Kreislaufwirtschaft davon ausgegangen wird, dass eine stoffliche Verwertung angestrebt werden wird und der Nutzen aus der energetischen Verwertung kleiner werden wird. Eine vergleichende Zusammenstellung der Ergebnisse aller Entsorgungswege für jeden Dämmstoff bezüglich des Treibhauseffektes bzw. Versauerungspotenzials findet sich im Anhang (Kap. 8.1) in Tabelle 8-1 bzw. Tabelle 8-2.

6.2.2 Ergebnisse für das Steildach

Für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe ergeben sich mit den jeweils besten stofflichen Verwertungswegen die im Folgenden dargestellten Ergebnisse. Bezug ist wieder die jeweilige Dämmstoffmasse, die zur Dämmung einer Fläche von 1 m² benötigt wird.

Auch hier bedingt wie nach der EN 15804 die Produktion der Dämmstoffe unter dem Gesichtspunkt **Treibhauseffekt** den größten Beitrag zu den Gesamtlasten, die nach oben über der x-Achse abgetragen sind (Abbildung 6-18). Für die Produktionslasten und das diesbezügliche Abschneiden der Dämmstoffe gelten die Ausführungen in Kapitel 6.1.3 zu Abbildung 6-3 uneingeschränkt, weil diesbezüglich keine Unterschiede zwischen der EN 15804 und dem 50:50-Ansatz bestehen. Die geringsten Lasten sind wiederum mit den ersten vier erneuerbaren Dämmstoffen von links verbunden, die mit Ausnahme der Holzfasereinblasdämmung auf sekundäre Rohstoffe

oder Restbiomasse zugreifen. Die Produktion der nass produzierten Holzfaserdämmplatten ist auch aufgrund der großen Masse, die davon benötigt wird, mit den größten Lasten verbunden. Bei den Mineralschaumplatten ist der Zementeinsatz ein diesbezüglicher Treiber.

Bei Mineralfaserplatten (Steinwolle) und Glaswolle kommen in geringem Maße Kohlendioxidemissionen durch die Verbrennung des enthaltenen Bindemittels aus den hier als fossil angesetzten Rohstoffen im Zuge der stofflichen Verwertung im Zementwerk hinzu, die im Sektor „Entsorgung und thermisch“ subsummiert sind. Für die Glykolyse der PU-Dämmplatten wird Diethylenglykol benötigt, dessen Bereitstellung mit Lasten verbunden ist (Vorkette), die sich im Sektor „Verwertung stofflich“ zeigen. Insbesondere bei den synthetischen Dämmstoffen EPS und PU treten Lasten für die Verbrennung des Materials aus fossilen Rohstoffen aufgrund der hälftig angelasteten Beseitigung in der MVA im Folgelebensweg im Sektor „Entsorgung 2. Lebensweg“ auf. Auch bei den Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist ein geringerer Beitrag in diesem Sektor erkennbar, der im Falle von Holzmatten, Hanf- und Jutedämmstoffen und den Holzfaserdämmplatten in den Emissionen aus der Verbrennung der synthetischen Stützfaser- bzw. Bindemittel- und Kleberanteile aus fossilen Rohstoffen begründet liegt. Wenn hingegen auch die biogenen Kohlendioxidemissionen betrachtet werden, die dann über den Sektor „C-Aufnahme abzgl. Weitergabe“ wieder abgezogen werden, zeigt sich das in (Anhang Kap. 8.2.2, Abbildung 8-3) dargestellte Bild.

Für die Dämmstoffe, die hier ganz oder teilweise aus sekundärem Material hergestellt werden (Zellulose, Jute, Glaswolle), werden die Lasten für die Bereitstellung der Primärrohstoffe im vorangegangenen Lebensweg hälftig angelastet, so dass ein Beitrag durch den Sektor „Materialallokation Last“ resultiert. Bei Jute ist dieser Beitrag nicht dargestellt, weil er sich mit dem Beitrag im Sektor „GS Materialallokation“ kürzen würde, der den Nutzen durch die Einsparung eben diesen Primärmaterials im Folgesystem beziffern würde und ebenso nicht dargestellt ist. Es werden nur die Differenzen aus anzurechnender Last für Primärrohstoffe aus dem vorangehenden System und anzurechnender Einsparung von Primärrohstoffen im Folgesystem ausgewiesen. Da die Rückführung von Zellulosedämmstoffen in die Produktion nur zu einem Anteil von 3 % erfolgt und der Rest über die Pyrolyse entsorgt wird, wodurch keine Zellulose in einem Folgesystem eingespart wird, verbleibt hier eine relativ große Last aus der hälftigen Anrechnung der Bereitstellung von Holzschliff aus dem vorangegangenen Lebensweg. Es wird angenommen, dass der Primärrohstoff für die Vorläufer des in der Dämmstoffproduktion eingesetzten Zeitungspapiers ursprünglich Holzschliff war, welcher mit entsprechenden Herstellungslasten verbunden ist. Die Rückführung von Glaswolle in die Produktion erfolgt auch nur zu einem Anteil von 4 %, der Rest wird stofflich im Zementwerk verwertet, wodurch nicht die ursprünglichen Rohstoffe im Folgesystem eingespart werden. Daher verbleibt auch hier aus dem vorangehenden Lebensweg eine Last aus der hälftigen Anrechnung der Rohstoffbereitstellung für die Primärglasbereitstellung, die die primären Rohstoffe und die im Vergleich zum Altglas erhöhte Schmelzenergie umfasst. Diese Lasten für die relativ kleine Glasmenge, die für den Dämmstoff benötigt wird, sind aber relativ gering.

Unter der x-Achse sind die erzielbaren Entlastungen abgetragen. Durch die stoffliche Verwertung wird v.a. die Rohstoffbereitstellung in Folgesystemen eingespart. Dies wird hälftig den hier betrachteten Dämmstoffen im Sektor „GS Materialallokation“ angerechnet und von den Lasten abgezogen, um den Netto-Wert zu errechnen. Die größten Entlastungen mit entsprechender Verringerung des Netto-Wertes dadurch sind demnach bei den synthetischen Dämmstoffen und der Mineralschaumplatte zu erzielen. Bei PU wird über die Glykolyse ein RC-Polyol erzeugt, das primäres Polyol mit dessen Lasten einspart und über das extern zugegebene Diethylenglykol verdoppelt wird. Durch den Einsatz alten Mineralschaums in der Porenbetonproduktion werden die sonst dafür benötigten darin enthaltenen Rohstoffe eingespart, wobei für Zement nur eine Einsparung von 25 % angerechnet wird. Weiterhin entfällt das Vorschäumen, wodurch die dafür benötigte Energie eingespart wird, von der hier angenommen wird, dass sie 25 % des gesamten Energiebedarfs der Mineralschaumplattenproduktion beträgt.

Durch die stoffliche Verwertung der EPS-Kügelchen aus den EPS-Dämmplatten wird dieser Rohstoff mit den Lasten, die fast so groß ausfallen wie diejenigen der Dämmplattenproduktion, im Folgesystem eingespart, so dass eine große Entlastung im Sektor „GS Materialallokation“ erzielt wird. Durch die stoffliche Verwertung von

Holzfaserdämmplatten wird im Folgesystem der Rohstoff Holz mit relativ geringen Lasten eingespart. Aufgrund der großen Dämmstoffmasse ergibt sich bei den nass produzierten Holzfaserdämmplatten aber trotzdem ein deutlicher Entlastungsbeitrag. Durch die stoffliche Verwertung von Jute-, Hanf- und Holzmattendämmstoffen in Formteilen ergeben sich durch die Einsparung der entsprechenden Hauptrohstoffe keine großen Entlastungen. Im Falle von Hanf wird dadurch eine Hanffaser eingespart, der nur ein geringer Anteil der landwirtschaftlichen Produktion angelastet wird und im Falle der sekundären Jute kürzen sich die Entlastung und die Anlastung aus dem Vorleben. Weil aber über die Stützfasern in den Formteilen auch entsprechend Kunststoffe als Rohstoffe mit größeren Lasten eingespart werden, ist ein deutlicher Beitrag in „GS Materialallokation“ sichtbar.

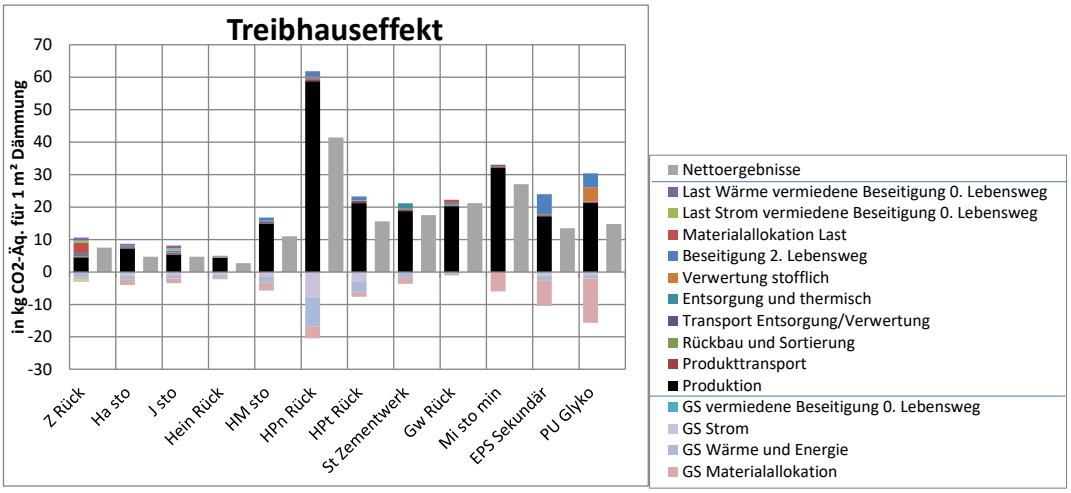
Die endgültige Beseitigung in der MVA in einem nächsten Lebensweg, die den Dämmstoffen trotz stofflicher Verwertung hälftig angelastet wird, ist über den Heizwert und die dadurch erzeugte Energie auch mit einem Nutzen verbunden, der in den Sektoren „GS Strom“ bzw. „GS Wärme und Energie“ quantifiziert wird. Hierdurch wird die Produktion aktuellen deutschen Netzstrommixes und die Wärmebereitstellung über Gasheizung eingespart. Aufgrund der großen zu beseitigenden Holzmasse zeigt sich der diesbezüglich deutlichste Beitrag bei den nass produzierten Holzfaserdämmplatten, gefolgt von den weiteren Holzdämmstoffen und den synthetischen Dämmstoffen mit geringer Masse, aber einem großen Heizwert. Der Beitrag im Sektor „GS Wärme und Energie“ bei den Mineralfaserplatten (Steinwolle) und in geringerem Maße auch der Glaswolle beziffert die durch die Verbrennung des Bindemittels erzeugte Wärme, wodurch im Zementwerk Steinkohleverbrennung eingespart wird. Aus der hälftig angelasteten endgültigen Beseitigung der mineralischen Dämmstoffe auf der Deponie ergibt sich kein Nutzen.

Die Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen müssen nur einen Teil der Beseitigung tragen, weil der andere Teil bereits dem Vorprodukt als Beitrag zur endgültigen Beseitigung im nachfolgenden Lebensweg anzulasten ist. Die diesbezügliche Einsparung im Sektor „GS vermiedene Entsorgung 0. Lebensweg“ ist hier aber kaum ersichtlich, weil im Falle von Jute und Zellulose die eingesparten Beseitigungslasten in der MVA und im Falle von Glaswolle diejenigen der Deponierung klein ausfallen. Da die eingesparte Beseitigung in der MVA aber auch mit einem Nutzen in Form von Strom bzw. Wärme verbunden ist, der dann wegfällt, gibt es bei Zellulose und Jute einen kleinen Lastenbeitrag in den zugehörigen Sektoren „Last Strom vermiedene Entsorgung 0. Lebensweg“ bzw. „Last Wärme vermiedene Entsorgung 0. Lebensweg“.

Im Nettoergebnis verbessern sich gegenüber den Lasten nach der EN 15804 die synthetischen Dämmstoffe über die angerechneten Einsparungen etwas; es verbleibt aufgrund der Einsparungen über die stoffliche Verwertung netto nur die Hälfte der großen Lasten aus der Bereitstellung der Rohstoffe beim Dämmstoff. Dieser Effekt wird durch die ebenso angerechneten anteiligen Lasten aus der endgültigen Beseitigung dieser Materialien aus fossilen Rohstoffen in der MVA aber deutlich geschmälert. Beim PU-Dämmstoff werden die Netto-Lasten ggf. unterschätzt, weil das zugegebene Diethylenglykol in den herangezogenen Datensätzen weniger Lasten verursacht als das dadurch zusätzlich produzierte RC-Polyol einspart. Weiterhin schneiden im Nettoergebnis die nass produzierten Holzfaserdämmplatten deutlich besser ab als nach EN 15804, wobei hierfür insbesondere die im Zuge der angerechneten endgültigen Beseitigung in der MVA produzierte Energie verantwortlich ist. Dasselbe gilt abgeschwächt für die trocken produzierten Holzfaserdämmplatten. Die Beseitigung dieser Dämmstoffe aus biogenem Material in der MVA verursacht im Gegensatz zu den synthetischen Dämmstoffen weniger treibhauswirksame Emissionen. Ebenso verbessern sich die Mineralschaumplatten durch die angerechnete Materialeinsparung im Porenbeton. Für den aus sekundären Rohstoffen produzierten Zellulosedämmstoff überwiegen hingegen die über die hälftig angelastete Bereitstellung der primären Rohstoffe hinzukommenden Lasten, weil für den größten Teil keine stoffliche Verwertung möglich ist, die eine Weiternutzung der Rohstoffe erlaubt, so dass eine Verschlechterung eintritt.

Am besten schneiden trotzdem wie nach den Ergebnissen der EN 15804 die Gruppe aus Zellulose-, Hanf-, Jute- und Holzfasereinblasdämmstoffen ab. Jutedämmstoffe befinden sich durch die stoffliche Verwertung in Formteilen in einer Kaskadennutzung, weil sie schon aus sekundären Rohstoffen hergestellt wurden. Zellulosedämmstoffe aus Altpapier müssen nur einen Teil der ursprünglichen Primärrohstoffbereitstellung tragen, obwohl sie größtenteils nicht stoffgleich verwertet werden können. Der Hanffaser wird nur ein kleiner Anteil aus der land-

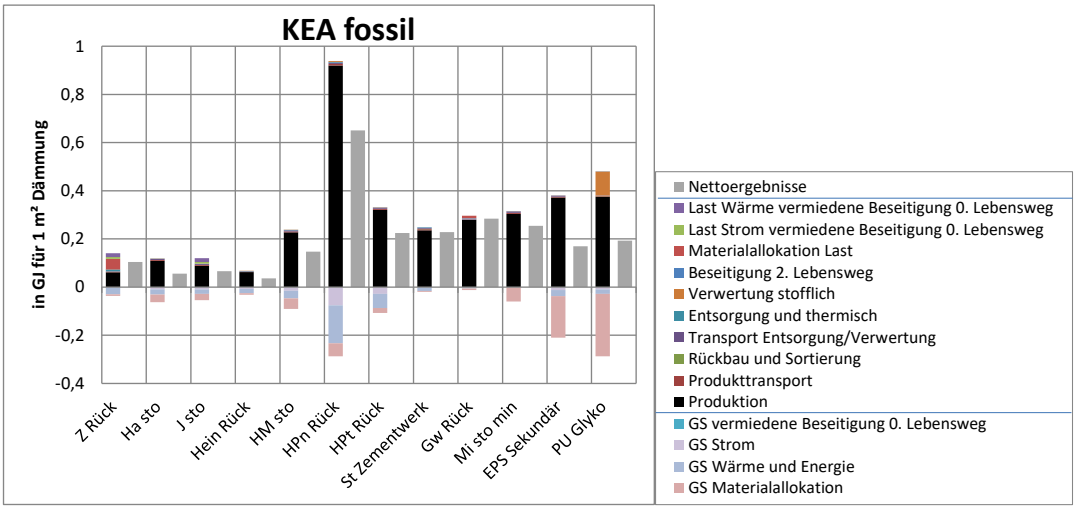
wirtschaftlichen Produktion angelastet, der im Falle der stofflichen Verwertung netto zur Hälfte beim Dämmstoff verbleibt. Mineralschaumplatten und nass produzierte Holzfaserdämmplatten bilden nach wie vor das Schlusslicht, aber rücken deutlich zu den anderen Dämmstoffen auf.



Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-18: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption

Im **fossilen kumulierten Energieaufwand** führt die angerechnete Einsparung über den Sektor „GS Materialallokation“ dazu, dass auch die synthetischen Dämmstoffe trotz des damit verbundenen Verbrauchs fossiler Rohstoffe anders als nach den Ergebnissen der EN 15804 relativ nicht schlechter abschneiden als im Treibhauseffekt (Abbildung 6-19). Es zeigt sich über diesen Sektor auch, dass bei der stofflichen Verwertung in Formteilen auch die synthetischen Stützfasern in Hanf- und Jutedämmstoffen sowie Holzmatten eingespart werden. Durch die stoffliche Verwertung werden diese fossilen Rohstoffe weitergegeben und dadurch nur anteilig durch die Dämmstoffe verbraucht. Mineralschaumplatten schneiden hier wie nach der EN 15804 relativ besser ab als im Treibhauseffekt. Sonst wird das Bild durch den Verbrauch bzw. die Einsparung und Verbrennung fossiler Energieressourcen bestimmt, die dann auch zu einem ähnlichen Bild im Treibhauseffekt führen.



Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

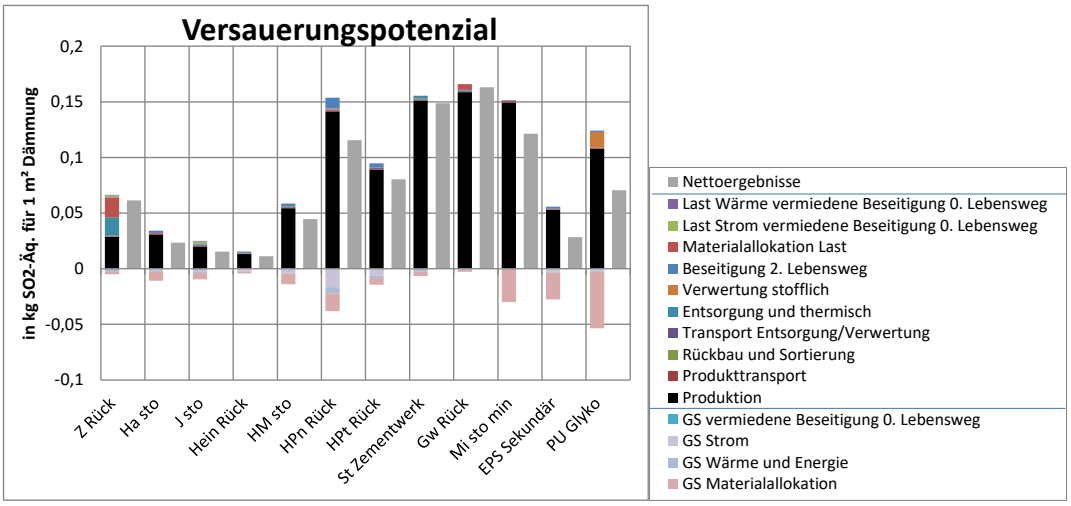
Abbildung 6-19: Ergebnisse für den fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption

Im **Versauerungspotenzial** (Abbildung 6-20) schneiden wie nach der EN 15804 die mineralischen Dämmstoffe aufgrund der Produktionslasten am schlechtesten ab. Über die stoffliche Verwertung lassen sich bei Mineralfaserplatten (Steinwolle) und Glaswolle hier nur die Rohstoffe und die mit deren Inhaltsstoffen verbundenen Emissionen einsparen, wohingegen der Großteil der diesbezüglichen Emissionen u.a. über den Energiebedarf und die Bindemittelbehandlung verursacht wird. Mit der Nutzung der Mineralschaumplatten bspw. in der Porenbetonproduktion wird das Vorschäumen der enthaltenen Rohstoffe eingespart und damit neben einem Teil des Zements auch ein Teil der Prozessenergie (Sektor „GS Materialallokation“). Dadurch ist eine gewisse Verringerung der Netto-Last möglich, so dass die Mineralschaumplatten hier besser abschneiden als nach der EN 15804.

Bei den nass produzierten Holzfaserdämmplatten führt die hälftig angerechnete endgültige Beseitigung der großen Dämmstoffmasse in der MVA zur Produktion einer großen Energiemenge und daher zu deutlichen Einsparungen im Versauerungspotenzial, die in den Sektoren „GS Strom“ und „GS Wärme und Energie“ zutage treten. Die vermiedene Feuerung schwefelhaltiger Kohle im Zuge der eingesparten Stromproduktion im aktuellen deutschen Energieträgermix ist bspw. mit höheren Beiträgen zum Versauerungspotenzial verbunden. Netto schneiden die nassen Holzfaserplatten daher dann deutlich besser ab als Mineralfaserplatten (Steinwolle) und Glaswolle. Die Lasten für die endgültige Beseitigung sind ebenso deutlich sichtbar, sind aber durch die gute Abgasreinigung in der MVA und die relativ schwefelarmen Holzfaserdämmplatten deutlich kleiner als die dadurch erzielten Einsparungen.

Bei den Lasten des Zellulosedämmstoffes fällt neben dem Sektor „Materialallokation Last“ aufgrund der hälftigen Anrechnung der Bereitstellung von Holzschliff aus dem vorangegangenen Lebensweg auch der Beitrag des Sektors „Entsorgung und thermisch“ auf. Dieser kommt aus dem Anteil von 97 % des Dämmstoffes, der nicht rückgeführt werden kann und über die Pyrolyse behandelt wird. Für die Pyrolyse sind Angaben zu den Konzentrationen im Abgas aus Versuchsbetrieben mit Papierfaserschlamm und Getreidespelzen angesetzt, die recht hoch ausfallen und wahrscheinlich reduziert werden können. Dadurch schneiden Zellulosedämmstoffe im Versauerungspotenzial hier schlechter ab als nach der EN 15804, weil dort eine Beseitigung in der MVA mit besserer Abgasreinigung als bester Entsorgungsweg betrachtet wird.

Insgesamt verbessert sich EPS wie nach der EN 15804 im Vergleich zum Treibhauseffekt und KEA fossil relativ gegenüber den anderen Dämmstoffen. Durch die Einsparung von Polyol im nachfolgenden System können PU-Dämmplatten einen Teil ihrer bezüglich des Versauerungspotenzials relativ großen Produktionslasten schmälern, so dass im Gegensatz zu den Ergebnissen nach der EN 15804 hier keine relative Verschlechterung der PU-Platten gegenüber den anderen Dämmstoffen eintritt.

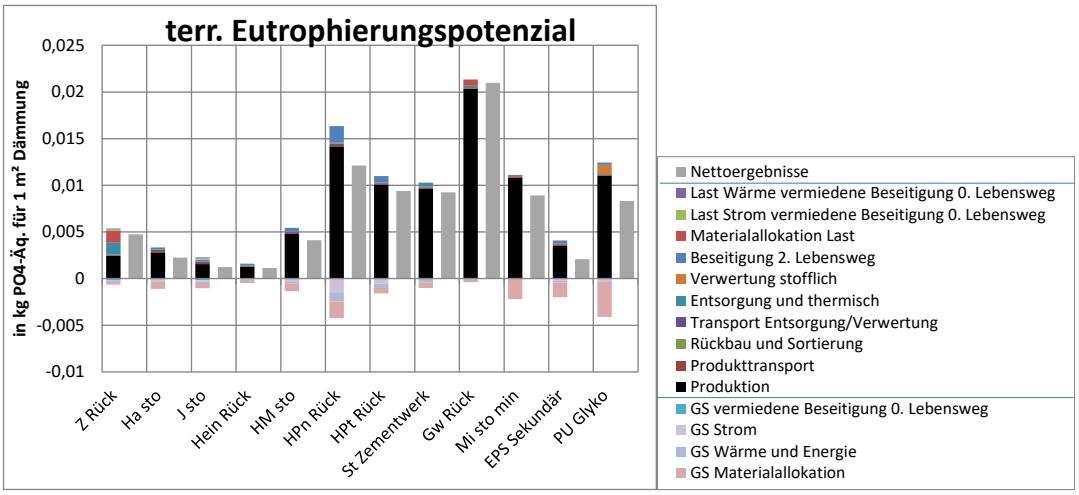


Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-20: Ergebnisse für das Versauerungspotenzial für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption

Das Bild im **terrestrischen Eutrophierungspotenzial** ähnelt wie in den Ergebnissen nach der EN 15804 denen des Versauerungspotenzials, weil oft NOx- und Ammoniakemissionen dominant sind, die in beiden Kategorien bewertet werden (Abbildung 6-21). Auch hier bleibt die Ausnahme bestehen, dass Mineralfaserplatten (Steinwolle) und Mineralschaumplatten relativ besser abschneiden, für die entsprechend neben NOx- und Ammonium-/Ammoniakemissionen andere versauernde Emissionen wie SO_2 und Säuren eine größere Rolle zu spielen scheinen. Glaswolle schneidet daher diesbezüglich am schlechtesten ab.

