




INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Der Gebäudebestand steht vor einer Sanierungswelle – Dämmstoffe müssen sich den Materialkreislauf erschließen

Endbericht

Forschungsprojekt, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (AZ
34426_02-25) 

und dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-
Württemberg 

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Joachim Reinhardt, Corvin Veith, Florian Knappe, Peter Mellwig

Heidelberg, 2022



Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Az **34426 02-25**

Antragstitel **Der Gebäudebestand steht vor einer Sanierungswelle – Dämmstoffe müssen sich den Materialkreislauf erschließen**

Stichworte Dämmstoffe; Kreislaufführung, Entsorgung, Ökobilanzierung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
13 Monate	23.11.2018	31.12.2021	1

Zwischenberichte 1

Bewilligungsempfänger ifeu Heidelberg gGmbH

Tel 06221 4767-0

Fax 06221 4767-19

Projektleitung

Florian Knappe

Bearbeiter

Joachim Reinhardt, Corvin Veith, Florian Knappe, Peter Mellwig,

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Im Rahmen dieser Studie erfolgt eine Analyse der Verwertungswege der Dämmstoffe Stein- und Glaswolle, Expandiertes Polystyrol (EPS), Extrudiertes Polystyrol (XPS), Polyurethan (PU) sowie Holzfaserdämmstoffe. Ziel ist die Identifikation der organisatorischen, technischen und wirtschaftlichen Hemmnisse, die einer stofflichen Verwertung entgegenstehen. Dabei gewonnene Erkenntnisse und Daten wurden zudem dazu genutzt, die ökologische Bewertung der verschiedenen für die Dämmstofftypen zur Verfügung stehenden Entsorgungsoptionen neu zu bewerten und damit die Ökobilanzen aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt (DBU AZ 34426_01) ggf. fortzuschreiben. Um sich der Relevanz der Kreislaufführung von Dämmstoffen bewusst werden zu können, erfolgt zudem eine rechenmodellbasierte Prognose der zu erwartenden Dämmstoffmengen aus dem Rückbau bis 2050.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Diese Analysen erfolgen entlang der Akteurskette vom Rückbau bzw. der Anfallstelle der Dämmstoffabfälle bis zum Dämmstoffhersteller. Im engen Austausch mit den Akteuren werden Lösungsansätze herausgearbeitet und bewertet und wichtige Schnittstellen zwischen den Akteuren identifiziert.

Die Analyse erfolgt dabei „von hinten“, beginnend bei den Dämmstoffherstellern. Die für eine Rückführung in die Produktion erforderlichen Qualitäten werden erfasst und entlang der Akteurskette über Spezifikationen bis zur Baustelle weitergegeben. Die betrachteten Akteure sind: Dämmstoffhersteller, Sekundärrohstoffhersteller, Sortierer/Entsorger, Containerdienste und Rückbau-/ Abrissunternehmen sowie Akteure auf Sanierungsbaustellen (Bauhandwerk, Bauwirtschaft). Die Untersuchung ist auf Baden-Württemberg ausgerichtet, wobei auch Dämmstoffhersteller einbezogen wurden, die ihre Standorte außerhalb der Landesgrenzen haben, um alle Dämmstofftypen in die Untersuchung einbeziehen zu können. Im Rahmen des Projektes wurden auch Anlagenbesuche durchgeführt. Für die Berechnungen der Ökobilanzen kommt die Software Umberto zum Einsatz. Die Mengenprognosen erfolgen durch das Gebäudemodellierungstool (GEMOD) vom ifeu.

Ergebnisse und Diskussion

Bis dato werden Dämmstoffe entweder energetisch genutzt (über Müllverbrennungsanlagen oder als Ersatzbrennstoff) oder im Falle Mineralwollen auf Deponien abgelagert. Andere mineralische Dämmstoffe, die bislang nur in kleinen Mengen zum Einsatz kommen, sind Bestandteil der Entsorgung von mineralischen Bauabfällen, haben dort aber keinen dezidierten Nutzen.

Aus ökologischer Sicht ist eine stoffliche Verwertung insbesondere von synthetischen Dämmstoffen vorteilhaft. Noch besser wäre eine Wiederverwendung. Für die in der Entsorgungswirtschaft aktuell relevanter werdenden Dämmstoffe EPS und Mineralwollen konnten erste stoffliche Verwertungswege aus dem Rückbau und der Sanierung von Gebäuden identifiziert werden.

Für in Produktion und auf Baustellen anfallende Verschnittreste bestehen für die betrachteten Dämmstofftypen stoffliche Verwertungsverfahren, die aus technischer Sicht auch für rückgebaute Dämmstoffe möglich wären, sofern die erforderlichen Reinheitsgrade und stofflichen Zusammensetzungen beachtet werden. Diese unterscheiden sich innerhalb der Dämmstofftypen.

Ein wesentliches Hemmnis ist die Verunreinigung der Dämmstoffe, die eine stoffliche Verwertung erschwert. Der Grad der Verunreinigung geht vorrangig mit der Verbauweise der Dämmstoffe einher. Dämmstoffe, die aktuell in Verbundsystemen verbaut sind, können nicht ohne Anhaftungen von Putz und Mörtel (Kleber) rückgebaut werden. Hier sind nachfolgend weitere gezielte Aufbereitungsschritte erforderlich.