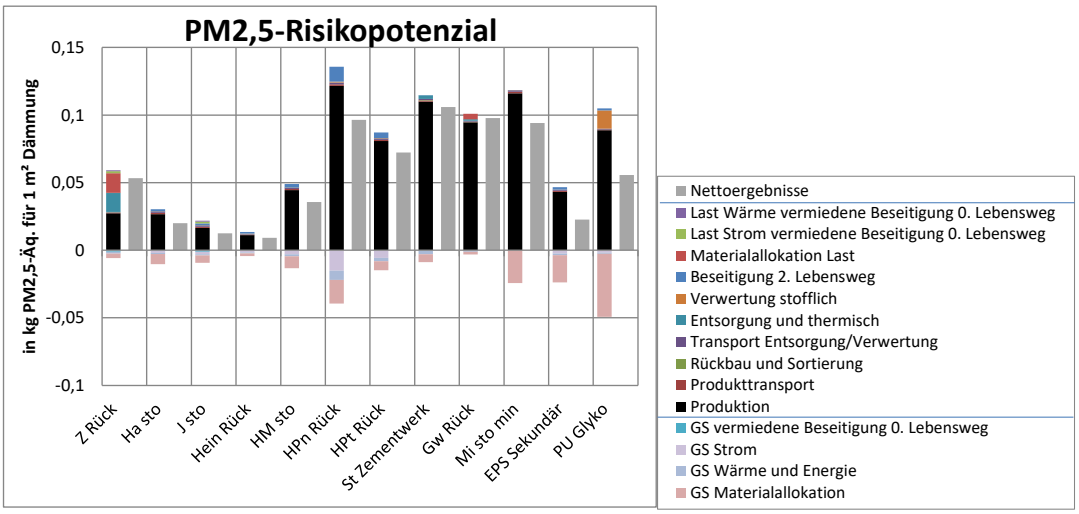
Die Einsparungen durch die Produktion von Energie in der MVA im Zuge der teilweise angerechneten endgültigen Beseitigung sind immer noch größer als die damit verbundenen Emissionen. Der Unterschied ist aber kleiner, weil die vermiedene Bereitstellung konventionellen Stroms im aktuellen Strommix diesbezüglich kein so großes Manko bspw. aufgrund der Kohleverfeuerung wie im Versauerungspotenzial hat. Die Zusammensetzung des Brennstoffes spielt hier eine kleinere Rolle und der Abreinigung in der MVA sind auch Grenzen gesetzt, so dass die Emissionen aus der MVA relativ größer ausfallen. Bei den Zellulosedämmstoffen fallen die Lasten aus der Pyrolyse und der hälftig angerechneten Bereitstellung von Holzschliff geringer aus als beim Versauerungspotenzial, da SO_2-Emissionen, die hier nicht bewertet werden, in diesen Prozessen eine größere Rolle spielen. Dementsprechend verschlechtern sich die Zellulosedämmstoffe in dieser Kategorie im Vergleich zur EN 15804 nicht so stark.



Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-21: Ergebnisse für das terrestrische Eutrophierungspotenzial für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption

Das Bild des **PM 2,5-Risikopotenzials** (Feinstaub) ähnelt dem des Versauerungspotenzials, weil NOx und SO_2 auch hier bewertet werden (Abbildung 6-22). Glaswolle schneidet hier demgegenüber besser und Mineralschaum schlechter ab. Die Staubentwicklung in der Produktion dürfte bei Mineralschaum- und Mineralfaserplatten entsprechend größer sein.



Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-22: Ergebnisse für das PM 2,5-Risikopotenzial (Feinstaub) für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption

Fazit

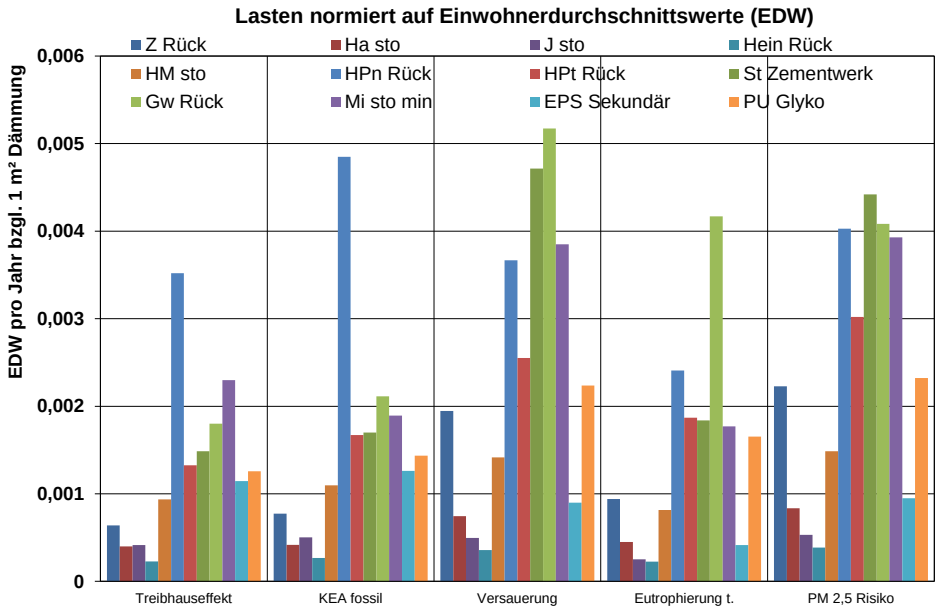
Wenn die eben betrachteten Indikatoren auf die jeweiligen pro-Kopf-Lasten normiert werden, ergeben sich jeweils die für jeden Indikator in Abbildung 6-23 gezeigten Werte für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe. Unter Berücksichtigung der ökologischen Bedeutung lassen sich folgende fünf Cluster finden, in welche die Dämmstoffe diesmal unter Berücksichtigung der Einsparpotenziale in Folgesystemen durch Verwertung einsortiert werden können, wenn jeweils die beste stoffliche Verwertungsoption gewählt wird:

1. Holzfasereinblasdämmung, Jute-, Hanfdämmstoff
2. Zelluloseeinblasdämmung, EPS, Holzmatten
3. PU-Dämmplatten, Holzplatten trocken hergestellt, Mineralfaserplatten (Steinwolle), Glaswolle, Mineralschaumplatten
4. Holzplatten nass hergestellt

Im Vergleich zu den Ergebnissen nach der EN 15804 verschlechtert sich der Zellulosedämmstoff, weil nur 3 % in die Produktion rückgeführt werden können und für den Rest nur die Pyrolyse verbleibt, die keine gleichgeartete stoffliche Nutzung der Rohstoffe in einem Folgeprodukt ermöglicht. Dadurch verbleibt die Hälfte der Lasten für die Bereitstellung des primären Rohstoffes Holzschliff beim Dämmstoff, obwohl dieser aus Altpapier produziert wird, weil die Lasten der Rohmaterialbereitstellung zwischen den vorangegangenen Produkten und dem Dämmstoff aufgeteilt werden.

Demgegenüber verbessern sich EPS und PU, weil durch die stoffliche Verwertung ein Rohstoff erzeugt werden kann, dessen Herstellung mit Lasten in Höhe beinahe der Dämmplattenproduktion verbunden wäre, so dass durch eine Aufteilung dieser Lasten aufgrund des Nutzens im nächsten Produkt eine entsprechende Einsparung erzielt werden kann. Dieser Effekt wird durch die hälftige Anlastung der endgültigen Beseitigung dieses Materials aus fossilen Rohstoffen in einer MVA etwas geschmälert.

Ebenso verbessern sich die Mineralschaumplatten, weil hier durch die stoffliche Verwertung in der Porenbetonproduktion neben den mineralischen Rohstoffen ein Teil des Zements und der Energie für das entfallende Vorschäumen als Nutzen angerechnet werden. Weiterhin verbessern sich die Holzfaserdämmplatten insbesondere im Treibhauseffekt, weil dem Nutzen der im Zuge der endgültigen Beseitigung in der MVA erzeugten Energie aufgrund des biogenen Materials nur geringe diesbezügliche Verbrennungslasten gegenüberstehen. Die endgültige Beseitigung in einem nächsten Lebensweg wird hälftig angerechnet. Der Nutzen aus der stofflichen Verwertung des Materials ist hier hingegen geringer, weil dadurch nur Holz in einem Folgesystem eingespart werden kann, dessen Bereitstellung im Vergleich zur Dämmplattenproduktion nur mit geringen Lasten verbunden ist.



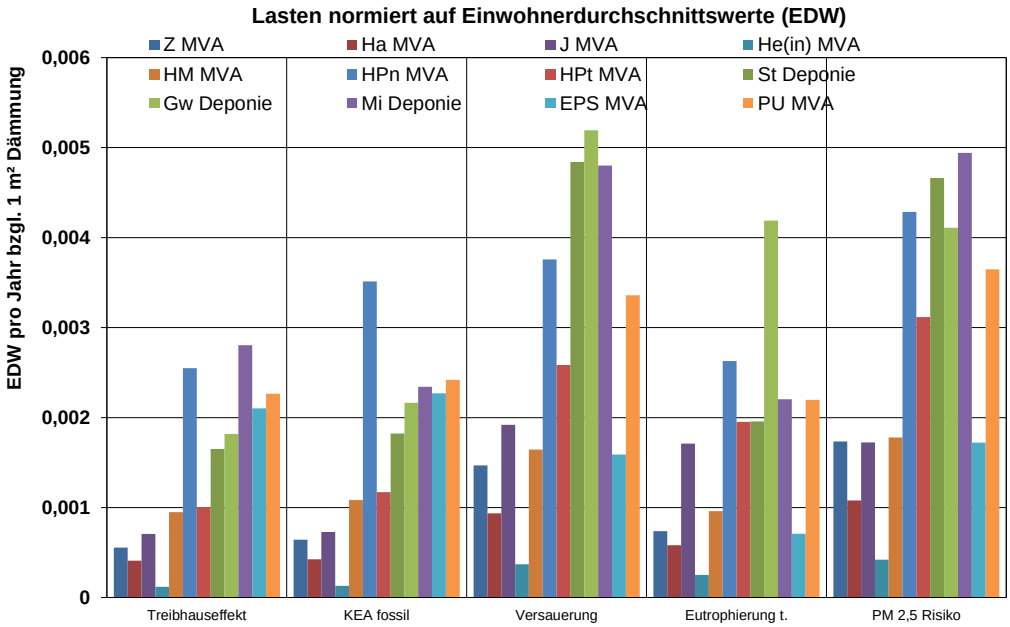
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 6-23: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Steildach nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen

Wenn statt der besten stofflichen Verwertungsoption am Lebenswegende eine Entsorgung wie im Status Quo stattfindet, verschlechtern sich insbesondere die synthetischen Dämmstoffe, weil dann der fossil gebundene Kohlenstoff in der MVA vollständig als Kohlendioxid freigesetzt wird (Abbildung 6-24). EPS-Platten sind dann im Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand schlechter als trocken produzierte Holzfaserdämmplatten und etwas schlechter als Mineralfaserplatten und Glaswollematten. Das stoffliche Einsparpotenzial, das auch bei Mineralschaumplatten groß ist, wird nicht genutzt. Bei Jutedämmstoffen, die aus alten Jutefasern produziert wird, verbleiben dann die Hälfte der Lasten aus der Bereitstellung der primären Jutefasern aus dem Vorprodukt im System.

Eine durchgehende Verbesserung dadurch tritt hingegen bei Zellulosedämmstoffen auf, weil dann die Pyrolyse durch die MVA mit geringeren Emissionen und dem Nutzen aus der Energiegewinnung ersetzt wird. Die Holzfasereinblasdämmung und die Holzplatten verbessern sich ebenso im Treibhauseffekt und KEA fossil. Der diesbezügliche Nutzen aus der stofflichen Verwertung durch die Einsparung von Holz fällt gegenüber dem Nutzen der Energie aus der Verbrennung dieser biogenen Materialien geringer aus, wobei die Lasten aus der Verbrennung entsprechend klein sind. Dies gilt aber nur dann, wenn der Strom über den bisherigen Energieträgermix und die Wärme über Gasheizungen bereitgestellt wird. Anders verhält es sich bei den Holzmatten und Hanfdämmstoffen, weil hier die stoffliche Verwertung in Formteilen über die Stützfaser Kunststoffe mit größeren Lasten einspart. Die Cluster verändern sich wie folgt:

1. Holzfasereinblasdämmung, Hanfdämmstoff
2. Zelluloseeinblasdämmung, Jutedämmstoff, Holzmatten
3. Holzplatten trocken hergestellt, EPS
4. Mineralfaserplatten (Steinwolle), Glaswolle, PU, Holzplatten nass hergestellt, Mineralschaumplatten



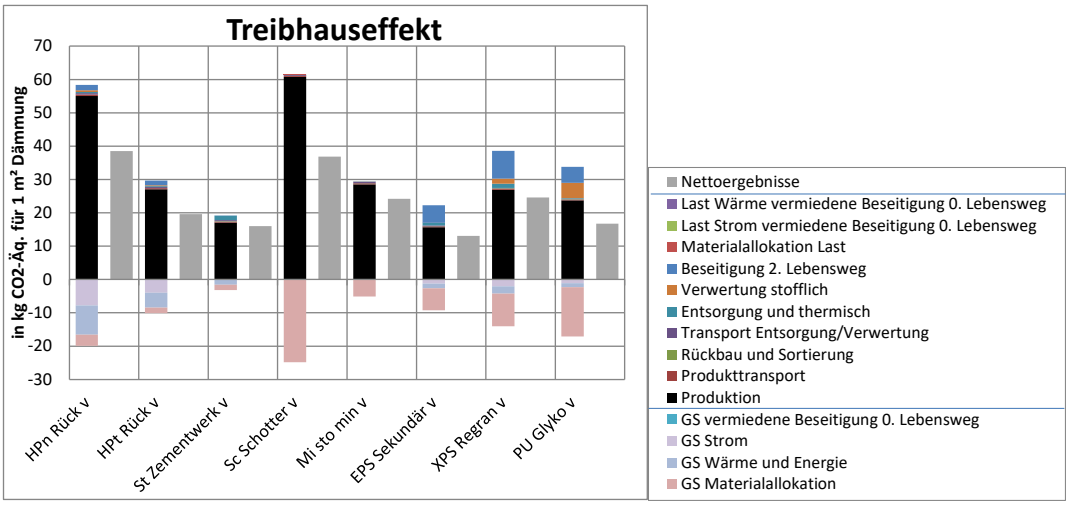
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 6-24: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Steildach nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo

Die nicht normierten Nettoergebnisse für die Außenwand in Tabellenform sind im Anhang (Kap. 8.5.2) in Tabelle 8-8 und Tabelle 8-9 dargestellt.

6.2.3 Ergebnisse für die Außenwand

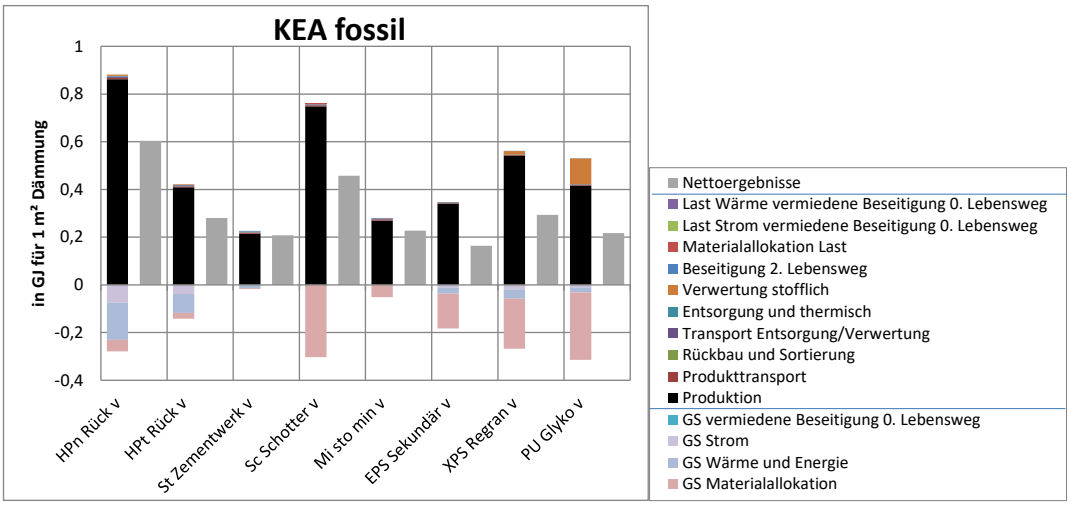
An der Außenwand werden wiederum nur die plattenförmigen Dämmstoffe in verklebter Form betrachtet und es kommen gegenüber dem Steildach Schaumglas- und XPS-Platten hinzu; die Ergebnisse im **Treibhauseffekt** sind in Abbildung 6-25 dargestellt. Die Ausführungen zum Steildach gelten analog, die Ergebnisse sind ähnlich. Zusätzlich ist die Beseitigung der Verluste, die durch die Verklebung auftreten, auf Lastenseite insbesondere bei den synthetischen Dämmstoffen über den Sektor „Entsorgung und thermisch“ gerade so zu sehen sowie auf Nutzenseite über die dabei gewonnene Energie. Hinzu kommen Schaumglas- und XPS-Platten. Die große Produktionslast der Schaumglasplatten lässt sich durch eine stoffliche Verwertung zu Schaumglasschotter deutlich reduzieren. Dadurch wird neben den Rohstoffen auch die Schaumglasschotterproduktion an sich eingespart, wobei dafür 80 % der Lasten der Schaumglasplattenproduktion angesetzt sind, was als Nutzen angerechnet wird. Aus den XPS-Platten kann über Regranulierung, deren Strombedarf im Sektor „Verwertung stofflich“ sichtbar wird, PS produziert werden, dessen Nutzen die Produktionslasten von PS und den XPS-Dämmplatten entsprechend deutlich reduzieren kann. Aufgrund der größeren Massen sind Lasten und Nutzen jeweils größer als bei den EPS-Platten.



Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-25: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption

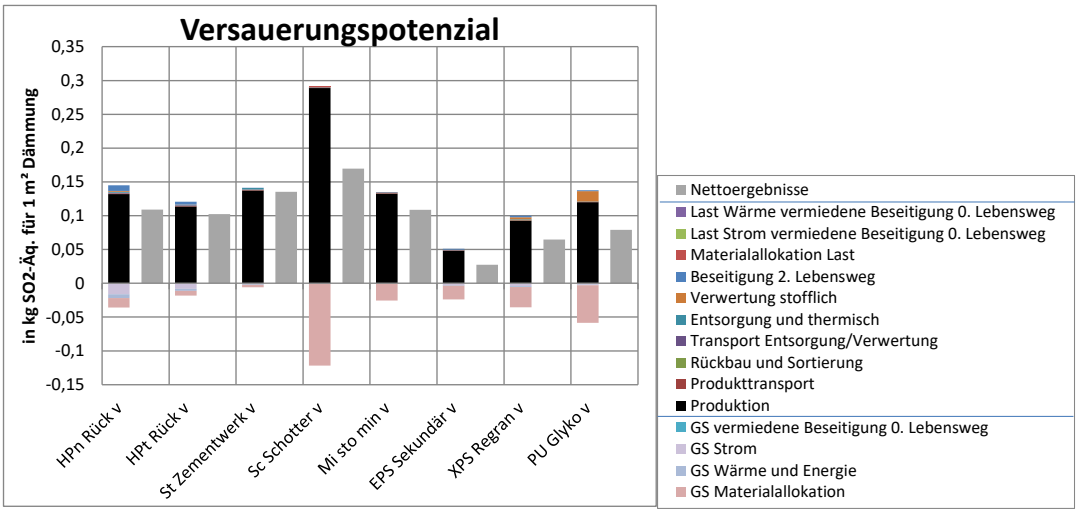
Auch im **fossilen kumulierten Energieaufwand** sortieren sich Schaumglas- und XPS-Platten ähnlich ein wie im Treibhauseffekt (Abbildung 6-26).



Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

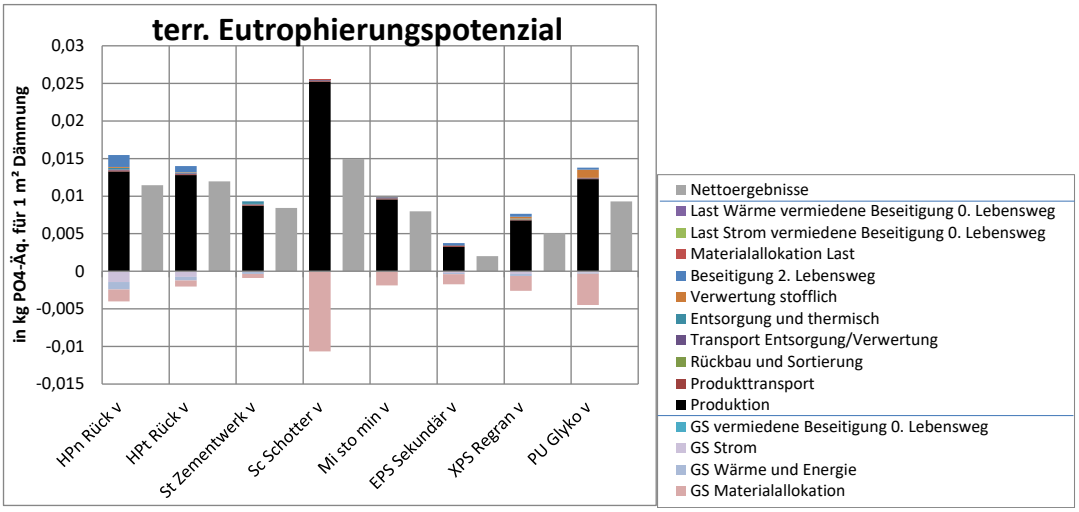
Abbildung 6-26: Ergebnisse für den fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA fossil) für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption

Im **Versauerungspotenzial** schneiden alle mineralischen Dämmstoffe schlechter ab (Abbildung 6-27), im **terrestrischen Eutrophierungspotenzial** dann nur noch Schaumglasplatten (Abbildung 6-28), wobei auch hier jeweils die Produktionslasten der Schaumglasplatten über die stoffliche Nutzung deutlich vermindert werden. Die Ergebnisse im **PM 2,5-Potenzials** (Feinstaub) ähneln wieder denen des Versauerungspotenzials (Abbildung 6-29).



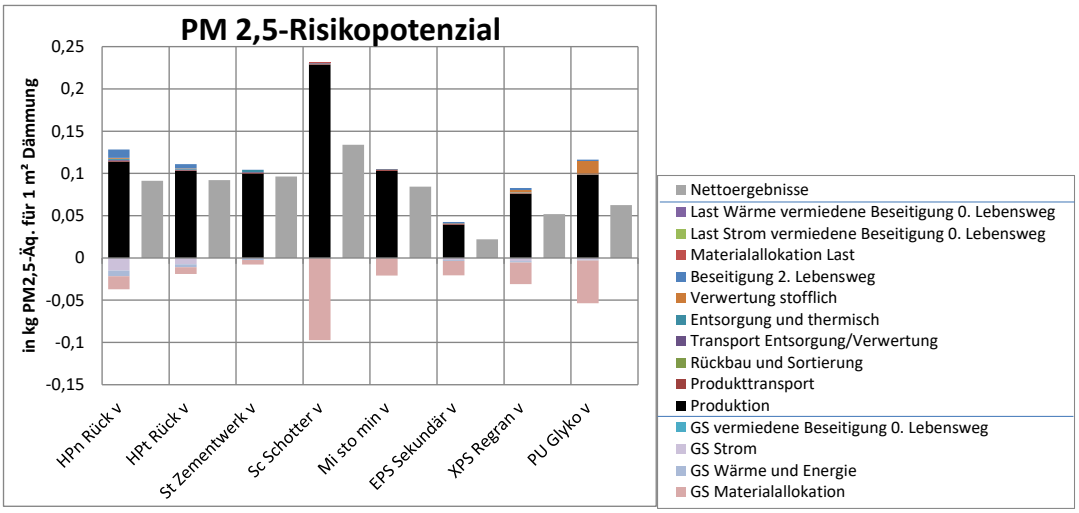
Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-27: Ergebnisse für das Versauerungspotenzial für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption



Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

Abbildung 6-28: Ergebnisse für das terrestrische Eutrophierungspotenzial für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption



Erläuterungsgrafik: Abbildung 6-17; Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1; Erklärungen zur Legende: Kapitel 4.4

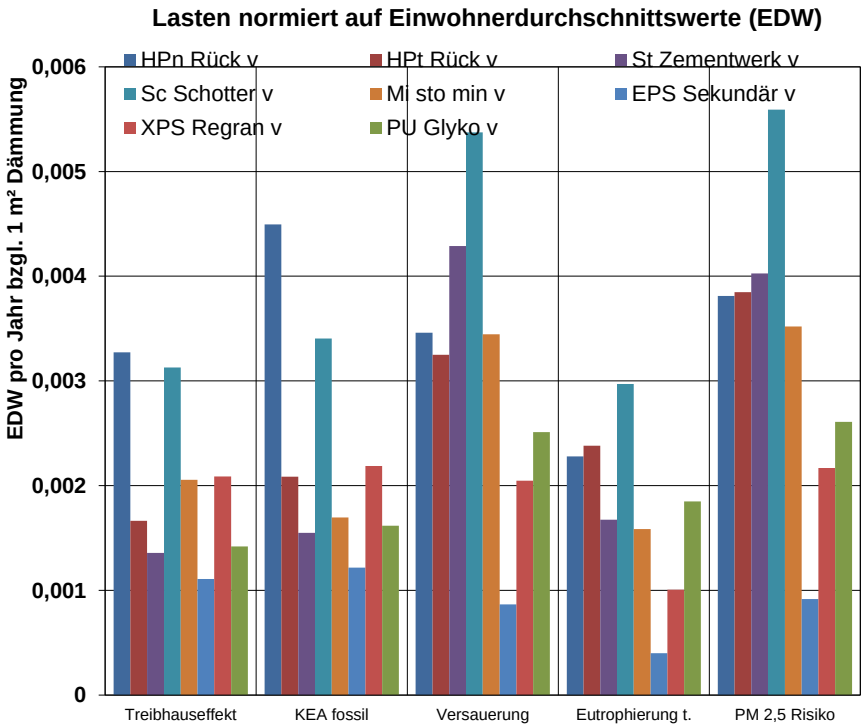
Abbildung 6-29: Ergebnisse für das PM 2,5-Potenzial (Feinstaub) für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption

Fazit

Nach der Normierung ergeben sich jeweils die für jeden Indikator in Abbildung 6-30 gezeigten Werte für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe. Analog zum Steildach lassen sich folgende Cluster finden, in welche die Dämmstoffe entsprechend ihrem Abschneiden einsortiert werden können:

1. EPS-Platten
2. PU-, XPS-, Mineralfaser- (Steinwolle), trocken produzierte Holzfaserdämmplatten, Mineralschaumplatten
3. Nass produzierte Holzfaserdämmplatten, Schaumglasplatten

Im Vergleich zu den Ergebnissen nach der EN 15804 verbessern sich alle Dämmstoffe, am stärksten Schaumglasplatten, weil durch die stoffliche Verwertung als Schaumglasschotter die Lasten der Schaumglasschotterproduktion eingespart werden können, und nasse Holzfaserdämmplatten. Weiterhin auch Mineralschaumplatten, weil hier durch den Einsatz in der Porenbetonproduktion dort neben Rohstoffen teilweise Zement und die Energie für das Vorschäumen eingespart wird.

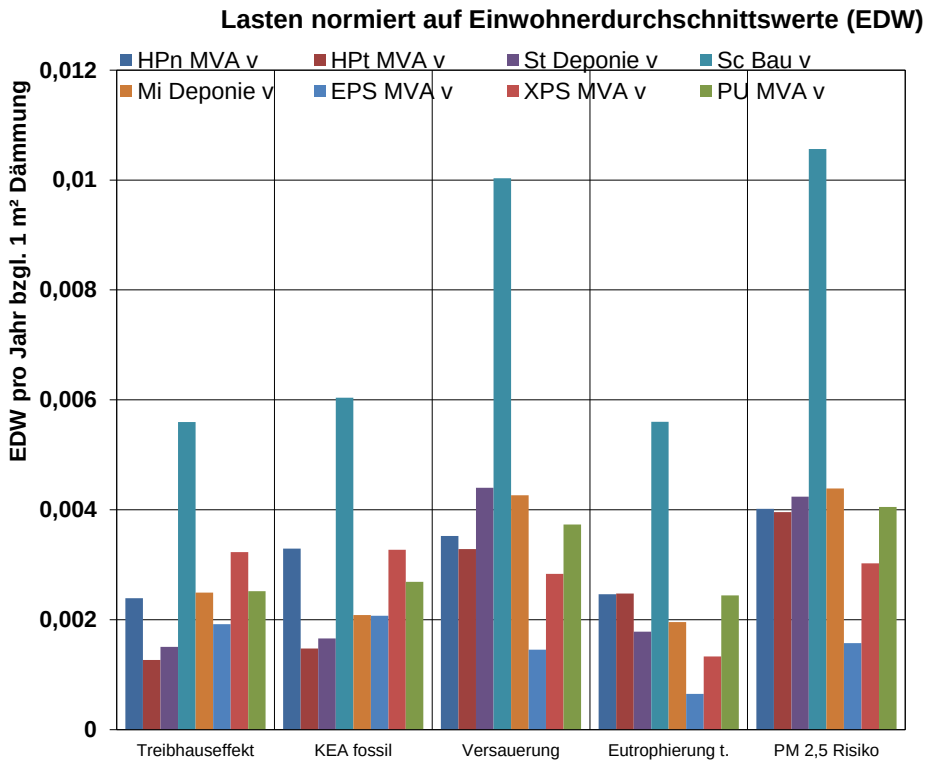


Betrachtete Dämmstoffe: Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 6-30: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen

Mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo statt der besten stofflichen Verwertungsoption verschlechtern sich insbesondere die Schaumglasplatten, weil das stoffliche Verwertungspotenzial dann nicht genutzt wird und damit kein Nutzen durch eingesparte Schaumglasschotterproduktion erzielt wird (Abbildung 6-31). Es bleiben die hohen Produktionslasten zurück. Auch bei den synthetischen Dämmstoffen ist die Verschlechterung groß, weil hier ebenso das große stoffliche Verwertungspotenzial dann nicht genutzt wird und noch zusätzliche Emissionen durch die dann voll anzurechnende Verbrennung dieser auf fossilen Rohstoffen basierenden Dämmstoffe angelastet werden. EPS-Platten sind dann im Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand etwas schlechter als trocken produzierte Holzfaserdämmplatten und Mineralfaserplatten. Eine Verbesserung tritt hingegen wieder bei den Holzfaserdämmplatten im Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand aufgrund der im Zuge der Verbrennung in der MVA erzeugten Energie auf, weil die über die stoffliche Verwertung von Holz erzielbaren Einsparungen demgegenüber gering sind. Dies gilt aber nur, solange der eingesparte Strom wie heute produziert wird bzw. die Wärme Gasheizungen einspart. Die Cluster verändern sich wie folgt:

1. Holzfaserdämmplatte trocken produziert, EPS-Platte
2. Mineralfaserplatte (Steinwolle), PU-, XPS-Platte, Holzplatte nass produziert, Mineralschaumplatte
3. Schaumglasplatte



Betrachtete Dämmstoffe: Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 6-31: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo

Die nicht normierten Nettoergebnisse für die Außenwand in Tabellenform sind im Anhang (Kap. 8.5.2) in Tabelle 8-10 und Tabelle 8-11 dargestellt.

6.2.4 Ergebnisse für die weiteren Bauteile

Die Ergebnisse der weiteren Bauteile ähneln dem des Steildaches und der Außenwand. In Tabelle 6-2 ist die daraus abgeleitete Reihenfolge der Dämmstoffe bezüglich der mit Dämmstoffen verbundenen ökologischen Lasten abzüglich des Nutzens dargestellt, wenn jeweils die beste stoffliche Verwertungsoption angesetzt ist. Bei den kursiv dargestellten Bauteilen beschränkt sich die Auswahl wieder auf die plattenförmigen Dämmstoffe, die dort verklebt eingebaut werden. Die zugehörigen auf die pro-Kopf-Lasten normierten Ergebnisse finden sich im Anhang (Kap. 8.7) in Abbildung 8-26 bis Abbildung 8-32.

Tabelle 6-2: Zusammenfassende bauteilabhängige Einordnung der Dämmstoffe mit dem jeweils nach dem 50:50-Ansatz besten stofflichem Verwertungsweg in Cluster, entsprechend der ökologischen Bewertung nach dem 50:50-Ansatz

Bauteil/Rang	**1**	**2**	**3**	**4**
Steildach	Hein, J, Ha	Z, EPS, HM	PU, HPt, St, Gw, Mi	HPn
Außenwand	EPS	PU, XPS, St, HPt, Mi	HPn, Sc	
Außenwand leicht	Hein, J, Ha	Z, EPS, HM	St, HPt, Gw, Mi	HPn
Flachdach leicht	Hein, J, Ha	Z, EPS, HM	PU, XPS, HPt, St, Gw, Mi	HPn, Sc
Flachdach schwer	EPS	PU, XPS, St, HPt, Mi	HPn, Sc	
O. Geschossdecke leicht	Hein, J, Ha	Z, EPS, HM	PU, XPS, St, HPt, Gw, Mi	HPn, Sc
O. Geschossdecke schwer	Hein	Z, EPS	PU, XPS, St, HPt, Mi	HPn, Sc
Kellerdecke unten	Hein, J, Ha	Z, EPS, HM	PU, XPS, St, HPt, Gw, Mi	HPn, Sc
Kellerwand außen	EPS	PU, XPS	Sc	

Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte

Wenn statt der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption eine Beseitigung stattfindet, stellt sich die Reihenfolge der Dämmstoffe entsprechend ihres ökologischen Abschneidens wie in Tabelle 6-3 gezeigt dar. Die zugehörigen auf die pro-Kopf-Lasten normierten Ergebnisse finden sich im Anhang (Kap. 8.7) in Abbildung 8-33 bis Abbildung 8-39

Tabelle 6-3: Zusammenfassende bauteilabhängige Einordnung der Dämmstoffe mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo in Cluster, entsprechend der ökologischen Bewertung nach dem 50:50-Ansatz

Bauteil/Rang	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Steildach	Hein, Ha	Z, J, HM	HPt, EPS	St, Gw, PU, HPn, Mi	
Außenwand	HPt, EPS,	St, PU, XPS, HPn, Mi	Sc		
Außenwand leicht	Hein, Ha	Z, J, HM	HPt, EPS	St, GW, HPn, Mi	
Flachdach leicht	Hein, Ha	Z, J, HM	HPt, EPS	St, GW, HPn, PU, XPS, Mi	Sc
Flachdach schwer	HPt, EPS,	St, PU, XPS, HPn, Mi	Sc		
O. Geschossdecke leicht	Hein, Ha	Z, J, HM	HPt, EPS	St, Gw, PU, HPn, XPS, Mi	Sc
O. Geschossdecke schwer	Hein	Z	HPt, EPS	St, PU, HPn, XPS, Mi	Sc
Kellerdecke unten	Hein, Ha	Z, J, HM	HPt, EPS	St, Gw, PU, HPn, XPS, Mi	Sc
Kellerwand außen	EPS	PU, XPS	Sc		

Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte

Relativ bauteilunabhängig und sowohl mit bester Verwertungsoption als auch Entsorgung wie im Status Quo schneiden Holzfasereinblasdämmung und Hanf- sowie Jutematten am besten ab. Darauf folgen Zelluloseeinblasdämmstoff, EPS-Platten und Holzmatten. Im Falle einer Entsorgung wie im Status Quo rutschen die EPS-Platten aber ins nächste Cluster. Darauf folgen PU-Platten, trocken produzierte Holzplatten, Mineralfaserplatten, XPS-Platten und Glaswollematten, wobei im Falle einer Beseitigung nur die trocken produzierten Holzplatten in diesem Cluster verbleiben und die anderen sich verschlechtern. Darauf folgen Mineralschaumplatten, die im Falle einer Entsorgung wie im Status Quo auch um ein Cluster abrutschen. Darauf folgen nass produzierte Holzfaserdämmplatten und Schaumglasplatten, wobei Letztere im Falle einer Entsorgung wie im Status Quo um ein Cluster abrutschen. Im Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand schneiden EPS-Platten bei einer Entsorgung wie im Status Quo schlechter als trocken produzierte Holzfaserdämmplatten und auch etwas schlechter ab als Mineralfaserplatten und teilweise Glaswollematten.

Die Bewertungsergebnisse ähneln demnach denen der EN 15804, wobei trocken produzierte Holzfaserdämmplatten nach dem 50:50-Ansatz besser eingestuft werden. Dasselbe gilt für Schaumglasplatten. Wie schon bei der Interpretation der Ergebnisse nach der EN 15804 erwähnt, wird hier noch nicht berücksichtigt, dass manche Dämmstoffe neben dem Dämm- noch einen erweiterten Nutzen haben. Schaumglasplatten haben einen solchen erweiterten Nutzen, weil sie voll belast- und nicht durchwurzelbar sind und sich daher besonders für anspruchsvolle Spezialanwendungen wie die Perimeterdämmung oder die Flachdach-Umkehrdämmung eignen. Dadurch sind sie nur eingeschränkt über den Dämmnutzen direkt mit den anderen Dämmstoffen vergleichbar.

7 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

In dieser Studie werden mehr oder weniger gängige Dämmstoffe aus ökologischer Sicht unter Einbezug des ganzen Lebensweges inkl. der Entsorgung am Lebensende in verschiedenen Bauteilen miteinander verglichen. Der Vergleich umfasst Dämmstoffe

- aus nachwachsenden Rohstoffen (Zelluloseeinblas-, Holzeinblasdämmstoff, Jutedämm-, Hanfdämmmatte, Holzdämmmatte, jeweils nass und trocken produzierte Holzfaserdämmplatte),
- mineralische (Mineralfaserplatte (Steinwolle), Glaswollematte, Mineralschaum-, Schaumglasplatte) und
- synthetische Dämmstoffe (EPS-, XPS-, PU-Platte).

Sowohl für die Zelluloseeinblasdämmung als auch für die Jutedämmung wird angenommen, dass der zur Produktion notwendige Rohstoff aus dem Materialkreislauf entnommen werden kann. Die für die Produktion von Hanfdämmplatten benötigten Hanffasern sind landwirtschaftliche Nebenprodukte einer Produktion von Lebensmitteln und haben damit faktisch auch keine Umweltlasten aus der Rohstoffbereitstellung. Diese Rahmenbedingungen beeinflussen wesentlich die Ergebnisse der ökologischen Bewertung.

Da bislang noch kaum Dämmstoffe zur Entsorgung anfallen, liegen diesbezüglich nur sehr wenige Erfahrungen vor. Daher werden in einem ersten Schritt mögliche Entsorgungswege mit dem dafür zu treibenden Aufwand recherchiert. Im Ergebnis lassen sich für alle Dämmstoffe auch stoffliche Verwertungswege finden, wobei bei Holzfasereinblasdämmstoffen und Holzfaserdämmplatten die rohstoffliche Verwertung in Holzwerkstoffen in der Praxis noch nicht stattfindet. Die Rückführung in die Dämmstoffproduktion wird mit Verschnittresten insbesondere bei mineralischen und synthetischen Dämmstoffen bereits heute durchgeführt. Um diese stofflichen Entsorgungswege auch für Dämmstoffe aus dem Rückbau zugänglich zu machen, müssen die Dämmstoffe entsprechend sauber vorliegen.

In Bauteilen, in denen die Dämmstoffe lose oder nur mechanisch befestigt sind, ist dies ohne Aufwand und weitere Aufreinigung möglich. Wenn eine Verklebung wie an der Außenwand, dem schweren Flachdach und der Kellerwand außen stattfindet, ist mit dem Rückbau wie mit der Aufreinigung ein geringer energetischer Aufwand verbunden. Dabei treten zudem geringe Verluste auf, die beseitigt werden müssen. In der ökologischen Bewertung sind die dadurch bewirkten Effekte in Summe aber nur von geringer Bedeutung.

Die funktionelle Einheit ist die Dämmung von 1 m² Bauteil mit jeweils derselben Dämmwirkung. Dafür werden der winterliche Kälte- und der sommerliche Wärmeschutz betrachtet. Ausschlaggebend ist der winterliche Kälteschutz. Über die jeweils ermittelte Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe und die Dichte werden die Dämmstoffmassen ermittelt, die jeweils für jedes Bauteil benötigt werden. Diese dienen als Referenzflüsse für den ökologischen Vergleich.

In einem ersten Schritt werden die eruierten Entsorgungswege aus ökologischer Sicht miteinander verglichen. Dazu werden Abfallökobilanzen erstellt, die die Lasten der Abfallaufbereitung und den Nutzen durch die dadurch erzeugten Sekundärprodukte bzw. Energie über die jeweils mit deren konventioneller Bereitstellung verbundenen Lasten quantifizieren und gegenüberstellen. Die Produktionslasten werden dabei ausgeklammert.

Es zeigt sich, dass die stoffliche Verwertung in vielen Fällen gut abschneidet, auch wenn bei vielen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen die energetische Verwertung in Zementwerken im Treibhauseffekt noch besser abschneidet. Dies liegt daran, dass die energetische Verwertung von Abfallmassen dort bislang die Zufeuerung von Kohle substituiert. Insbesondere die stoffliche Verwertung von Schaumglasplatten zu Schaumglasschotter spart einen, hier als groß angesetzten, Teil der hohen Produktionslasten ein. Ebenso kann durch den Einsatz von Mineralschaumplatten in der Porenbetonindustrie ein Teil der Produktionslasten eingespart werden. Bei den anderen mineralischen Dämmstoffen ist die erzielbare Einsparung geringer, aber eine Deponierung kann dadurch vermieden werden. Bei den synthetischen Dämmstoffen ist die stoffliche Verwertung von besonderem Vorteil, weil dadurch die Bereitstellung der Basischemikalien, die mit hohen spezifischen Lasten verbunden sind, eingespart wird. Gleichzeitig wird eine Verbrennung dieser auf fossilen Rohstoffen basierenden Dämmstoffe vermieden.

Im nächsten Schritt werden die Produktionslasten im Zuge einer Produktökobilanz nach der EN 15804 mit einbezogen. In dem dieser Methodik zugrundeliegenden Cut-Off-Ansatz wird der Nutzen, der mit der Entsorgung generiert wird, nur informatorisch ausgewiesen und nicht angerechnet. Dafür ist die Produktionslast für Dämmstoffe, die aus sekundären Rohstoffen bestehen, entsprechend niedrig, weil diese nur die Lasten für die Aufbereitung des Altmaterials umfassen. Wenn eine stoffliche Verwertung erfolgt, werden dem Dämmstoff keine Lasten aus einer Beseitigung angerechnet, was einen Vorteil insbesondere für synthetische Dämmstoffe darstellt. Es werden nun die Entsorgungswege, die nach der EN 15804 am besten abschneiden, und die Entsorgungswege des Status Quo betrachtet und die Dämmstoffe auf dieser Basis in den einzelnen Bauteilen miteinander verglichen.

Im Ergebnis über alle betrachteten Umwelt-Wirkungskategorien und Indikatoren schneiden die Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen in Einblas- oder Mattenform bauteilunabhängig am besten ab. Bei den plattenförmigen Dämmstoffen, die für Außenwand, schweres Flachdach und die Kellerwand außen benötigt werden, sind, wenn eine stoffliche Verwertung stattfindet, die EPS-Platten demnach die vorteilhafteste Option. EPS kann in der Kellerwand außen und im schweren Flachdach jeweils in Einzelfällen (z.B. Umkehrdach) nicht eingesetzt werden. Es folgt eine Gruppe aus allen weiteren betrachteten Dämmstoffen in Platten- und Mattenform. Schlechter schneiden nasse Holzfaserdämmplatten ab. Schlusslicht sind Schaumglasplatten, die aber aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften in speziellen Anwendungen wie Perimeterdämmung (Kellerwand außen) oder der Flachdach-Umkehrdämmung Vorteile aufweisen, die in der Ökobilanz nicht erfasst werden können. Wenn die Entsorgung auch zukünftig wie im Status-Quo stattfindet bzw. die Dämmstoffe auch für die endgültige Beseitigung aufkommen müssen, verschlechtern sich die synthetischen Dämmstoffe etwas. EPS-Platten haben dann im Treibhauseffekt und fossilem kumulierten Energieaufwand schlechtere Werte als Mineralfaserplatten (Steinwolle), Glaswollematten und in manchen Bauteilen auch als trocken produzierte Holzfaserdämmplatten.

In einem weiteren Schritt wird nun der Nutzen, der mit der Entsorgung dieser Dämmstoffe verbunden ist, in der Produktökobilanz über den 50:50-Ansatz mit einbezogen. Dadurch schneiden alle Dämmstoffe, die aus primären Rohstoffen bestehen, besser ab, weil der Nutzen, den das Material in nachfolgenden Systemen stiftet, hälftig angerechnet wird. Bei Dämmstoffen aus sekundären Rohstoffen werden hingegen, wenn keine stoffliche Verwertung in Anwendungen mit demselben Rohstoffnutzen erfolgt, dementsprechend die Lasten aus der Bereitstellung der primären Rohstoffe im Vorprodukt angelastet. Dadurch verschlechtern sich die Beseitigungs- und nicht stoffgleichen Verwertungsoptionen der Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen. Gleichzeitig wird die endgültige Beseitigung, die im Falle der stofflichen Verwertung in einem anderen Lebensweg stattfindet, hälftig mit angerechnet, so dass die synthetischen Dämmstoffe in jedem Fall einen Teil der Emissionen und des Nutzens aus der Verbrennung der fossilen Rohstoffe tragen. Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen tragen im Falle der Beseitigung entsprechend nur die Hälfte der Lasten und des Nutzens daraus. Lasten und Nutzen aus der energetischen Verwertung werden allgemein jeweils nur zur Hälfte angerechnet. Zukünftig soll eine stoffliche Verwertung stattfinden und der diesbezügliche Nutzen soll abgebildet werden. Daher werden nun die jeweils besten stofflichen Verwertungswege nach dem 50:50-Ansatz ausgewählt und die Dämmstoffe auf dieser Basis in den einzelnen Bauteilen miteinander verglichen, um eine Empfehlung aus ökologischer Sicht abzuleiten. Zusätzlich wird in der diesbezüglichen Ableitung auch berücksichtigt, wie sich die Bewertung verändert, wenn

die Dämmstoffe weiterhin wie im Status Quo entsorgt werden bzw. ihre Produktionslasten und die endgültige Beseitigung des Materials voll tragen. Der energetische Nutzen aus der Verbrennung der Dämmstoffe wird über den aktuellen deutschen Netzstrommix bzw. Wärme aus Gasheizungen quantifiziert.

Im Ergebnis aller betrachteten Umwelt-Wirkungskategorien und Indikatoren schneiden ähnlich wie nach der EN 15804 wiederum relativ bauteilunabhängig Holzfasereinblasdämmung und Hanf- sowie Jutematten am besten ab. Dies gilt auch, wenn eine Entsorgung dieser wie im Status Quo (Beseitigung in der MVA) statt der jeweils besten stofflichen Verwertung stattfindet. Darauf folgen Zelluloseeinblasdämmstoff, EPS-Platten und Holzmatten. Bei Bauteilen, in welchen plattenförmige Dämmplatten benötigt werden, ist auch hiernach EPS die vorteilhafteste Wahl, wenn dieses stofflich verwertet wird, so dass in einer anderen Anwendung diese EPS-Kügelchen eingespart werden, und wenn EPS im Bauteil einsetzbar ist. Falls aber eine Entsorgung wie im Status Quo stattfindet (Beseitigung in der MVA), rutschen die EPS-Platten in der Bewertung ab und sind dann genauso wie trocken produzierte Holzfaserdämmplatten zu bewerten, die sich verbessern.
Darauf folgen die weiteren Dämmstoffe in Platten- und Mattenform. Danach folgen nass produzierte Holzfaserdämmplatten und Schaumglasplatten. Im Falle jeweils einer Entsorgung wie im Status Quo sind die nass produzierten Holzfaserdämmplatten aber nicht schlechter als die o.g. weiteren Dämmstoffe in Platten- und Mattenform zu bewerten und EPS-Platten haben dann im Treibhauseffekt und fossilem kumulierten Energieaufwand schlechtere Werte als trocken produzierte Holzfaserdämmplatten und etwas schlechtere auch als Mineralfaserplatten (Steinwolle) und teilweise Glaswollematten. Sowohl nass produzierte Holzfaserdämmplatten als auch Schaumglasplatten verbessern sich gegenüber den Ergebnissen der EN 15804.

Fazit

Geht man davon aus, dass neben einer stofflichen Verwertung auch zukünftig Teilmassen beseitigt werden, ergeben sich folgende Schlussfolgerungen in Summe über alle betrachteten Umwelt-Wirkungskategorien und Indikatoren hinweg:

Es lassen sich relative Vorteile für die Einblas- und Matten-Dämmstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen ableiten. Bei Zellulose- und Jutedämmstoffen gilt dies nur, wenn genügend sekundäre Rohstoffe zur Verfügung stehen, bei Hanfdämmstoffen dann, wenn genügend Hanffasern als Restbiomasse zur Verfügung stehen und somit kaum Lasten aus der landwirtschaftlichen Produktion tragen müssen.

Bei den plattenförmigen Dämmstoffen, die an der Außenwand, dem schweren Flachdach und der Kellerwand außen ausschließlich verbaut werden können, sind in Summe leichte Vorteile für EPS-Platten und in manchen Bauteilen auch für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten sichtbar, wenn bei Letzteren der energetische Nutzen aus der Beseitigung angerechnet wird. EPS kann in der Kellerwand außen und im schweren Flachdach jeweils in Einzelfällen (z.B. Umkehrdach) nicht eingesetzt werden. Bei den EPS-Platten haben die Form der stofflichen Verwertung und die damit erzielbaren Einsparungen, die hier hoch angesetzt sind, einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis. Im Falle einer Entsorgung wie im Status Quo haben EPS-Platten dann im Treibhauseffekt und fossilem kumulierten Energieaufwand je nach Anrechnung des energetischen Nutzens (etwas) schlechtere Werte auch als Mineralfaserplatten (Steinwolle) und teilweise Glaswollematten. Wenn alle Dämmstoffe tatsächlich stofflich verwertet werden, verschwinden die in Summe teilweisen leichten Vorteile für die trocken produzierten Holzfaserdämmplatten, was auch dann gilt, wenn der energetische Nutzen aus der Beseitigung nicht angerechnet wird. Der (zukünftige) energetische Nutzen aus der Beseitigung wird ggf. überschätzt, weil dafür u.a. der aktuelle deutsche Netzstrommix zugrunde gelegt wird. In Summe leichte Nachteile zeigen sich für nass produzierte Holzfaserdämmplatten. Schaumglasplatten schneiden am schlechtesten ab, haben aber aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften in speziellen Anwendungen Vorteile, die in der Ökobilanz nicht erfasst werden können.

Neben der Produktion hat durchaus die Entsorgung einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Die stoffliche Verwertung der Dämmstoffe mittels Rückführung in die Produktion oder als Sekundärrohstoffe wird in der Praxis erst vereinzelt oder zu Forschungszwecken praktiziert. Die Ergebnisse aus ökologischer Sicht

zeigen, dass die stoffliche Verwertung in vielen Fällen ökologisch vorteilhaft ist und die diesbezügliche Forschung und Praxis in der Industrie vorangetrieben werden sollte.
Im Falle von mineralischen Dämmstoffen kann durch ein Recycling auch Deponieraum eingespart werden. Bei synthetischen Dämmstoffen können dadurch die fossilen Rohstoffe im Kreiskauf gehalten werden, so dass Kohlendioxidemissionen vermieden werden.
Mit der weiteren Umstellung der Energiebereitstellung in Zementwerken und der Energiewende werden die über die energetische Verwertung erzielbaren Nutzen immer kleiner, so dass die stoffliche Verwertung weiter in den Vordergrund rückt.

Für die ökologische Bewertung der stofflichen Verwertungswege ergeben sich Unsicherheiten, weil dafür entsprechend Abschätzungen zu eingesparter Prozessenergie und den durch die Sekundärrohstoffe eingesparten Rohstoffen und Produkten getroffen werden mussten. Einige stoffliche Verwertungswege existieren so in der Praxis noch nicht, so dass die Zukunft zeigen muss, ob die hier vorgenommenen Annahmen zutreffen. Besonders starke Auswirkungen haben diese Annahmen bei den synthetischen Dämmstoffen sowie den Mineralschaum- und Schaumglasplatten, weil hier die durch die stoffliche Verwertung erzielbaren Einsparungen relativ groß ausfallen. Neue Erkenntnisse zu den Dämmstoffen und den Entsorgungswegen sollten genutzt werden, um die Ökobilanzen zu aktualisieren.

Die angesetzten Produktionsdaten bilden die aktuell schlechteren Fälle ab und sind als entsprechend konservativ zu bewerten. Mit Produktionsdaten aus anderen Datenbanken und auch anderen Produktionsstandorten können insbesondere für energieintensive Prozesse andere Gesamtergebnisse als oben benannt herauskommen. Für Dämmstoffe aus sekundären Rohstoffen und Restbiomassen würde die Bewertung hingegen schlechter ausfallen, wenn diese Rohstoffe nicht zur Verfügung stehen. Die zugehörigen Daten müssen daher in zukünftigen Untersuchungen jeweils auf die neuen Randbedingungen angepasst werden. In dieser Studie wird die Strombereitstellung einheitlich für alle Dämmstoffe mit dem aktuellen europäischen Energieträgermix (ENTSO-E) abgebildet.

Die ökologische Bewertung stößt im Falle der Schaumglasplatten an ihre Grenzen, weil Schaumglasplatten durch ihre Trittfestigkeit und dadurch, dass sie nicht durchwurzelbar und absolut wasserundurchlässig sind, spezielle Vorteile in bestimmten Anwendungen wie der Perimeterdämmung und der Flachdach-Umkehrdämmung aufweisen, die in der Ökobilanz nicht abgebildet werden können.

Literaturverzeichnis

[ABEB 2013]: ABEB AG Energiebilanzen e.V.: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2013.

[Albrecht & Schwitalla 2015]: Albrecht, W.; Schwitalla, C.: Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung; Fraunhofer IRB Verlag (Hrsg.); im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); Stuttgart, 2015.

[Baunetzwissen, 2019]: Baunetzwissen: Spezifische Wärmekapazität, 2019, online unter: https://www.baunetzwissen.de/glossar/s/spezifische-waermekapazitaet-4408417, zuletzt aufgerufen am 25.11.19.

[Dehoust et al. 2016]: Dehoust, G.; Möck, A.; Merz, C.; Gebhardt, P. (2016): Umweltpotenziale der getrennten Erfassung und des Recyclings von Wertstoffen im Dualen System. Öko-Institut. Berlin.

[Destatis 2018]: Statistisches Bundesamt (Destatis): https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/MaterialEnergiefluesse/Tabellen/MaterialEnergiefluesse.html; online abgerufen im September 2018.

[Doka 2007]: Doka, G.: Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services; EMPA, Doka Life Cycle Assessments; ecoinvent report No. 13; Dübendorf, December 2007.

[ecoinvent]: The ecoinvent Database; Version 3.4 und 3.6.

[EN 15804 2018]: Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products; German and English version EN 15804:2012+A1:2013/prA2:2018

[EPD DRW 2018]: UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach /ISO 14025/ und /EN 15804/: ROCKWOOL Steinwolle-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich DEUTSCHE ROCKWOOLGmbH & Co. KG; Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU); 2018.

[EPD GLP 2017]: UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach /ISO 14025/ und /EN 15804/ : GLAPOR Schaumglas GLAPOR Werk Mitterteich GmbH; Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU); 2017.

[EPD DRW 2018]: UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach /ISO 14025/ und /EN 15804/: ROCKWOOL Steinwolle-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich DEUTSCHE ROCKWOOLGmbH & Co. KG; Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU); 2018.

[EPD GLP 2017]: UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach /ISO 14025/ und /EN 15804/ : GLAPOR Schaumglas GLAPOR Werk Mitterteich GmbH; Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU); 2017.

[Franck 2005]: Franck, R. R.: Bast and other plant fibres; Woodhead Publishing Limited (Hrsg.); Cambridge, England, 2005.

[GaBi]: GaBi LCI Data Extension Databases.

[Ghaffar & Fan 2013]: Ghaffar, S. H.; Fan, M.: Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw; School of Engineering and Design, Brunel University; 19.7.2013.

[Graubner & Clanget-Hulin 2013]: Graubner, C.-A.; Clanget-Hulin, M.: Analyse der Trennbarkeit von Materialschichten hybrider Außenbauteile bei Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen - Erstellung einer praxisnahen Datenbank für die Nachhaltigkeitsbeurteilung; Fraunhofer IRB Verlag (Hrsg.); im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); Stuttgart, 2013.

[IBO]: Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH

[Hlawatsch, Küstermann, Krop 2018]: Hlawatsch,F.; Küstermann, R.; Krop, J.: Grobe Rezyklat-Körnungen aus Porenbetonbruch in geschäumten Mauerwerkselementen – eine nachhaltige Verwertungsstrategie; erschienen in: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen – Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH; Neuruppin 2018.

[Ökobaudat]: Ökobaudat – Informationsportal Nachhaltiges Bauen; Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat; https://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html.

[PEF 2016]: Product Environmental Footprint Category Rules Guidance – Version 6.3 – May 2018.

[Singh & Chandel 2018]: Singh, O. V.; Chandel, A. K.: Sutstainable Biotechnology - Enzymatic Resources of Renewable Energy; Springer (Hrsg.); 2018.

[Steico 2016]: Verarbeitungshinweise STEICOprotect / STEICOprotect dry; Stand 12/2016.

[UBA 1999]: Umweltbundesamt: Bewertung in Ökobilanzen; UBA-Texte 92/99 (1999); Berlin.

[UBA 2013]: Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (Luft) (Dezember 2013); Dessau.

[UBA 2014a]: Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (Luft) (Dezember 2013); Dessau.

[UBA 2014b]: Umweltbundesamt: National Trend Tables for the German Atmospheric Emission Reporting (POP) (Januar 2014); Dessau.

[Vogdt & Fischer et al. 2019]: Vogdt, F. U.; Fischer, D.; Schaudienst, F.; Schober,M.: LifeCycle KMF Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen; Fraunhofer IRB Verlag (Hrsg.); im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) geförderte Forschungsarbeit; Stuttgart, 2019.

[Vollprecht & Sattler et. Al 2019]: Vollprecht,D.; Sattler, T.; Doschek-Held, K.; Galler, R.; Schimek, J.; Kasper, T.; Daul, J.; Pomberger, R.: Innovative Deponierung sowie Recycling von Mineralwolleabfällen im Bergversatz, in der Zement- und in der Mineralwolleindustrie; erschienen in: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen – Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH; Neuruppin 2019.

[Welter 2008]: Welter, M.: Fachbericht Wirtschaftlich und umweltverträglich dämmen; PITTSBURGH CORNING (Schweiz) AG; 2008.

8 Anhang

8.1 Vergleich der Entsorgungswege nach verschiedenen Methoden

Tabelle 8-1: Ergebnisse der Entsorgungswege für die jeweiligen Dämmstoffe im Treibhauseffekt (kg CO_2-Äq.) nach Abfallökobilanz, EN 15804 und 50:50; Bezug: 1 m² Dämmung Flachdach, leicht

	Z MVA	Z Zement	Z HKW	Z Pyrolyse		Z Rück
Zellulose Abfallökobilanz	-3,92	-13,8	-6,35	-3,96		-4,27
Zellulose EN15804	6,47	6,58	7,10	7,35		12,2
Zellulose 5050	8,52	5,78	9,50	10,0		9,81
	Ha MVA	Ha Zement	Ha HKW		Ha stofflich	Ha Rück
Hanf Abfallökobilanz	-3,50	-15,9	-6,56		-3,83	-3,73
Hanf EN15804	11,7	11,8	12,4		10,3	10,3
Hanf 5050	6,09	1,90	6,59		5,92	5,98
	J MVA	J Zement	J HKW		J stofflich	J Rück
Jute Abfallökobilanz	-3,35	-15,0	-6,21		-11,5	-11,4
Jute EN15804	9,18	9,29	9,88		7,98	7,98
Jute 5050	10,93	7,06	11,43		6,40	6,45
	Hein MVA	Hein Zement	Hein HKW	Hein Pyrolyse	Hein stofflich	Hein Rück
Holzfasereinblas Abfallökobilanz	-3,95	-14,6	-6,56	-3,39	-0,49	-0,64
Holzfasereinblas EN15804	6,45	6,25	7,02	7,11	6,27	6,27
Holzfasereinblas 5050	1,81	-1,33	2,69	3,58	3,55	3,47
	HM MVA	HM Zement	HM HKW		HM stofflich	HM Rück
Holzmatten Abfallökobilanz	-4,73	-23,3	-9,26		-5,15	-5,14
Holzmatten EN15804	21,6	21,2	22,6		18,8	18,8
Holzmatten 5050	13,5	6,89	13,9		13,3	13,3
	HPn MVA	HPn Zement	HPn HKW		HPn stofflich	HPn Rück
Holzplatten nass Abfallökobilanz	-36,2	-129	-59,1		-6,94	-7,85
Holzplatten nass EN15804	78,8	79,8	84,4		74,8	74,8
Holzplatten nass 5050	37,2	9,71	44,6		51,9	51,4
	HPt MVA	HPt Zement	HPt HKW		HPt stofflich	HPt Rück
Holzplatten trocken Abfallökobilanz	-14,9	-57,5	-25,4		-3,00	-3,41
Holzplatten trocken EN15804	37,1	37,5	39,6		33,7	33,7
Holzplatten trocken 5050	17,9	4,50	20,5		23,9	23,7

	St Deponie	St Zement				St Rück
Mineralfaserplatte Abfallökobilanz	0,49	-4,95				-3,91
Mineralfaserplatte EN15804	26,1	30,5				30,4
Mineralfaserplatte 5050	26,1	23,5				24,0
	Gw Deponie	Gw Zement				Gw Rück
Glaswolle Abfallökobilanz	0,56	0,13				0,04
Glaswolle EN15804	28,1	29,7				29,7
Glaswolle 5050	29,0	28,8				28,7
	Sc Bau		Sc Schall	Sc Schotter	Sc Leicht	Sc Rueck
Schaumglasplatte Abfallökobilanz	0,46		-25,6	-85,2	-3,18	-61,07
Schaumglasplatte EN15804	87,5		87,6	87,6	87,6	87,9
Schaumglasplatte 5050	93,8		80,8	51,0	92,0	63,0
	Mi Deponie			Mi stofflich mineralisch	Mi stofflich Leichtbau.	Mi Rück
Mineralschaumplatte Abfallökobilanz	0,58			-14,3	-3,07	-11,9
Mineralschaumplatte EN15804	41,3			41,3	41,3	41,3
Mineralschaumplatte 5050	41,3			33,9	39,5	35,1
	EPS MVA	EPS Zement	EPS CreaSolv®	EPS Sekundär	EPS Regranulierung	EPS Rück
EPS Abfallökobilanz	9,28	-5,78	-12,8	-19,4	-15,5	-19,4
EPS EN15804	38,5	38,7	27,5	22,7	25,0	22,7
EPS 5050	31,6	19,6	20,4	17,2	19,1	17,2
	XPS MVA	XPS Zement	XPS CreaSolv®		XPS Regranulierung	XPS Rück
XPS Abfallökobilanz	16,6	-9,94	-22,1	#NV	-26,8	-26,9
XPS EN15804	70,2	70,5	51,1	#NV	46,8	46,8
XPS 5050	58,1	36,6	38,2	#NV	36,0	35,9
	PU MVA	PU Zement	PU Glykolyse	PU Sekundär		
PU Abfallökobilanz	8,38	-6,30	-30,6	-27,8		
PU EN15804	50,5	50,6	49,6	35,7		
PU 5050	43,8	32,5	24,3	25,7		

Tabelle 8-2: Ergebnisse der Entsorgungswege für die jeweiligen Dämmstoffe im Versauerungspotenzial (kg SO_2-Äq.) nach Abfallökobilanz, EN 15804 und 50:50

	Z MVA	Z Zement	Z HKW	Z Pyrolyse		Z Rück
Zellulose Abfallökobilanz	-0,0023	-0,0044	-0,0018	0,017		0,014
Zellulose EN15804	0,041	0,054	0,048	0,061		0,060
Zellulose 5050	0,060	0,061	0,062	0,082		0,080
	Ha MVA	Ha Zement	Ha HKW		Ha stofflich	Ha Rück
Hanf Abfallökobilanz	-0,0029	-0,0056	-0,0032		-0,018	-0,018
Hanf EN15804	0,045	0,060	0,051		0,042	0,042
Hanf 5050	0,037	0,038	0,039		0,030	0,030
	J MVA	J Zement	J HKW		J stofflich	J Rück
Jute Abfallökobilanz	-0,0027	-0,0052	-0,0031		-0,12	-0,12
Jute EN15804	0,031	0,046	0,038		0,029	0,029
Jute 5050	0,080	0,080	0,081		0,021	0,021
	Hein MVA	Hein Zement	Hein HKW	Hein Pyrolyse	Hein stofflich	Hein Rück
Holzfasereinblas Abfallökobilanz	-0,0022	-0,0047	0,0055	0,0064	-0,0033	-0,0035
Holzfasereinblas EN15804	0,021	0,034	0,035	0,025	0,018	0,018
Holzfasereinblas 5050	0,015	0,015	0,021	0,024	0,015	0,014
	HM MVA	HM Zement	HM HKW		HM stofflich	HM Rück
Holzmatten Abfallökobilanz	-0,0040	-0,0084	0,012		-0,021	-0,021
Holzmatten EN15804	0,073	0,095	0,099		0,068	0,068
Holzmatten 5050	0,063	0,063	0,073		0,054	0,054
	HPn MVA	HPn Zement	HPn HKW		HPn stofflich	HPn Rück
Holzplatten nass Abfallökobilanz	-0,029	-0,049	-0,038		-0,034	-0,036
Holzplatten nass EN15804	0,20	0,32	0,25		0,18	0,18
Holzplatten nass 5050	0,15	0,15	0,16		0,14	0,14
	HPt MVA	HPt Zement	HPt HKW		HPt stofflich	HPt Rück
Holzplatten trocken Abfallökobilanz	-0,013	-0,022	-0,017		-0,015	-0,016
Holzplatten trocken EN15804	0,15	0,20	0,17		0,14	0,14
Holzplatten trocken 5050	0,12	0,13	0,13		0,12	0,12
	St Deponie	St Zement				St Rück
Mineralfaserplatte Abfallökobilanz	0,0012	-0,010				-0,010
Mineralfaserplatte EN15804	0,20	0,21				0,21
Mineralfaserplatte 5050	0,20	0,20				0,20
	Gw Deponie	Gw Zement				Gw Rück
Glaswolle Abfallökobilanz	0,0012	0,00010				-0,00058

Glaswolle EN15804	0,22	0,22				0,22
Glaswolle 5050	0,22	0,22				0,22
	Sc Bau		Sc Schall	Sc Schotter	Sc Leicht	Sc Rueck
Schaumglasplatte Abfall-lökobilanz	0,00037		-0,15	-0,43	-0,022	-0,32
Schaumglasplatte EN15804	0,41		0,41	0,41	0,41	0,42
Schaumglasplatte 5050	0,45		0,38	0,23	0,44	0,29
	Mi Deponie			Mi stofflich mineralisch	Mi stofflich Leichtbau.	Mi Rück
Mineralschaumplatte Abfall-lökobilanz	0,0013			-0,074	-0,021	-0,061
Mineralschaumplatte EN15804	0,19			0,19	0,19	0,19
Mineralschaumplatte 5050	0,19			0,15	0,18	0,16
	EPS MVA	EPS Zement	EPS CreaSolv®	EPS Sekundär	EPS Regranulierung	EPS Rück
EPS Abfallökobilanz	-0,0043	-0,0071	-0,046	-0,060	-0,050	-0,060
EPS EN15804	0,07	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07
EPS 5050	0,06	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04
	XPS MVA	XPS Zement	XPS CreaSolv®		XPS Regranulierung	XPS Rück
XPS Abfallökobilanz	-0,0064	-0,013	-0,079		-0,088	-0,088
XPS EN15804	0,15	0,18	0,16		0,15	0,15
XPS 5050	0,14	0,14	0,10		0,096	0,096
	PU MVA	PU Zement	PU Glykolyse	PU Sekundär		
PU Abfallökobilanz	-0,0040	-0,0063	-0,12	-0,14		
PU EN15804	0,18	0,20	0,22	0,18		
PU 5050	0,17	0,18	0,12	0,11		

8.2 Treibhauseffekt mit biogenen Kohlenstoffflüssen

8.2.1 EN 15804

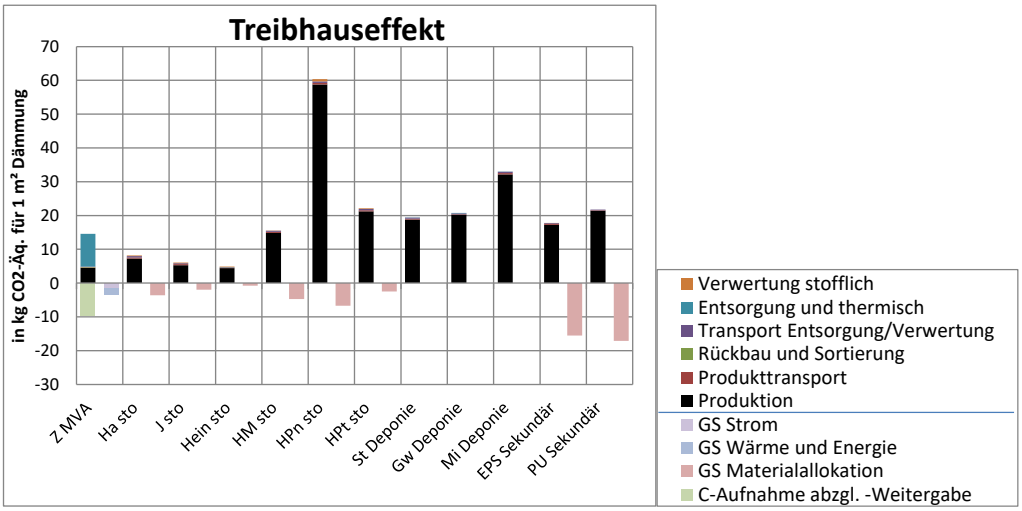


Abbildung 8-1: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen; Betrachtung auch der biogenen Kohlendioxidemissionen

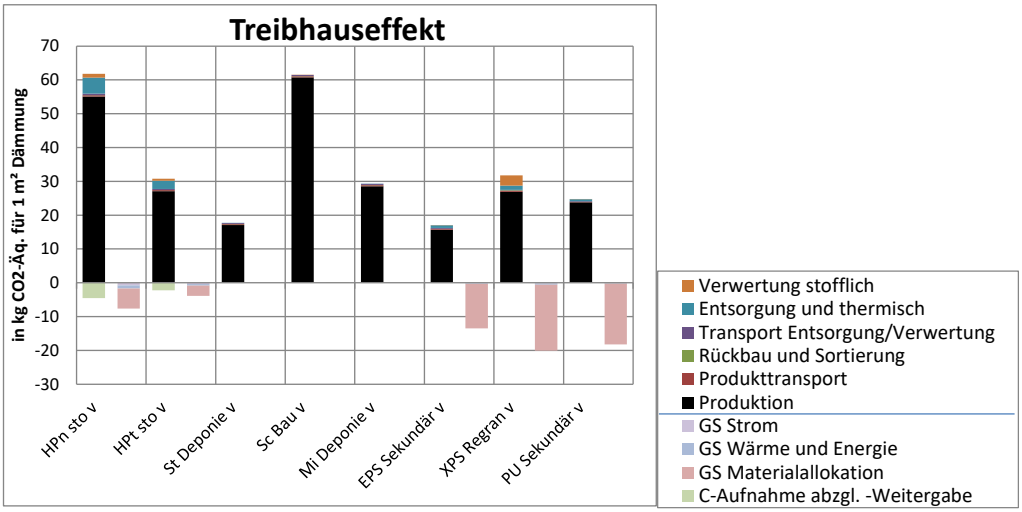


Abbildung 8-2: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen; Betrachtung auch der biogenen Kohlendioxidemissionen

8.2.2 50:50-Ansatz

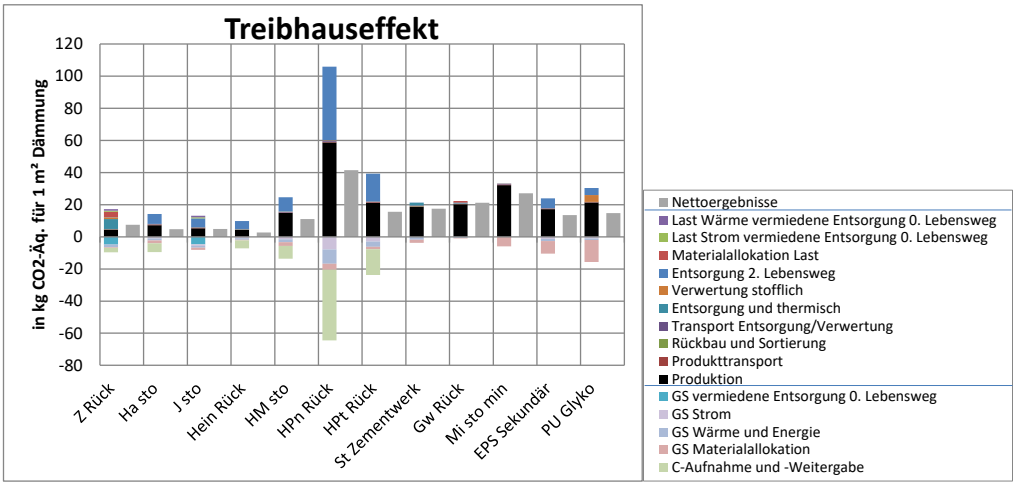


Abbildung 8-3: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die im Steildach betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption; Betrachtung auch der biogenen Kohlendioxidemissionen

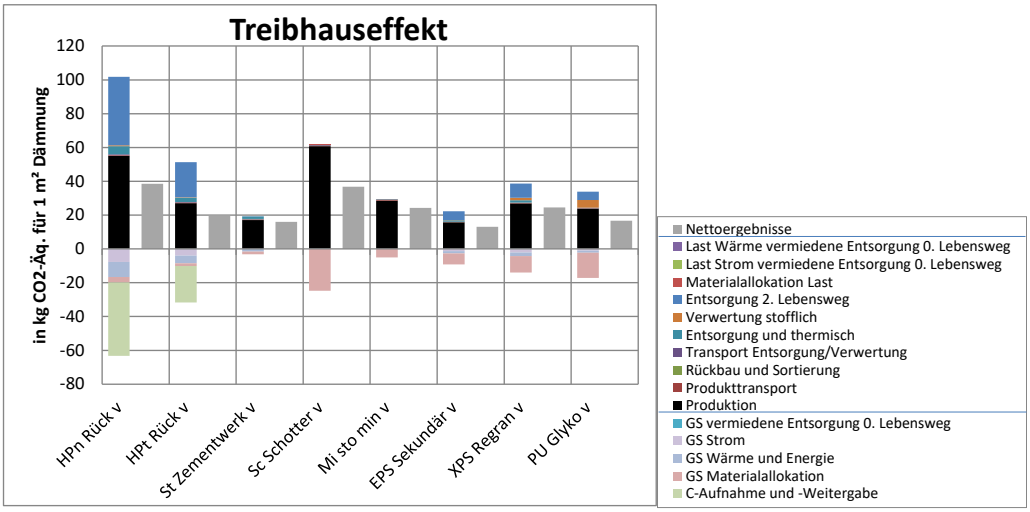


Abbildung 8-4: Ergebnisse für den Treibhauseffekt für die an der Außenwand betrachteten Dämmstoffe nach dem 50:50-Ansatz mit der jeweils besten stofflichen Verwertungsoption; Betrachtung auch der biogenen Kohlendioxidemissionen

8.3 Nutzen aus den Entsorgungswegen und deren Anrechnung in den betrachteten Methoden

Tabelle 8-3: Angesetzter Nutzen aus den verschiedenen Entsorgungs- und Verwertungswege und dessen Anrechnung in den betrachteten Methoden; Quellen der benutzten Datensätze zur Abbildung des Nutzens in Klammern; FSM = Flammschutzmittel; NaWaRo = aus nachwachsenden Rohstoffen

Dämmstoff - Entsorgungs- bzw. Verwertungsvariante: Angesetzter Nutzen	**Nutzen nach Abfallökobilanz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach EN 15804, nur separat informatorisch ausgewiesen; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach erweitertem 50:50-Ansatz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern** ***Bei Dämmstoffen aus Sekundärmaterialien Lasten für ursprüngliches Primärmaterial kursiv***
NaWaRo und synthetische Dämmstoffe MVA	Strom als aktueller deutscher Netzstrommix, Wärme als Gasheizung (ifeu)	Aktueller deutscher Netzstrommix, Gasheizung (ifeu)	Strom als aktueller deutscher Netzstrommix, Wärme als Gasheizung (ifeu) *Lasten im Falle Dämmstoffe aus Sekundärmaterial: 50 % des Sekundärmaterials als Primärmaterial (IBO, EI 3.4) abzüglich 50 % der Lasten des Sekundärmaterials (IBO)*
NaWaRo und synthetische Dämmstoffe Zementwerk	Wärme als Steinkohleverbrennung (ifeu)	Wärme als Steinkohleverbrennung (ifeu)	50 % der Wärme als Steinkohleverbrennung (ifeu) *Lasten im Falle Dämmstoffe aus Sekundärmaterial: 50 % des Sekundärmaterials als Primärmaterial (IBO, EI 3.4) abzüglich 50 % der Lasten des Sekundärmaterials (IBO)*
NaWaRo Dämmstoffe Biomasse-HKW	Strom als aktueller deutscher Netzstrommix, Wärme als Gasheizung (ifeu)	Strom als aktueller deutscher Netzstrommix, Wärme als Gasheizung (ifeu)	50 % des Stroms als aktueller deutscher Netzstrommix, 50 % der Wärme als Gasheizung (ifeu) *Lasten im Falle Dämmstoffe aus Sekundärmaterial: 50 % des Sekundärmaterials als Primärmaterial (IBO, EI 3.4) abzüglich 50 % der Lasten des Sekundärmaterials (IBO)*
Zellulose + Holzeinblasdämmstoff Pyrolyse (*100 % Sekundärmaterial = Altpapier*)	1/5 des FSM als FSM (IBO), C-Senke	1/5 des FSM als FSM (IBO), / (C-Senke nicht anrechenbar)	50 % von 1/5 des FSM als FSM (IBO), 50 % der C-Senke. *Lasten: 50 % der Zellulose als Holzschliff (EI 3.4) abzüglich 50 % der Altpapierlasten (IBO)*
Zellulose Rückführung in Produktion (*100 % Sekundärmaterial = Altpa-*	Zellulose als Holzschliff (ecoInvent 3.4), FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom als	Zellulose nicht angerechnet (sekundär), FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom nur	50 % der Zellulose als Altpapier (EI 3.4), 50 % des FSM als FSM (IBO), 50 % des eingesparten

Dämmstoff - Entsorgungs- bzw. Verwertungsvariante: Angesetzter Nutzen	**Nutzen nach Abfallökobilanz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach EN 15804, nur separat informatorisch ausgewiesen; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach erweitertem 50:50-Ansatz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern** ***Bei Dämmstoffen aus Sekundärmaterialien Lasten für ursprüngliches Primärmaterial kursiv***
pier)	ENTSO-E-Strom (EI 3.4)	für FSM-Anteil als ENTSO-E-Strom (EI 3.4)	Prozessstroms als ENTSO-E-Strom (EI 3.4)
Hanf stofflich	Hanf und FSM als Hanf, Stützfasern als Stützfasern (IBO)	Hanf und FSM als Hanf, Stützfasern als Stützfasern (IBO)	50 % des Hanf und FSM als Hanf, 50 % der Stützfasern als Stützfasern (IBO)
Hanf Rückführung in Produktion	Hanf und Stützfasern als Hanf, FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	Hanf und Stützfasern als Hanf, FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	50 % des Hanf und der Stützfasern als Hanf, 50 % des FSM als FSM (IBO), 50 % des eingesparten Prozessstroms bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)
Jute stofflich (*100 % Sekundärmaterial = Sekundärjute*)	Jute und FSM als Jute, Stützfasern als Stützfasern (IBO)	Jute nicht angerechnet (Sekundär) und FSM als Sekundärjute, Stützfasern als Stützfasern (IBO)	50 % der Jute und des FSM als Sekundärjute, 50 % der Stützfasern als Stützfasern (IBO)
Jute Rückführung in Produktion (*100 % Sekundärmaterial = Sekundärjute*)	jute und Stützfasern als Jute, FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	Jute nicht angerechnet (Sekundär) und Stützfasern als Sekundärjute, FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme nur für Stützfaser- und FSM-Anteil als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	50 % der Jute und der Stützfasern als Sekundärjute, 50 % des FSM als FSM (IBO), 50 % des eingesparten Prozessstroms bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)
Holzfasereinblasdämmung stofflich	Holz und FSM als Holz (EI 3.4)	Holz und FSM als Holz (EI 3.4)	50 des Holzes und FSM als Holz (EI 3.4)
Holzfasereinblasdämmung Rückführung in Produktion	Holz als Holz (EI 3.4), FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	Holz als Holz (EI 3.4), FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	50 % des Holzes als Holz (EI 3.4), 50 % des FSM als FSM (IBO), 50 % des eingesparten Prozessstroms bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)
Holzfasermatten stofflich	Holz und FSM als Holz (EI 3.4), Stützfasern als Stützfasern (EI 3.4, IBO)	Holz und FSM als Holz (EI 3.4), Stützfasern als Stützfasern (EI 3.4, IBO)	50 % des Holzes und FSM als Holz (EI 3.4), 50 % der Alt-Stützfasern als Stützfasern (EI 3.4, IBO)
Holzfasermatten Rückführung in Produktion	Holz und Stützfasern als Holz (EI 3.4), FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	Holz und Stützfasern als Holz (EI 3.4), FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	50 % des Holzes und Stützfasern als Holz (EI 3.4), 50 % des FSM als FSM (IBO), 50 % des eingesparten Prozessstroms bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw.

Dämmstoff - Entsorgungs- bzw. Verwertungsvariante: Angesetzter Nutzen	**Nutzen nach Abfallökobilanz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach EN 15804, nur separat informatorisch ausgewiesen; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach erweitertem 50:50-Ansatz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern** ***Bei Dämmstoffen aus Sekundärmaterialien Lasten für ursprüngliches Primärmaterial kursiv***
			Erdgaskessel (EI 3.4)
Holzplatten stofflich und Rückführung in Produktion	Holz und Bindemittel als Holz (EI 3.4), Rückführung zusätzlich: eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	Holz und Bindemittel als Holz (EI 3.4), Rückführung zusätzlich: eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	50 % des Holzes und Bindemittels als Holz (EI 3.4), Rückführung zusätzlich: 50 % des eingesparten Prozessstroms bzw. –wärme als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)
Mineralfaser (Steinwolle) stofflich im Zementwerk	Mineralik als entsprechende mineralische Rohstoffe im Zementwerk, Wärme aus Bindemittel als Steinkohleverbrennung (ifeu)	Mineralik als entsprechende mineralische Rohstoffe im Zementwerk, Wärme aus Bindemittel als Steinkohleverbrennung (ifeu)	50 % der Mineralik als entsprechende mineralische Rohstoffe im Zementwerk, 50 % der Wärme aus Bindemittel als Steinkohleverbrennung (ifeu)
Mineralfaser (Steinwolle) Rückführung in die Produktion	Mineralik als mineralische Rohstoffe, Wärme aus Bindemittel als Erdgasheizung (ifeu), eingesparte Schmelzenergie als Erdgaskessel (EI 3.4)	Mineralik als mineralische Rohstoffe, Wärme aus Bindemittel als Erdgasheizung (ifeu), eingesparte Schmelzenergie als Erdgaskessel (EI 3.4)	50 % der Mineralik als mineralische Rohstoffe, 50 % der Wärme aus Bindemittel als Erdgasheizung (ifeu), 50 % der eingesparten Schmelzenergie als Erdgaskessel (EI 3.4)
Glaswolle stofflich im Zementwerk (*80 % Sekundärmaterial = Altglas)*	Glas als entsprechende mineralische Rohstoffe im Zementwerk, Wärme aus Bindemittel als Steinkohleverbrennung (ifeu)	Nur Primärglasanteil als entsprechende mineralische Rohstoffe im Zementwerk, Wärme aus Bindemittel als Steinkohleverbrennung (ifeu)	50 % des Glases als entsprechende mineralische Rohstoffe im Zementwerk, 50 % der Wärme aus Bindemittel als Steinkohleverbrennung (ifeu) *Lasten: 50 % des Altglasanteils als primäre Rohstoffe (IBO) inkl. zusätzliche Schmelzenergie als Erdgaskessel (EI 3.4) abzüglich 50 % der Lasten des Altglases (IBO)*
Glaswolle Rückführung in die Produktion (*80 % Sekundärmaterial = Altglas)*	Glas als primäre Rohstoffe (IBO), Wärme aus Bindemittel als Erdgasheizung (ifeu), eingesparte Schmelzenergie nur für Altglasanteil als Erdgaskessel (EI 3.4)	Nur Primärglasanteil als primäre Rohstoffe (IBO), Wärme aus Bindemittel als Erdgasheizung (ifeu)	50 % des Altglasanteils als Altgas (IBO), 50 % des Primärglasanteils als primäre Rohstoffe (IBO), 50 % der Wärme aus Bindemittel als Erdgasheizung (ifeu)
Schaumglasplatte im Bau (*54 % Sekundärmaterial = Altglas*)	Glas als Gestein (ifeu)	Nur Primärglasanteil als Gestein	50 % des Glasanteils als Gestein (ifeu) *Lasten: 50 % des Sekundärmaterials (Altglas) als primäre Rohstoffe inkl. zusätzliche Schmelzenergie als Erdgaskessel (EI 3.4) abzüglich 50 % der Lasten für*

Dämmstoff - Entsorgungs- bzw. Verwertungsvariante: Angesetzter Nutzen	**Nutzen nach Abfallökobilanz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach EN 15804, nur separat informatorisch ausgewiesen; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach erweitertem 50:50-Ansatz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern** ***Bei Dämmstoffen aus Sekundärmaterialien Lasten für ursprüngliches Primärmaterial kursiv***
			den Altglasanteil (IBO)
Schaumglasplatte zu Schallschutzmaterial (*54 % Sekundärmaterial = Altglas*)	Glas als primäre Rohstoffe (IBO), eingesparte Schmelzenergie als Erdgaskessel (EI 3.4)	Nur Primärglasanteil und dies auch nur als Altglas (IBO)	50 % des Altglasanteils als Altglas (IBO), 50 % des Primärglasanteils als primäre Rohstoffe + 50 % der eingesparten Schmelzenergie für Primäranteil als Erdgaskessel (EI 3.4)
Schaumglasplatte zu Schaumglasschotter (*54 % Sekundärmaterial = Altglas*)	Lasten der Schaumglasplattenproduktion (IBO) bzw. nur 80 % der Prozessenergie als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel bzw. Diesel (IBO), eingesparte Schmelzenergie als Erdgaskessel	Nur für Primäranteil: Lasten der Schaumglasplattenproduktion bzw. nur 80 % der Prozessenergie als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel bzw. Diesel (IBO), eingesparte Schmelzenergie als Erdgaskessel	50 % der Lasten der Schaumglasplattenproduktion bzw. 50 % von nur 80 % der Prozessenergie als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel bzw. Diesel (IBO), 50 % der eingesparten Schmelzenergie für Primäranteil als Erdgaskessel
Schaumglasplatte Leichtzuschläge (*54 % Sekundärmaterial = Altglas*)	Glas als Bims und Blähton (EI 3.4)	Nur Primärglasanteil als Bims und Blähton (EI 3.4)	50 % des Glasanteils als Bims und Blähton (EI 3.4) *Lasten: 50 % des Sekundärmaterials (Altglas) als primäre Rohstoffe (IBO) inkl. zusätzliche Schmelzenergie als Erdgaskessel (EI 3.4) abzüglich 50 % der Lasten für den Atlglasanteil (IBO)*
Schaumglasplatte Rückführung in die Produktion (*54 % Sekundärmaterial*)	Glas als primäre Rohstoffe (IBO), eingesparte Schmelzenergie als Erdgaskessel (EI 3.4)	Nur Primärglasanteil und dies auch nur als Altglas (IBO)	50 % des Altglasanteils als Altglas (IBO), 50 % des Primärglasanteils als primäre Rohstoffe (IBO) + 50 % der eingesparten Schmelzenergie für Primäranteil als Erdgaskessel (EI 3.4)
Mineralschaum Leichtzuschläge	Dämmstoff als Bims und Blähton (EI 3.4)	Dämmstoff als Bims und Blähton (EI 3.4)	50 % des Dämmstoffs als Bims und Blähton (EI 3.4)
Mineralschaum stofflich mineralisch in Porenbeton	Lasten der Mineralschaumplattenproduktion (IBO) bzw. nur 25 % des Zements als Zement (IBO) und nur 25 % der Prozessenergie als ENTSO-E-Strom bzw. Erd- bzw. Steinkohlekessel bzw. Diesel (IBO)	Lasten der Mineralschaumplattenproduktion (IBO) bzw. nur 25 % des Zements als Zement (IBO) und nur 25 % der Prozessenergie als ENTSO-E-Strom bzw. Erd- bzw. Steinkohlekessel bzw. Diesel (IBO)	50 % der Lasten der Mineralschaumplattenproduktion (IBO) bzw. nur 50 % von 25 % des Zements als Zement (IBO) und nur 50 % von 25 % der Prozessenergie als ENTSO-E-Strom bzw. Erd- bzw. Steinkohlekessel bzw. Diesel (IBO)
Mineralschaum Rückführung in die Produktion	Dämmstoff als Kalk (IBO)	Dämmstoff als Kalk (IBO)	50 % des Dämmstoffs als Kalk (IBO)

Dämmstoff - Entsorgungs- bzw. Verwertungsvariante: Angesetzter Nutzen	**Nutzen nach Abfallökobilanz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach EN 15804, nur separat informatorisch ausgewiesen; Quelle Datensatz in Klammern**	**Nutzen nach erweitertem 50:50-Ansatz, in Bilanz eingerechnet; Quelle Datensatz in Klammern** ***Bei Dämmstoffen aus Sekundärmaterialien Lasten für ursprüngliches Primärmaterial kursiv***
EPS CreaSolv® und XPS CreaSolv®	PS-Anteil als PS (EI 3.4)	PS-Anteil als PS (EI 3.4)	50 % des PS-Anteils als PS (EI 3.4)
EPS RC-Platten und Zuschläge	EPS als EPS-Kügelchen: PS als PS (EI 3.4), Treibmittel als Treibmittel (IBO), FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme des Vorschäumens als aktueller deutscher Netzstrommix (ifeu) bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	EPS als EPS-Kügelchen: PS als PS (EI 3.4), Treibmittel als Treibmittel, FSM als FSM, eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme des Vorschäumens als aktueller deutscher Netzstrommix (ifeu) bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	50 % des EPS als EPS-Kügelchen: 50 % des PS als PS (EI 3.4), 50 % des Treibmittels als Treibmittel (IBO), 50 % des FSM als FSM (IBO), 50 % des eingesparten Prozessstroms bzw. –wärme des Vorschäumens als aktueller deutscher Netzstrommix (ifeu) bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)
EPS Rückführung in Produktion	EPS als EPS-Kügelchen: PS als PS (EI 3.4), Treibmittel als Treibmittel (IBO), FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme des Vorschäumens als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	EPS als EPS-Kügelchen: PS als PS (EI 3.4), Treibmittel als Treibmittel (IBO), FSM als FSM (IBO), eingesparter Prozessstrom bzw. –wärme des Vorschäumens als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)	50 % des EPS als EPS-Kügelchen: 50 % des PS als PS (EI 3.4), 50 % des Treibmittels als Treibmittel (IBO), 50 % des FSM als FSM (IBO), 50 % des eingesparten Prozessstroms bzw. –wärme des Vorschäumens als ENTSO-E-Strom bzw. Erdgaskessel (EI 3.4)
EPS Regranulierung, XPS Regranulierung, XPS Rückführung in Produktion	PS als PS (EI 3.4), FSM als FSM (IBO)	PS als PS (EI 3.4), FSM als FSM (IBO)	50 % des PS als PS (EI 3.4), 50 % des FSM als FSM (IBO)
PU Sekundär als Klebepressplatten	80 % der Produktionslasten der Dämmplattenproduktion (IBO)	80 % der Produktionslasten der Dämmplattenproduktion (IBO)	50 % von 80 % der Produktionslasten der Dämmplattenproduktion (IBO)
PU Glykolyse	RC-Polyol als Polyol, Treibmittel als Treibmittel	RC-Polyol als Polyol, Treibmittel als Treibmittel	50 % des RC-Polyol als Polyol, 50 % des Treibmittels als Treibmittel

8.4 Überblick über die betrachteten Entsorgungswege

Zelluloseeinblasdämmung - Bilanzierte Entsorgungswege			
Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Müllverbrennungsanlage	X	X	10 % el. , 32 % th.
Zementwerk	X	X	Substitution Steinkohleverbrennung
Biomasse HKW	X	X	25 % el. , 39 % th. (brutto)
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X		3,4 % Rückführung
Pyrolyse	X	(X)	Borsubstitution 20%, C-Sequestrierung (teilweise)

Holzfasereinblasdämmung - Bilanzierte Entsorgungswege			
Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Müllverbrennungsanlage	X	X	10 % el. , 32 % th.
Zementwerk	X	X	Substitution Steinkohleverbrennung
Biomasse HKW	X	X	25 % el. , 39 % th. (brutto)
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X		5 % Rückführung
Sekundärrohstoff	X		Substituiert Holz
Pyrolyse	X	(X)	Ammoniumsulfatsubstitut 20 %, C-Sequestrierung (teilweise)

Abbildung 8-5: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Zelluloseeinblasdämmung und Holzfasereinblasdämmung

Hanfdämmmatten - Bilanzierte Entsorgungswege			
Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Müllverbrennungsanlage	X	X	10 % el. , 32 % th.
Zementwerk	X	X	Substitution Steinkohleverbrennung
Biomasse HKW	X	X	25 % el. , 39 % th. (brutto)
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X		5 % Rückführung, Stützfas. subst. Hanffasern
Formteileproduktion	X		Stützfasern substituieren Stützfasern

Jutedämmmatten - Bilanzierte Entsorgungswege			
Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Müllverbrennungsanlage	X	X	10 % el. , 32 % th.
Zementwerk	X	X	Substitution Steinkohleverbrennung
Biomasse HKW	X	X	25 % el. , 39 % th. (brutto)
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X		5 % Rückführung, Stützfas. subst. Jutefasern
Formteileproduktion	X		Sützfasern substituieren Stützfasern

Abbildung 8-6: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Hanfdämmmatten und Jutedämmmatten

Holzfaserdämmmatten- Bilanzierte Entsorgungswege			
Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Müllverbrennungsanlage	X	X	10 % el. , 32 % th.
Zementwerk	X	X	Substitution Steinkohleverbrennung
Biomasse HKW	X	X	25 % el. , 39 % th. (brutto)
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X		5 % Rückführung, Stützfasern subst. Holz
Formteileproduktion	X		Sützfasern substituieren Stützfasern

Holzfaserdämmplatten - Bilanzierte Entsorgungswege			
Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Müllverbrennungsanlage	X	X	10 % el. , 32 % th.
Zementwerk	X	X	Substitution Steinkohleverbrennung
Biomasse HKW	X	X	25 % el. , 39 % th. (brutto)
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X		5 % Rückführung, Leime substituieren Holz
Sekundärrohstoff	X		Substituiert Holz, Leime substituieren Holz

Abbildung 8-7: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Holzfaserdämmmatten und Holzfaserdämmplatten

Mineralfaserplatte - Bilanzierte Entsorgungswege

Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Deponie	X	X	
Falls verklebt: 2 % Verlust zur Deponie			
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X		30 % Rückführung
Stofflich Zementwerk	X		100 % Rückführung
Falls verklebt: 4 % Verlust zur Deponie; zus. Aufbereitungsaufwand für Rückführung in Produktion Strom 20 kWh/t			

Glaswollematten - Bilanzierte Entsorgungswege

Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Deponie	X	X	Wird komprimiert
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X		4 % Rückführung
Stofflich Zementwerk	X		100 % Rückführung

Abbildung 8-8: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Mineralfaserdämmplatten und Glaswollematten

Schaumglasplatten - Bilanzierte Entsorgungswege

Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Bauschutt	X	X	substituiert Gestein
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X	(X)	40 % Rückführung
Schallschutzmaterial	X		subsituiert Primärglas

Mineralschaumplatte - Bilanzierte Entsorgungswege

Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Deponie	X	X	
Zukünftig zusätzlich			
Rückführung in Produktion	X		20 % Rückführung
Mineralische Sekundärrohstoffe	X		substituiert Kalk
Leichtdämmputze	X		subst. Bims, Blähton

Abbildung 8-9: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für Schaumglasplatten und Mineralschaumplatten

EPS Dämmplatte - Bilanzierte Entsorgungswege

Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Müllverbrennungsanlage	X	X	10 % el. , 32 % th.
Zementwerk	X	X	Substitution Steinkohleverbrennung
Zukünftig zusätzlich			
Creasolv	X	X	substituiert PS
Rückführung Produktion	X		30 % Rückführung
RC-Plattenproduktion und Zuschläge	X		Subst. PS, Flammenschutz
Regranulierung	X		Subst. PS, Flammenschutz

XPS Dämmplatten - Bilanzierte Entsorgungswege

Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Müllverbrennungsanlage	X	X	10 % el. , 32 % th.
Zementwerk Falls verklebt: 5 % Verlust zur MVA	X	X	Substitution Steinkohleverbrennung
Zukünftig zusätzlich			
Creasolv	X	X	substituiert PS
Rückführung Produktion	X		7,5 % Rückführung
Sekundärrohstoff	X		substituiert PS

Abbildung 8-10: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege für EPS-Dämmplatten und XPS-Dämmplatten

PU Dämmplatten - Bilanzierte Entsorgungswege

Status Quo	Sauber	Unrein	Getroffene Annahmen
Müllverbrennungsanlage	X	X	10 % el. , 32 % th.
Zementwerk	X	X	Substitution Steinkohleverbrennung
Zukünftig zusätzlich			
Glykolyse	X	X	subst. Polyol, Treibmittel
RC-Pressplatten	X		PU-Dämmplatte

Abbildung 8-11: Darstellung der bilanzierten Entsorgungswege inkl. Erläuterung der Ergebnisse der Abfallökobilanz für PU Dämmplatten

8.5 Ergebnisse für Steildach und Außenwand in Tabellenform

8.5.1 EN 15804

Tabelle 8-4: Ergebnisse für das Steildach nach der EN 15804 mit den danach jeweils besten Entsorgungswegen

	GWP (kg CO_2-Äq.)	KEA fossil (GJ)	AP (kg SO_2-Äq.)	EP t (kg PO_4-Äq.)	PM 2,5 (kg PM 2,5-Äq.)
Zelllulose	4,97E+00	6,68E-02	3,18E-02	2,95E-03	3,07E-02
Hanf	8,17E+00	1,20E-01	3,32E-02	3,13E-03	2,90E-02
Jute	6,08E+00	9,78E-02	2,19E-02	1,83E-03	1,86E-02
Holzfasereinblas	4,87E+00	6,74E-02	1,43E-02	1,41E-03	1,23E-02
Holzmatten	1,56E+01	2,37E-01	5,63E-02	5,06E-03	4,64E-02
Holzplatten nass	6,03E+01	9,39E-01	1,44E-01	1,46E-02	1,25E-01
Holzplatten trocken	2,22E+01	3,32E-01	9,12E-02	1,03E-02	8,30E-02
Mineralfaserplatte	1,94E+01	2,45E-01	1,53E-01	9,84E-03	1,12E-01
Glaswolle	2,08E+01	2,85E-01	1,60E-01	2,05E-02	9,58E-02
Mineralschaumplatte	3,30E+01	3,15E-01	1,51E-01	1,11E-02	1,18E-01
EPS	1,78E+01	3,79E-01	5,43E-02	3,79E-03	4,48E-02
PU	2,18E+01	3,80E-01	1,09E-01	1,12E-02	8,98E-02

Tabelle 8-5: Ergebnisse für das Steildach nach der EN 15804 mit Entsorgung wie im Status Quo

	GWP (kg CO_2-Äq.)	KEA fossil (GJ)	AP (kg SO_2-Äq.)	EP t (kg PO_4-Äq.)	PM 2,5 (kg PM 2,5-Äq.)
Zelllulose	4,97E+00	6,68E-02	3,18E-02	2,95E-03	3,07E-02
Hanf	9,24E+00	1,19E-01	3,54E-02	3,57E-03	3,16E-02
Jute	6,99E+00	9,68E-02	2,39E-02	2,23E-03	2,10E-02
Holzfasereinblas	5,01E+00	6,77E-02	1,65E-02	1,79E-03	1,48E-02
Holzmatten	1,79E+01	2,39E-01	6,07E-02	5,81E-03	5,14E-02
Holzplatten nass	6,36E+01	9,38E-01	1,63E-01	1,81E-02	1,47E-01
Holzplatten trocken	2,44E+01	3,32E-01	9,81E-02	1,16E-02	9,11E-02
Mineralfaserplatte	1,94E+01	2,45E-01	1,53E-01	9,84E-03	1,12E-01
Glaswolle	2,08E+01	2,85E-01	1,60E-01	2,05E-02	9,58E-02
Mineralschaumplatte	3,30E+01	3,15E-01	1,51E-01	1,11E-02	1,18E-01
EPS	3,02E+01	3,80E-01	5,74E-02	4,37E-03	4,84E-02
PU	3,07E+01	3,81E-01	1,11E-01	1,16E-02	9,27E-02

Tabelle 8-6: Ergebnisse für die Außenwand nach der EN 15804 mit den danach jeweils besten Entsorgungswegen

	GWP (kg CO_2-Äq.)	KEA fossil (GJ)	AP (kg SO_2-Äq.)	EP t (kg PO_4-Äq.)	PM 2,5 (kg PM 2,5-Äq.)
Holzplatten nass	5,73E+01	8,85E-01	1,38E-01	1,40E-02	1,19E-01
Holzplatten trocken	2,85E+01	4,24E-01	1,17E-01	1,32E-02	1,06E-01
Mineralfaserplatte	1,77E+01	2,23E-01	1,39E-01	8,95E-03	1,02E-01
Schaumglasplatte	6,15E+01	7,58E-01	2,90E-01	2,55E-02	2,31E-01

Mineralschaumplatte	2,94E+01	2,80E-01	1,34E-01	9,85E-03	1,05E-01
EPS	1,70E+01	3,46E-01	4,98E-02	3,50E-03	4,12E-02
XPS	3,18E+01	5,75E-01	1,01E-01	7,54E-03	8,32E-02
PU	2,47E+01	4,22E-01	1,21E-01	1,25E-02	9,99E-02

Tabelle 8-7: Ergebnisse für die Außenwand nach der EN 15804 mit Entsorgung wie im Status Quo

	GWP (kg CO_2-Äq.)	KEA fossil (GJ)	AP (kg SO_2-Äq.)	EP t (kg PO_4-Äq.)	PM 2,5 (kg PM 2,5-Äq.)
Holzplatten nass	5,96E+01	8,80E-01	1,53E-01	1,70E-02	1,37E-01
Holzplatten trocken	3,09E+01	4,21E-01	1,25E-01	1,48E-02	1,16E-01
Mineralfaserplatte	1,77E+01	2,23E-01	1,39E-01	8,95E-03	1,02E-01
Schaumglasplatte	6,15E+01	7,58E-01	2,90E-01	2,55E-02	2,31E-01
Mineralschaumplatte	2,94E+01	2,80E-01	1,34E-01	9,85E-03	1,05E-01
EPS	2,76E+01	3,47E-01	5,24E-02	3,99E-03	4,42E-02
XPS	4,59E+01	5,49E-01	1,00E-01	7,84E-03	8,29E-02
PU	3,41E+01	4,23E-01	1,24E-01	1,29E-02	1,03E-01

8.5.2 50:50-Ansatz

Tabelle 8-8: Nettoergebnisse für das Steildach nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen

	GWP (kg CO_2-Äq.)	KEA fossil (GJ)	AP (kg SO_2-Äq.)	EP t (kg PO_4-Äq.)	PM 2,5 (kg PM 2,5-Äq.)
Zelllulose	7,53E+00	1,04E-01	6,14E-02	4,73E-03	5,34E-02
Hanf	4,70E+00	5,60E-02	2,35E-02	2,26E-03	2,00E-02
Jute	4,87E+00	6,76E-02	1,56E-02	1,27E-03	1,27E-02
Holzfasereinblas	2,69E+00	3,60E-02	1,12E-02	1,14E-03	9,25E-03
Holzmatten	1,10E+01	1,47E-01	4,46E-02	4,10E-03	3,56E-02
Holzplatten nass	4,15E+01	6,51E-01	1,16E-01	1,21E-02	9,65E-02
Holzplatten trocken	1,56E+01	2,24E-01	8,04E-02	9,40E-03	7,23E-02
Mineralfaserplatte	1,75E+01	2,28E-01	1,49E-01	9,25E-03	1,06E-01
Glaswolle	2,12E+01	2,84E-01	1,63E-01	2,10E-02	9,78E-02
Mineralschaumplatte	2,71E+01	2,54E-01	1,21E-01	8,91E-03	9,41E-02
EPS	1,35E+01	1,70E-01	2,83E-02	2,09E-03	2,28E-02
PU	1,48E+01	1,93E-01	7,06E-02	8,32E-03	5,56E-02

Tabelle 8-9: Nettoergebnisse für das Steildach nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung wie im Status Quo

	GWP (kg CO_2-Äq.)	KEA fossil (GJ)	AP (kg SO_2-Äq.)	EP t (kg PO_4-Äq.)	PM 2,5 (kg PM 2,5-Äq.)
Zelllulose	6,54E+00	8,65E-02	4,63E-02	3,72E-03	4,16E-02
Hanf	4,83E+00	5,71E-02	2,95E-02	2,93E-03	2,59E-02
Jute	8,32E+00	9,80E-02	6,05E-02	8,60E-03	4,13E-02
Holzfasereinblas	1,41E+00	1,76E-02	1,17E-02	1,27E-03	1,01E-02

Holzmatten	1,12E+01	1,45E-01	5,18E-02	4,83E-03	4,26E-02
Holzplatten nass	3,00E+01	4,72E-01	1,18E-01	1,32E-02	1,03E-01
Holzplatten trocken	1,18E+01	1,57E-01	8,15E-02	9,82E-03	7,46E-02
Mineralfaserplatte	1,94E+01	2,45E-01	1,53E-01	9,84E-03	1,12E-01
Glaswolle	2,14E+01	2,91E-01	1,64E-01	2,11E-02	9,84E-02
Mineralschaumplatte	3,30E+01	3,15E-01	1,51E-01	1,11E-02	1,18E-01
EPS	2,47E+01	3,05E-01	5,02E-02	3,57E-03	4,12E-02
PU	2,67E+01	3,25E-01	1,06E-01	1,11E-02	8,73E-02

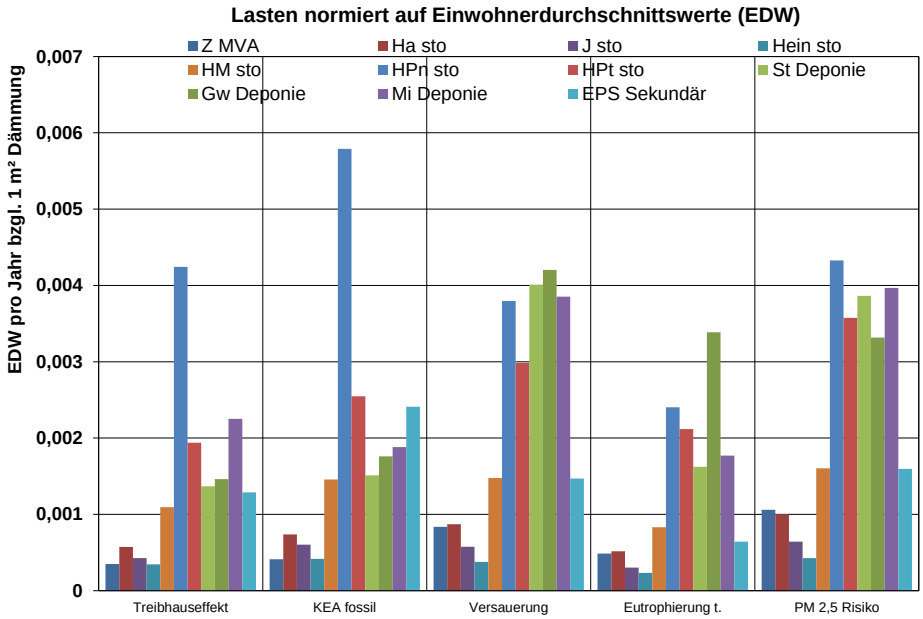
Tabelle 8-10: Nettoergebnisse für die Außenwand nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen

	GWP (kg CO_2-Äq.)	KEA fossil (GJ)	AP (kg SO_2-Äq.)	EP t (kg PO_4-Äq.)	PM 2,5 (kg PM 2,5-Äq.)
Holzplatten nass	3,85E+01	6,04E-01	1,09E-01	1,15E-02	9,13E-02
Holzplatten trocken	1,96E+01	2,80E-01	1,02E-01	1,20E-02	9,21E-02
Mineralfaserplatte	1,60E+01	2,08E-01	1,35E-01	8,42E-03	9,64E-02
Schaumglasplatte	3,68E+01	4,57E-01	1,69E-01	1,49E-02	1,34E-01
Mineralschaumplatte	2,42E+01	2,28E-01	1,09E-01	7,97E-03	8,43E-02
EPS	1,30E+01	1,63E-01	2,73E-02	2,00E-03	2,20E-02
XPS	2,46E+01	2,94E-01	6,45E-02	5,06E-03	5,19E-02
PU	1,67E+01	2,17E-01	7,92E-02	9,30E-03	6,25E-02

Tabelle 8-11: Nettoergebnisse für die Außenwand nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung wie im Status Quo

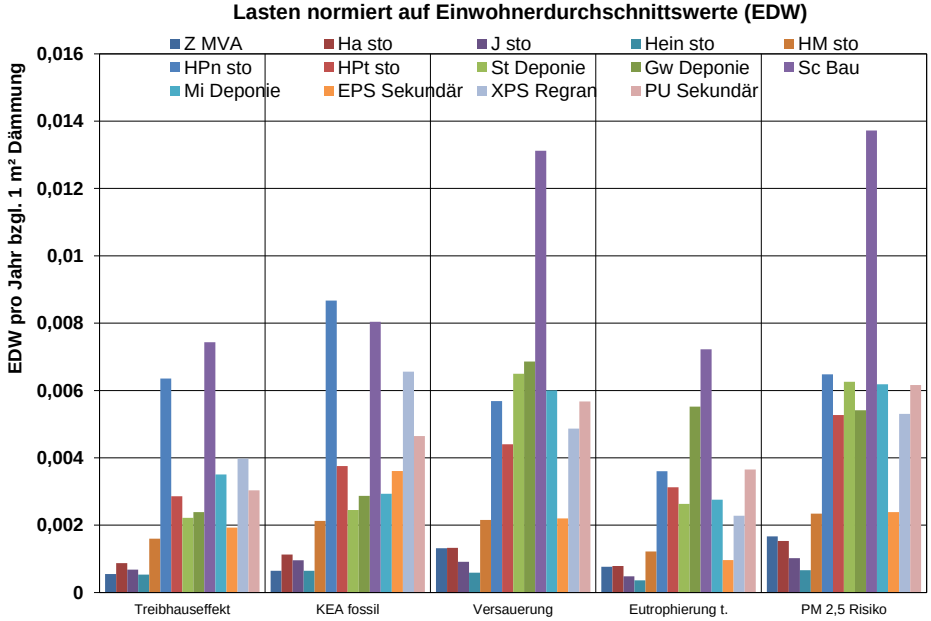
	GWP (kg CO_2-Äq.)	KEA fossil (GJ)	AP (kg SO_2-Äq.)	EP t (kg PO_4-Äq.)	PM 2,5 (kg PM 2,5-Äq.)
Holzplatten nass	2,82E+01	4,42E-01	1,11E-01	1,24E-02	9,62E-02
Holzplatten trocken	1,49E+01	1,98E-01	1,04E-01	1,25E-02	9,47E-02
Mineralfaserplatte	1,77E+01	2,23E-01	1,39E-01	8,95E-03	1,02E-01
Schaumglasplatte	6,59E+01	8,11E-01	3,16E-01	2,82E-02	2,53E-01
Mineralschaumplatte	2,94E+01	2,80E-01	1,34E-01	9,85E-03	1,05E-01
EPS	2,26E+01	2,78E-01	4,58E-02	3,27E-03	3,77E-02
XPS	3,80E+01	4,40E-01	8,94E-02	6,68E-03	7,25E-02
PU	2,96E+01	3,61E-01	1,18E-01	1,23E-02	9,70E-02

8.6 Ergebnisse für die weiteren Bauteile nach der EN 15804



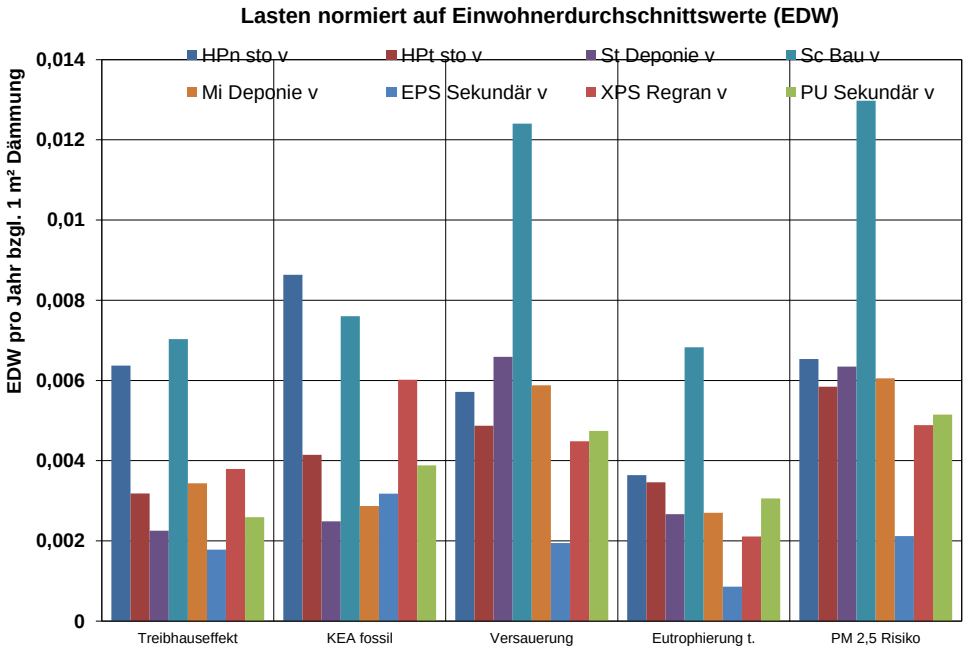
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-12: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand, leicht, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen



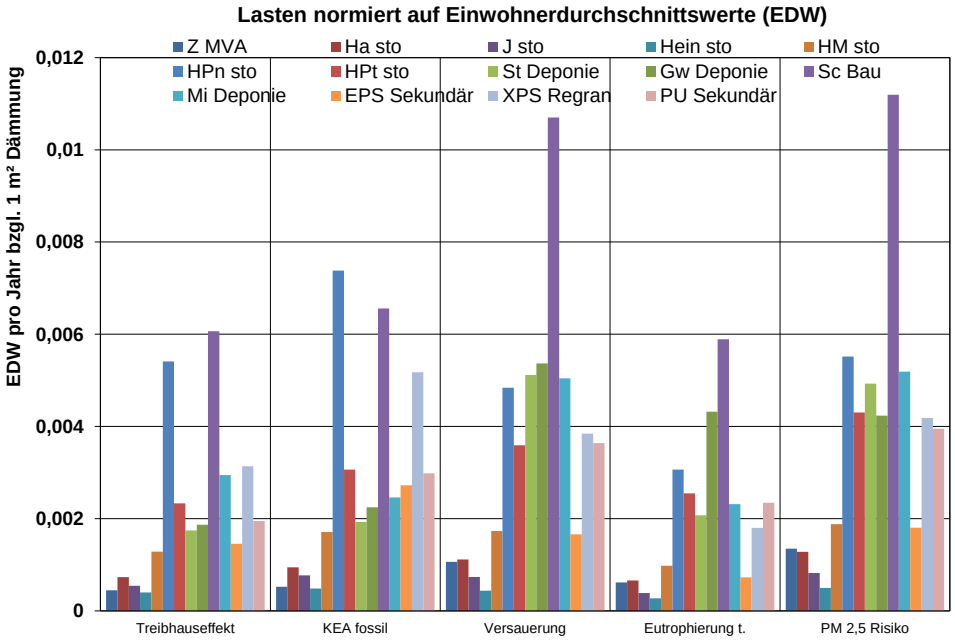
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-13: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, leicht, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen



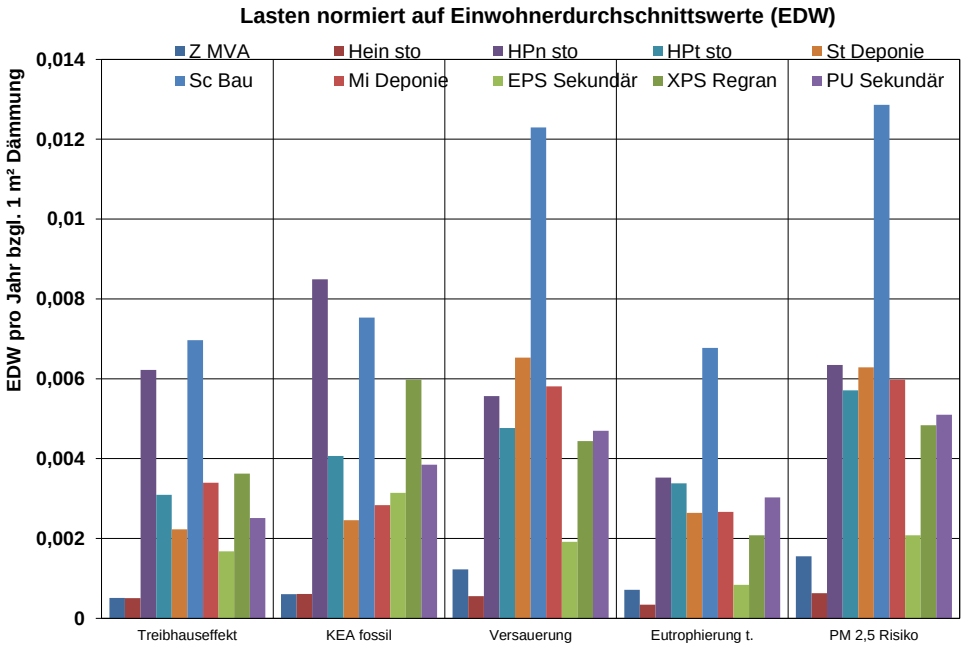
Betrachtete Dämmstoffe: Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-14: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, schwer, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen



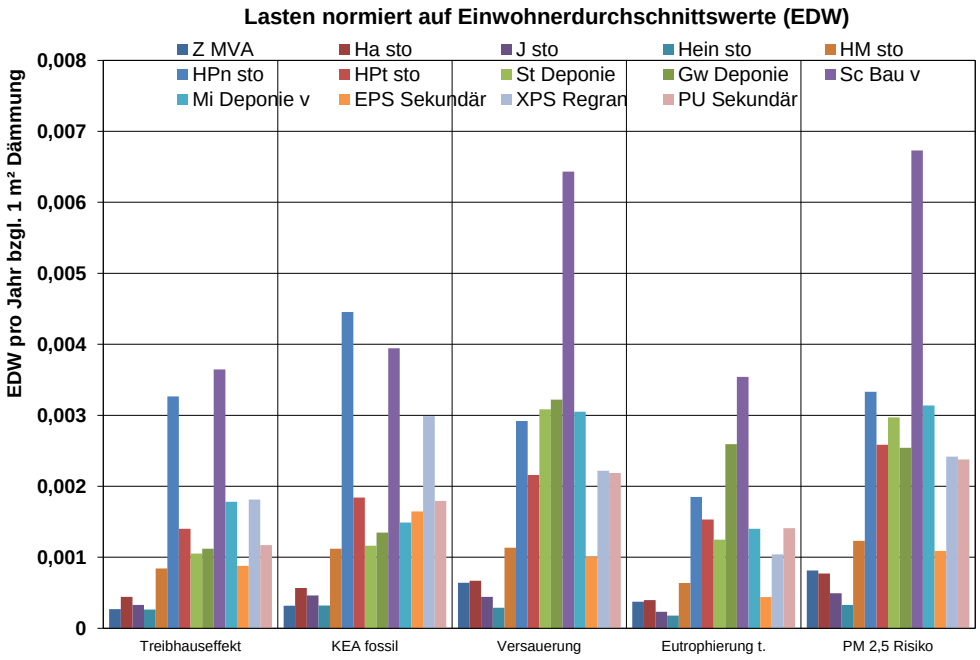
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-15: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, leicht, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen



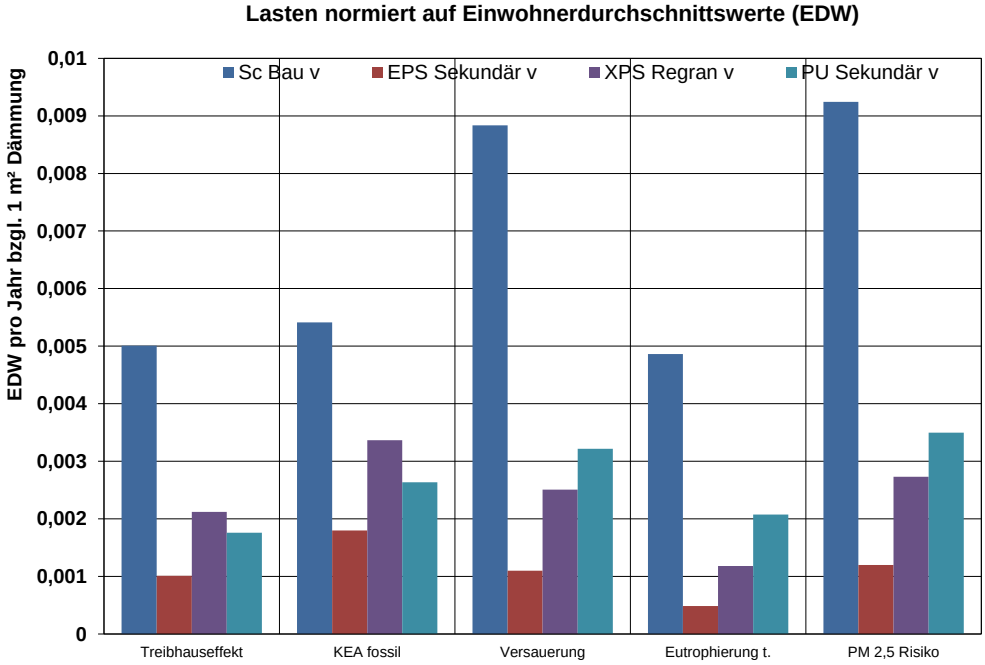
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Holzfasereinblas (Hein), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-16: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, schwer, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen



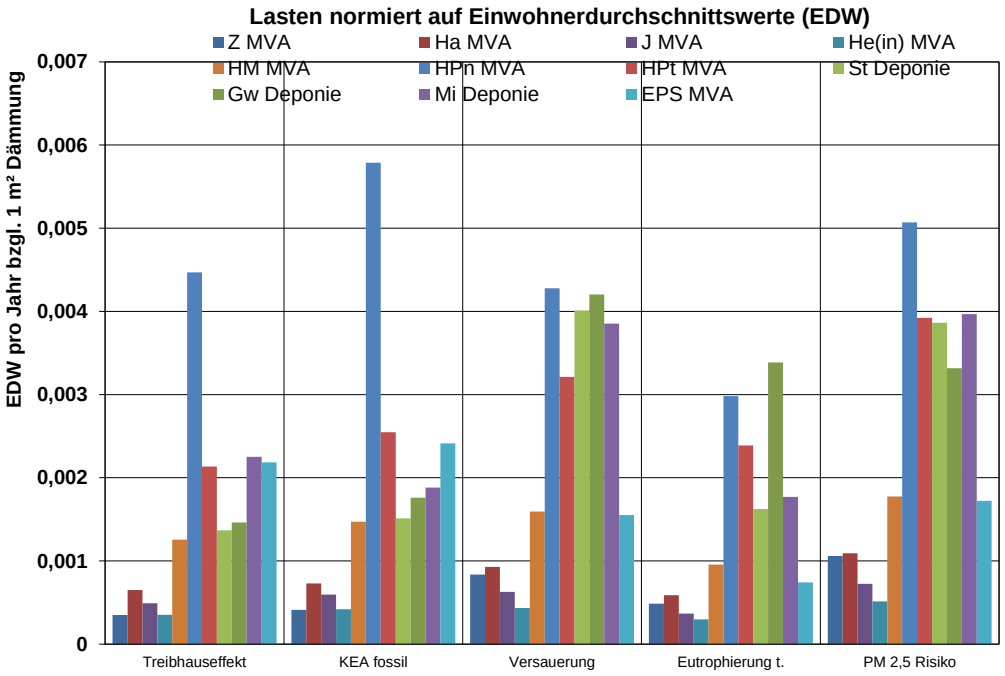
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-17: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerdecke, unten, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen



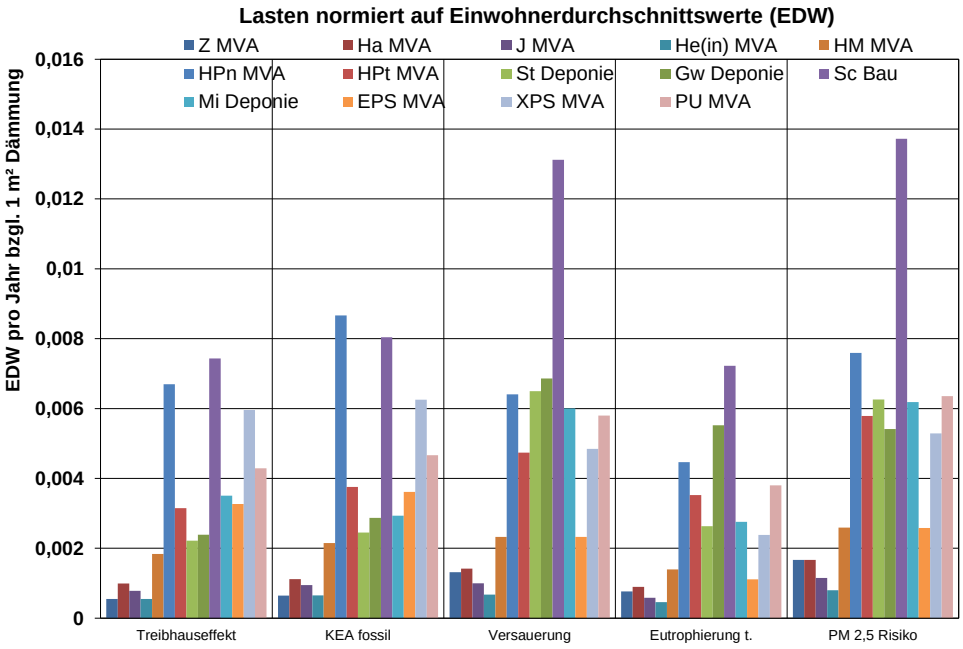
Betrachtete Dämmstoffe: Schaumglasplatte (Sc), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-18: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerwand, außen, nach der EN 15804 mit den jeweils nach EN 15804 mit den geringsten Lasten verbundenen Entsorgungswegen



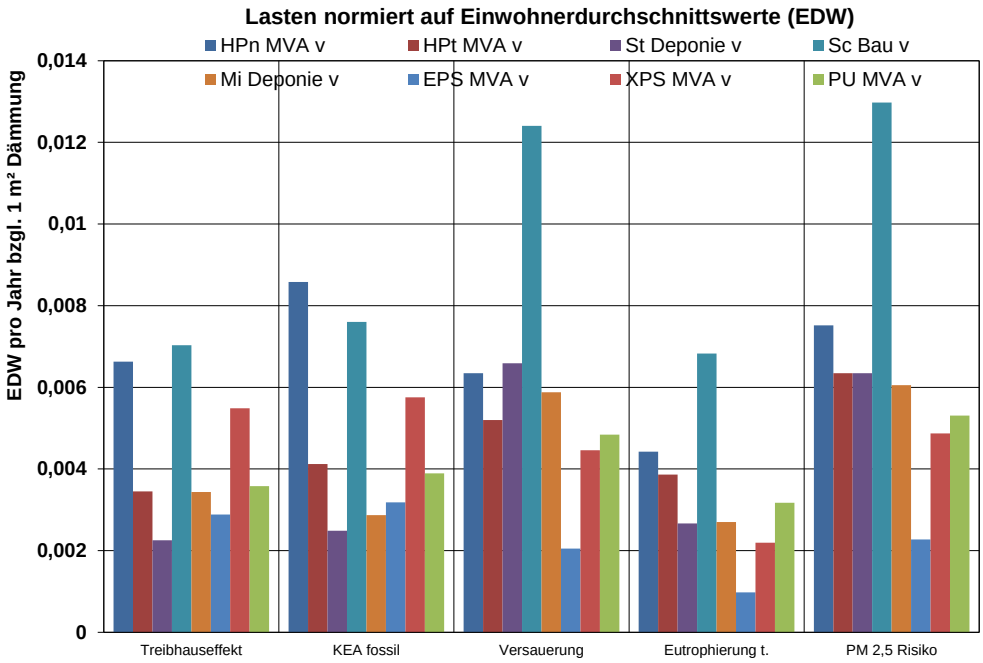
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-19: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand, leicht, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo



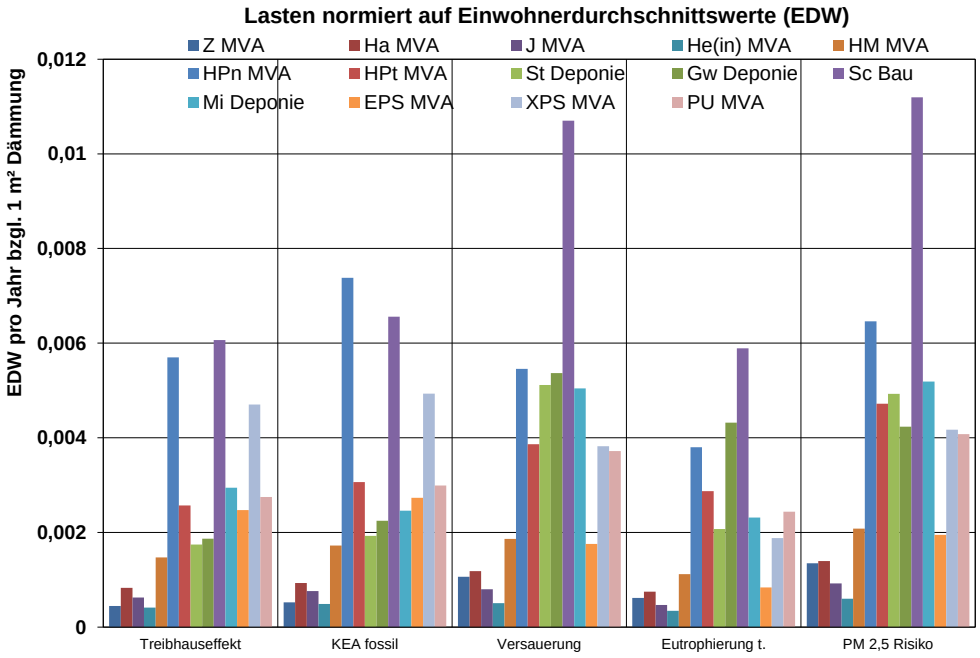
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-20: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, leicht, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo



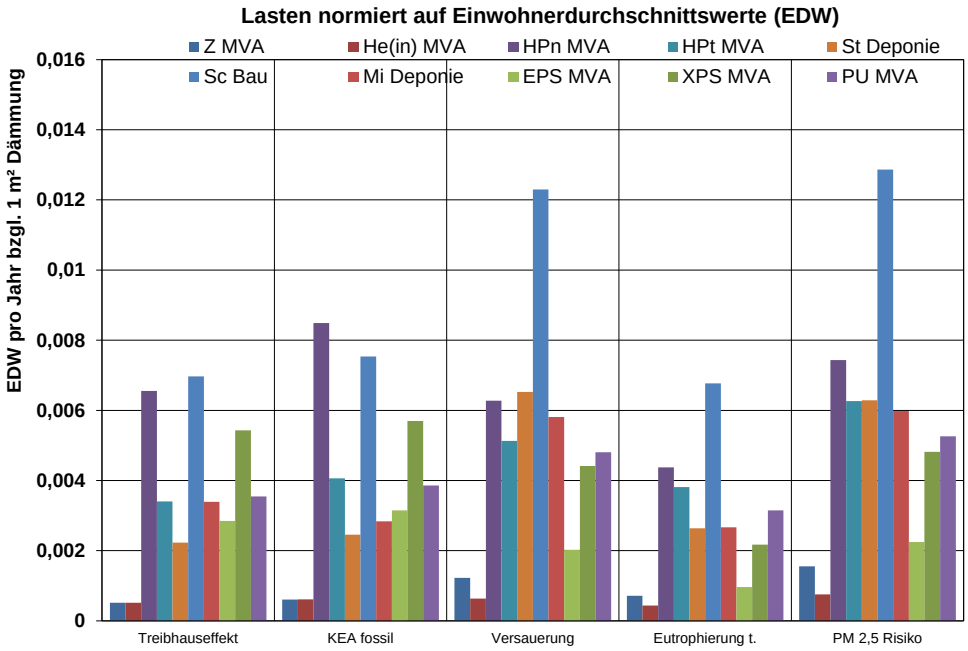
Betrachtete Dämmstoffe: Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-21: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, schwer, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo



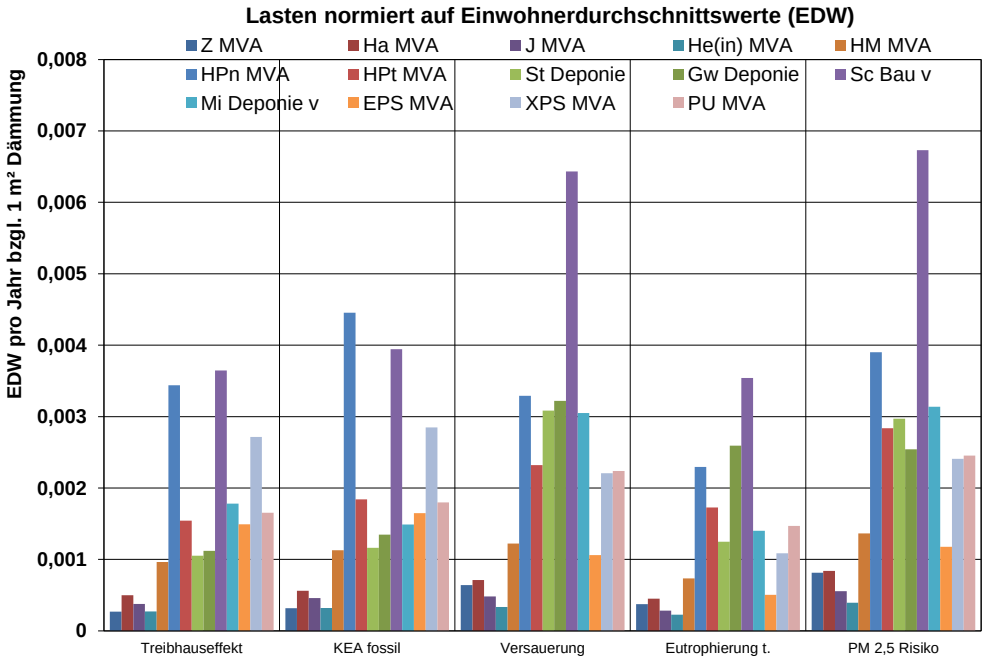
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-22: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, leicht, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo



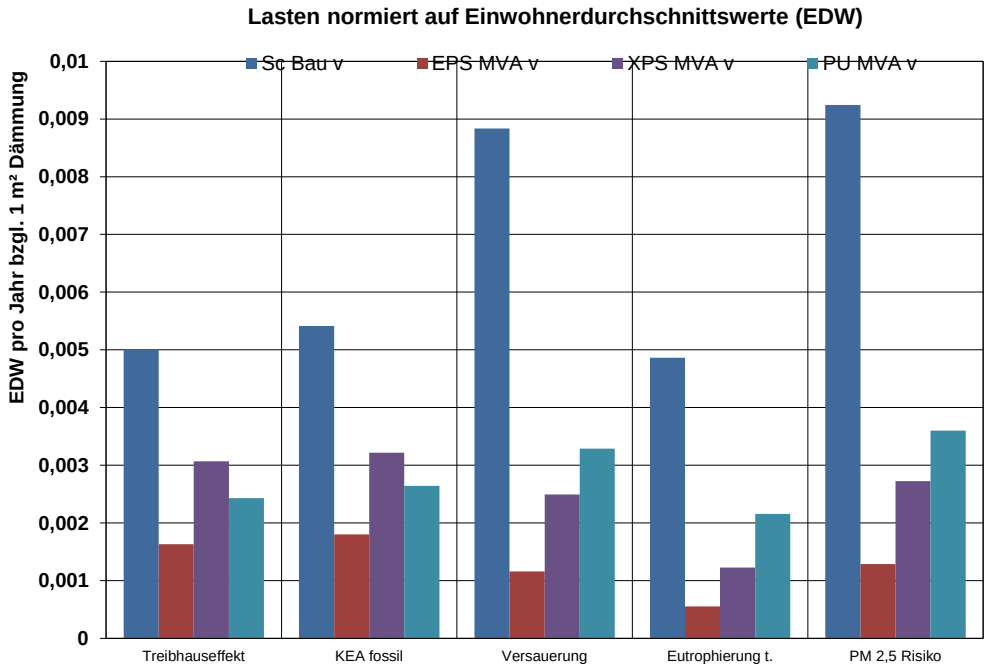
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Holzfasereinblas (Hein), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

Abbildung 8-23: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, schwer, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo



Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

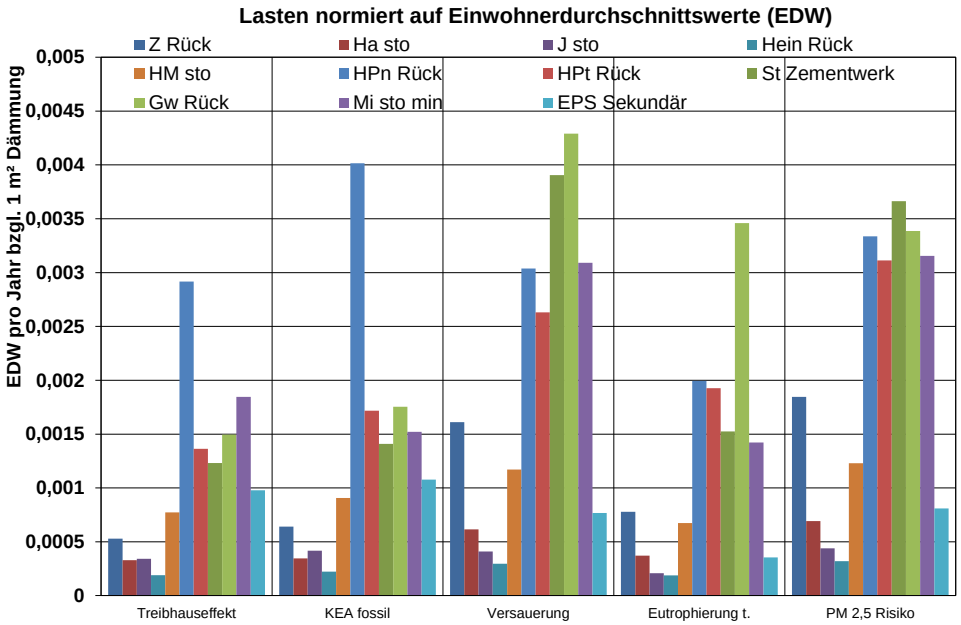
Abbildung 8-24: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerdecke, unten, nach der EN 15804 mit Entsorgung am Lebenswegende wie im Status Quo



Betrachtete Dämmstoffe: Schaumglasplatte (Sc), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.1.2

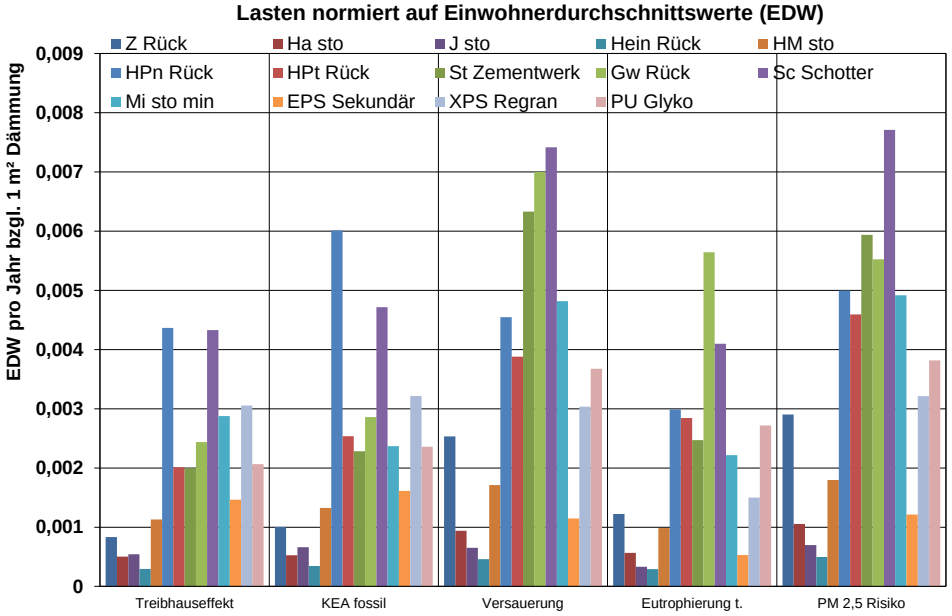
Abbildung 8-25: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerwand, außen, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo

8.7 Ergebnisse für die weiteren Bauteile nach dem 50:50-Ansatz



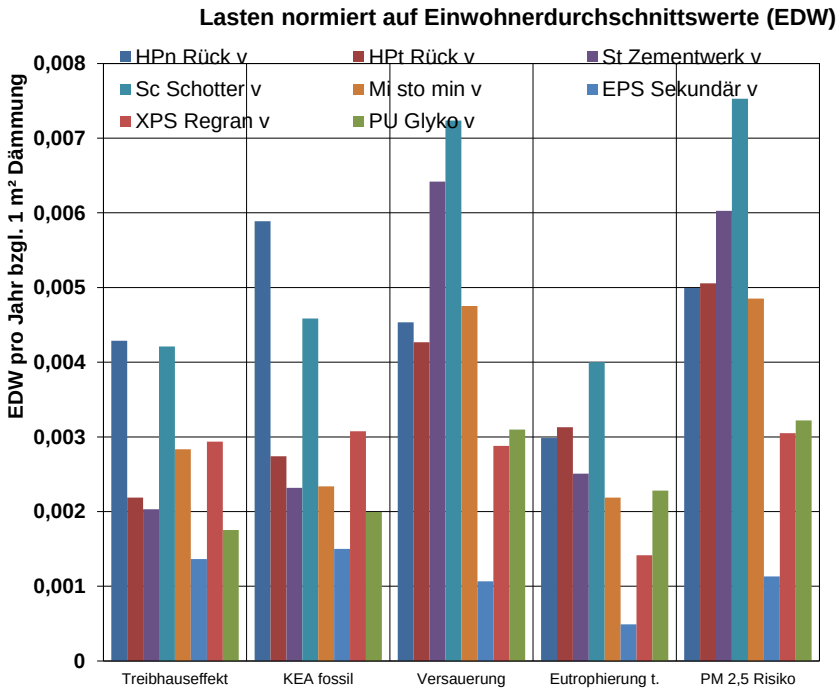
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-26: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen



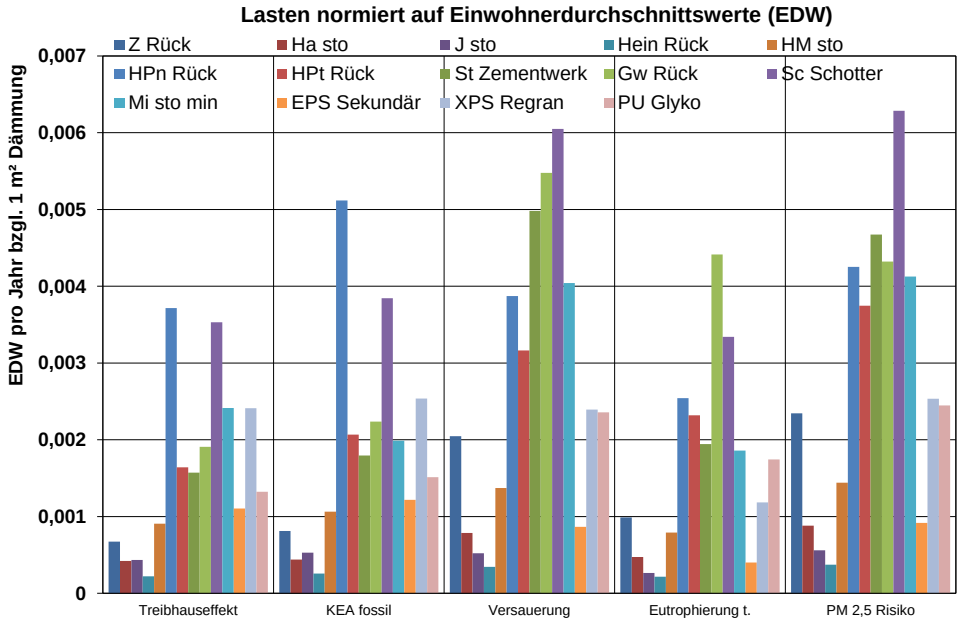
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-27: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen



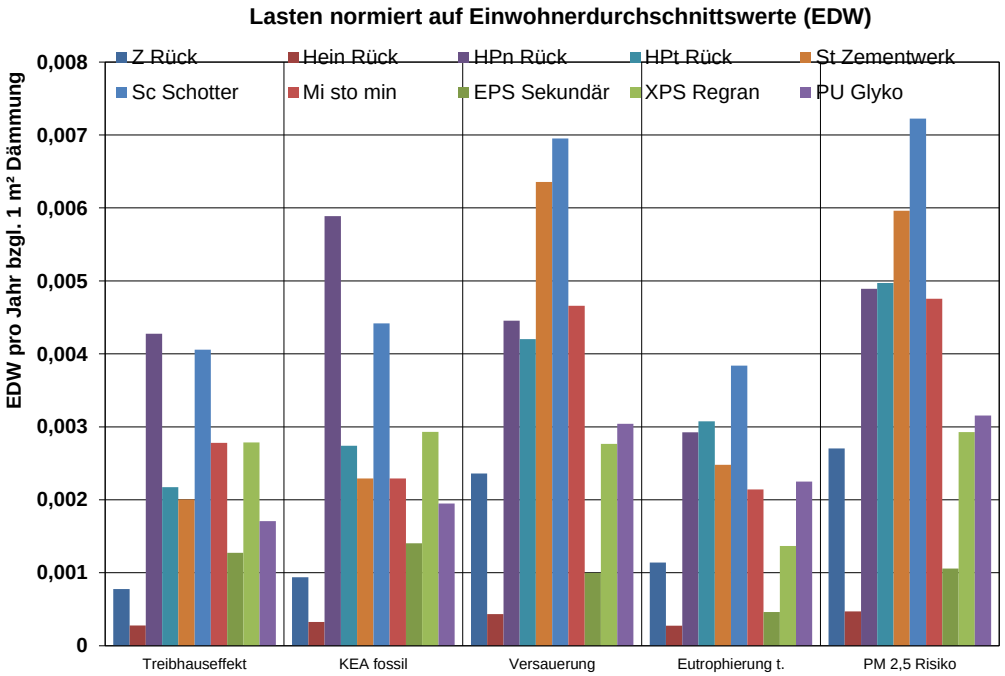
Betrachtete Dämmstoffe: Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-28: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, schwer, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen



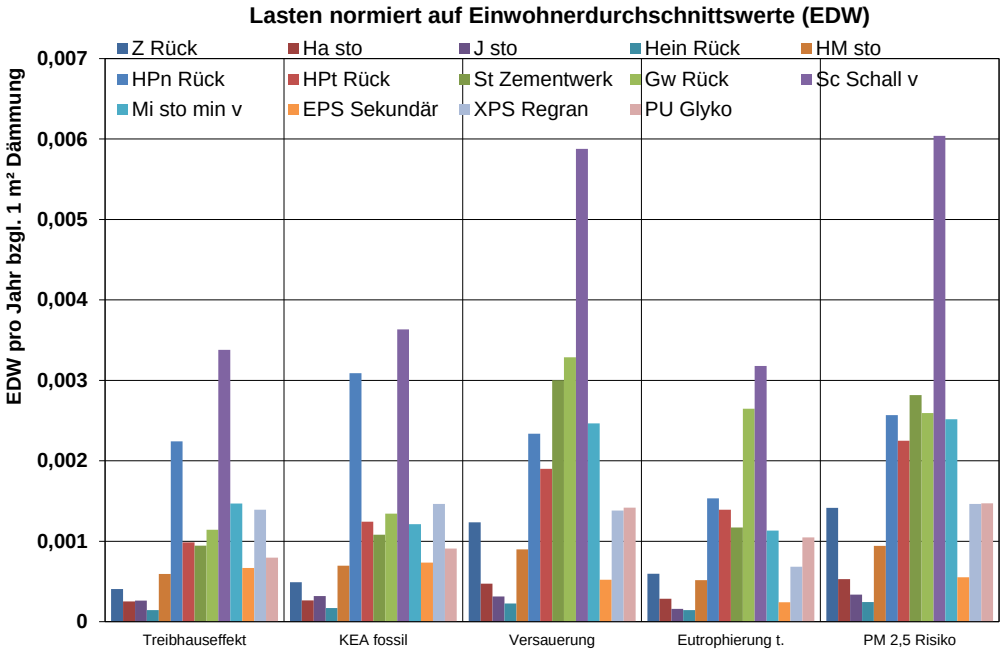
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-29: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen



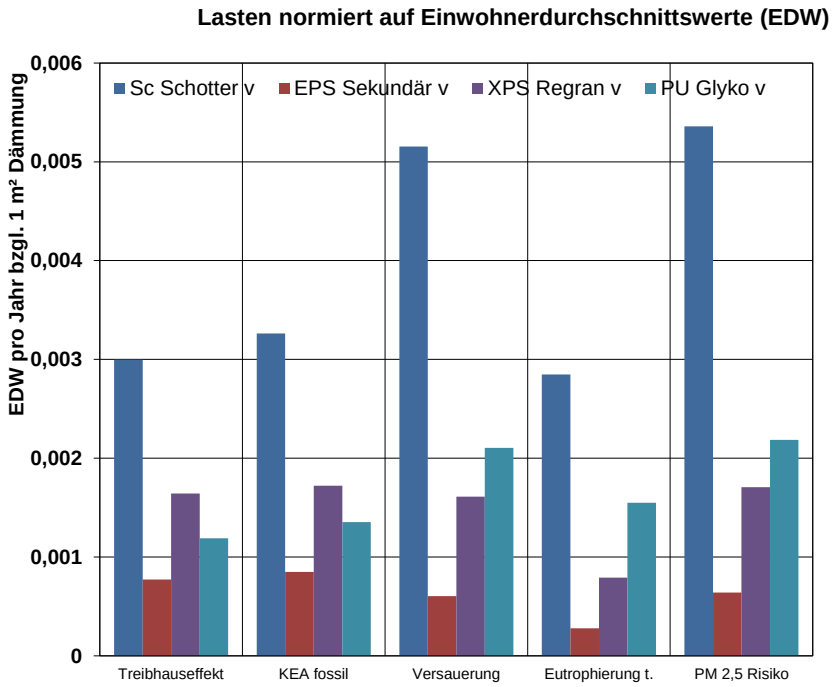
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Holzfasereinblas (Hein), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-30: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, schwer, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen



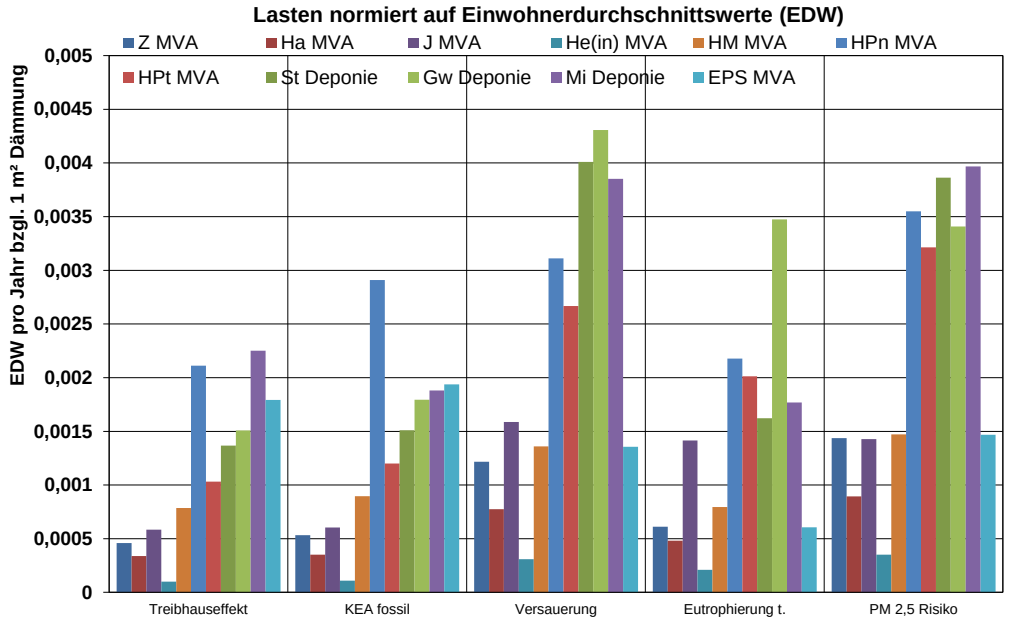
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-31: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerdecke, unten, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen



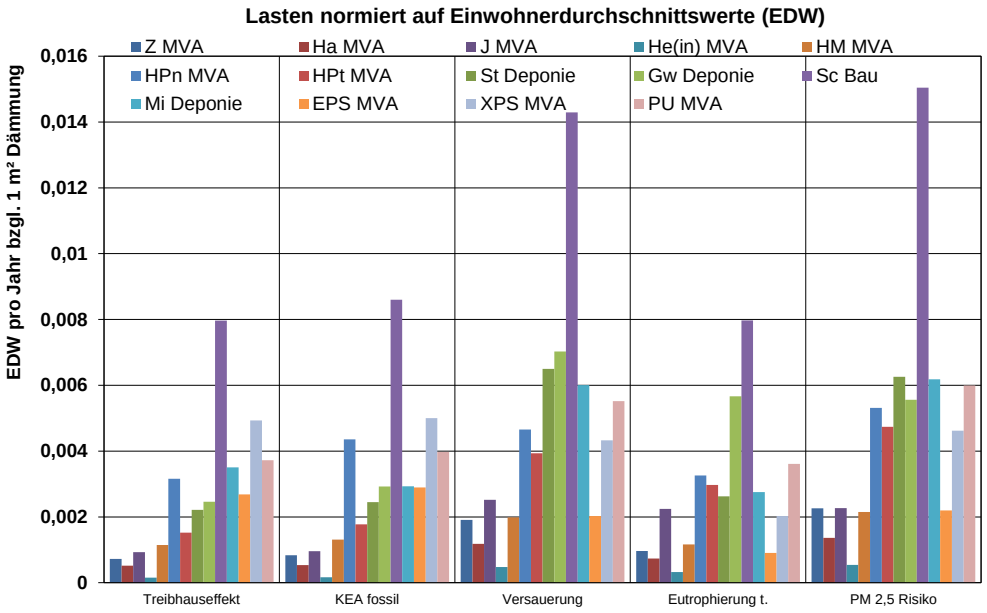
Betrachtete Dämmstoffe: Schaumglasplatte (Sc), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-32: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerwand, außen, nach dem 50:50-Ansatz mit den jeweils besten stofflichen Verwertungsoptionen



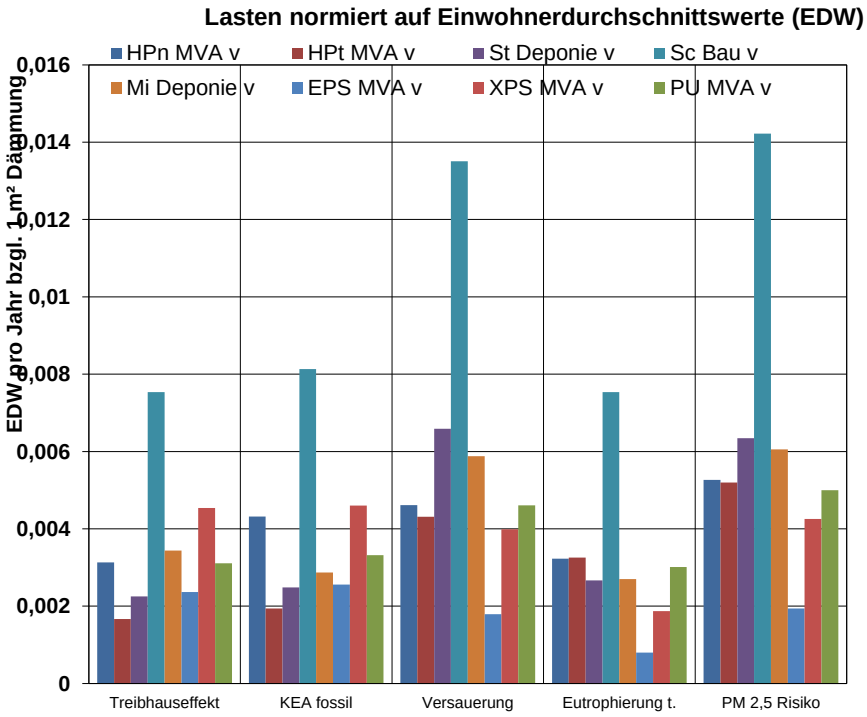
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-33: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Außenwand, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo



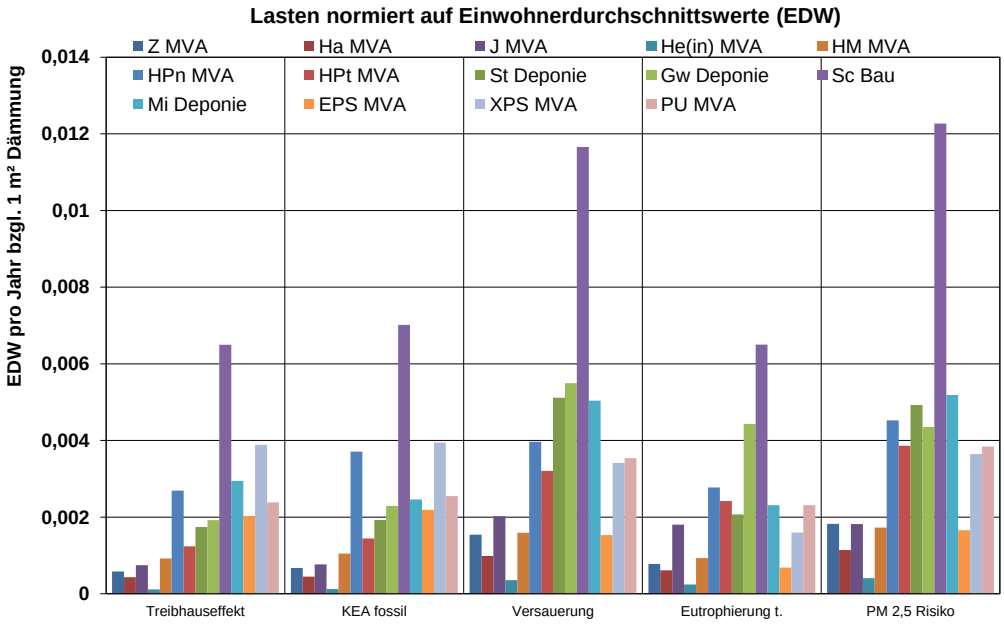
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-34: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo



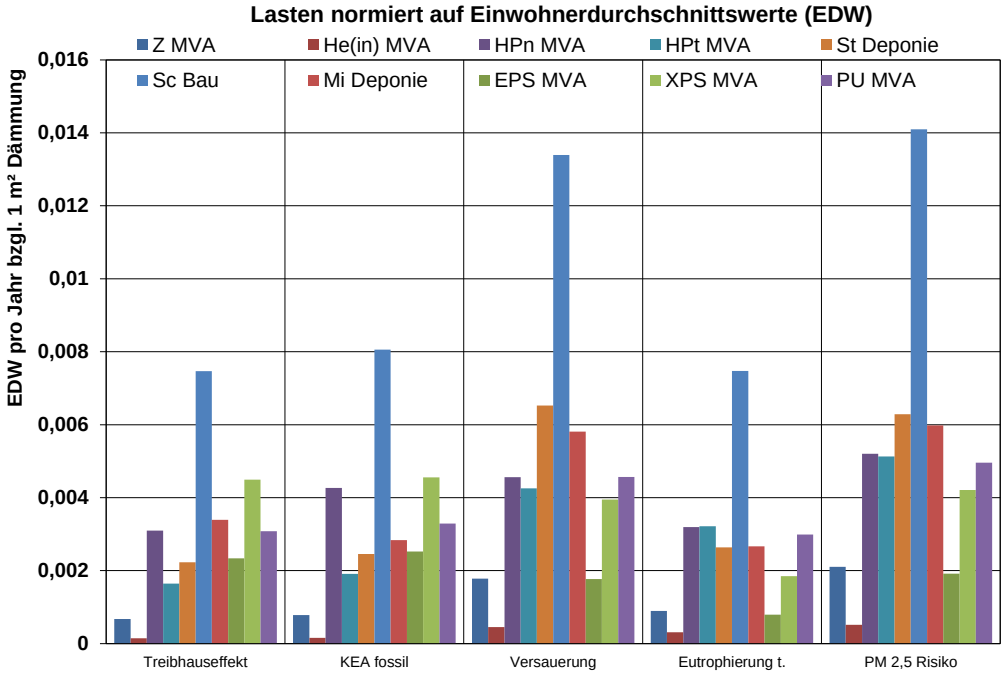
Betrachtete Dämmstoffe: Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-35: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe im Flachdach, schwer, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo



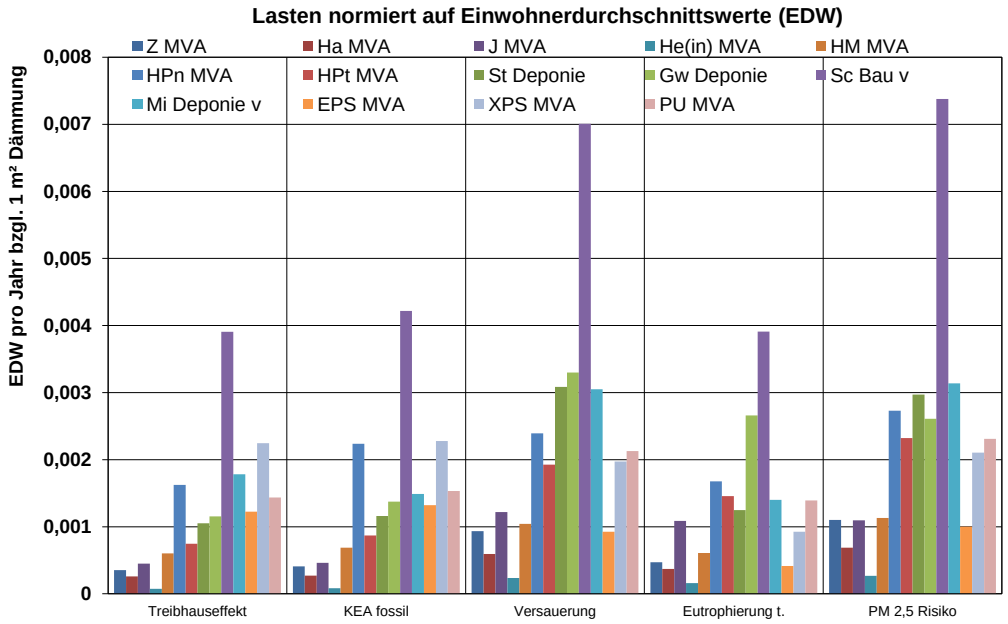
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-36: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, leicht, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo



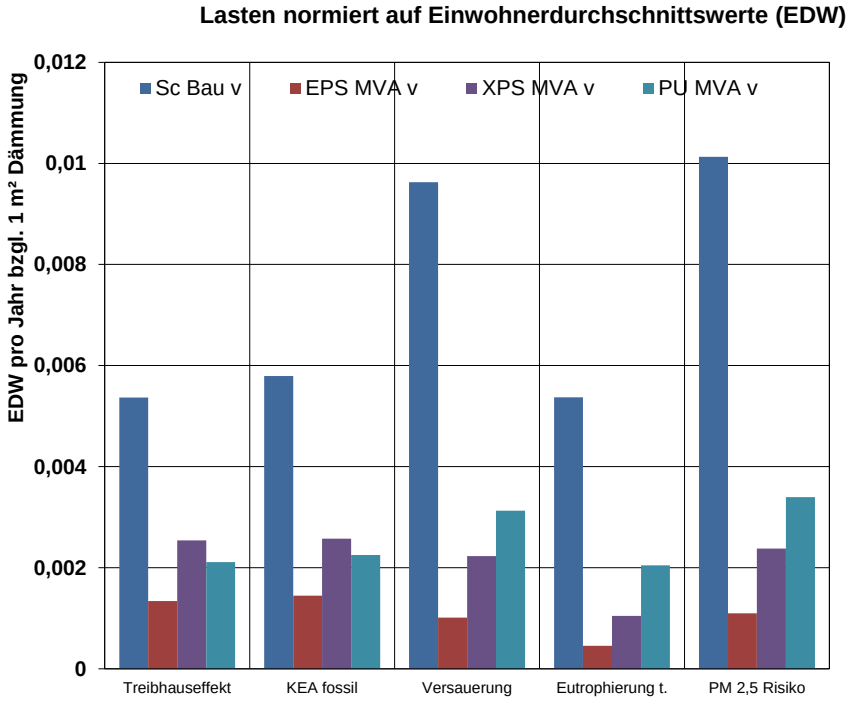
Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Holzfasereinblas (Hein), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-37: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe in der obersten Geschossdecke, schwer, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo



Betrachtete Dämmstoffe: Zelluloseeinblas (Z), Hanf (Ha), Jute (J), Holzfasereinblas (Hein), Holzmatte (HM), Holzfaserplatte nass (HP n), Holzfaserplatte trocken (HP t), Mineralfaserplatte (St), Glaswolle (Gw), Schaumglasplatte (Sc), Mineralschaumplatte (Mi), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-38: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerdecke, unten, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo



Betrachtete Dämmstoffe: Schaumglasplatte (Sc), EPS-Platte, XPS-Platte, PU-Platte
Abkürzungen Systeme: Kapitel 6.2.1

Abbildung 8-39: Auf Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) normierte Lasten für die betrachteten Dämmstoffe an der Kellerwand, außen, nach dem 50:50-Ansatz mit Entsorgung am Lebensende wie im Status Quo