Ein sortenreiner und möglichst rückstandsfreier Rückbau der Dämmstoffe ist Aufgabe der Baustellenakteure und erleichtert die anschließende Aufbereitung oder macht sie dadurch erst möglich. Auf Baustellen ist eine sortenreine Bereitstellung der Dämmstoffe trotz Platzmangel mit Zusatzaufwand möglich, wenn auf bspw. Big Bags zurückgegriffen wird und eine gute Zusammenarbeit mit Containerdiensten etabliert ist. Containerdienste können sich auch über verschiedene Containergrößen und Fahrzeuggrößenklassen flexibel auf die verschiedenen Anforderungen an Baustellen ausrichten.

Werden Dämmstoffe ab Baustelle als gemischte Bauabfälle erfasst, gelangen diese in Vorbehandlungsanlagen. Diese sind nicht immer auf eine umfassende Sortierung ausgelegt. Selbst moderne technisch gut ausgerüstete Anlagen separieren Dämmstoffe derzeit nicht, da für diese Sortierfraktionen zur stofflichen Verwertung noch kein Absatzmarkt vorhanden ist.

In der Branche werden Anlagen entwickelt und erforscht, um Dämmstoffsysteme, die nicht rückstandsfrei rückbaubar sind, bereits ab Baustelle ausreichend vorzubehandeln. Ob mobile Anlagen die erwünschten Reinheitsgrade erreichen, bleibt abzuwarten. Eine umfassende Aufbereitung u.a. von Dämmstoffen in Verbundsystemen und deren Nachsortierung kann wahrscheinlich nur bei Sortieren/Entsorgern in stationären Anlagen erfolgen.

Für die logistischen Herausforderungen etablieren sich erste Lösungen, indem Sammelstellen eingerichtet und Kooperationen zwischen Herstellern und Aufbereitern eingegangen werden. Eine Sammlung kann u.a. bei Sortierern / Entsorgern erfolgen.

Aus Sicht der Hersteller besteht ein zentrales Hemmnis für eine hochwertige stoffliche Verwertung und Rückführung in die Produktion in fehlenden Regelungen zum Abfallende. Denn selbst wenn Dämmstoffabfälle in ausreichend guter Qualität vorliegen, dürfen diese nur dann zurück in die Produktion geführt werden, wenn die Anlage über eine entsprechende immissionsschutzrechtliche Genehmigung verfügt. Bereits bei der Rücknahme von Baustellenverschnitt herrscht vereinzelt Unsicherheit bei dieser Thematik.

Fazit

Der Erfolg der stofflichen Verwertung der Dämmstoffe ist abhängig von dessen Reinheitsgrad in der Bereitstellung ab Baustelle. Selbst lose verbaute Dämmstoffe werden oftmals nicht ausreichend sauber getrennt. Hier sind Rückbauunternehmen sowie das Bauhandwerk gefordert, den gesetzlichen Pflichten gemäß GewAbfV zur Getrennthaltung nachzukommen. Eine diesbezüglich standardisierte Vergabepaxis würde deren Umsetzung unterstützen und sicherstellen, dass gesetzliche Standards im Wettbewerb nicht unterlaufen werden können. Zur Stützung der stofflichen Verwertung und Getrennthaltung ab Baustelle wäre eine Erweiterung der Abfallschlüssel nach Abfallverzeichnisverordnung hilfreich, um nach Dämmstofftypen unterscheiden zu können.

Ein großes Hemmnis ist zudem die aufwändige Rückbaubarkeit von WDVS. Hier bedarf es weiterer Forschung, die es ermöglicht, die Dämmstoffe ab Baustelle in den erforderlichen Qualitäten bereitzustellen. Ob diese Aufbereitung in mobilen Anlagen vor Ort stattfinden kann, ist abhängig vom Dämmstofftyp und der Größe der Baustelle. Zielführender scheint eine gezielte Ausrichtung der etablierten Entsorgungswirtschaft auf eine flächendeckende Aufbereitung von Dämmstoffen. Die Aufbereiter dienen damit auch als regionale Sammelstelle. Hierzu werden in der Branche und Forschung bereits erste Konzepte erarbeitet.

Die Gewinnung von Sekundärrohstoffen ist häufig mit höheren Kosten verbunden als die Gewinnung von Primärrohstoffen. Lösungen zur Aufbereitung von Dämmstoffen und die Entwicklung neuer Produkte mit Sekundärrohstoffanteil müssen unterstützt und gefördert werden. Parallel dazu sollte entsprechend den gesetzlichen Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zur Abfallhierarchie die sonstige (energetische) Verwertung oder Beseitigung der Abfallmassen nur im Ausnahmefall ermöglicht werden.

Sobald ein Absatzmarkt für Sekundärrohstoffe etabliert ist, erschließen sich für die Entsorger neue Absatzwege und regen diese zu neuen Investitionen an. Andersherum warten die Produkthersteller auf ein ausreichendes Angebot von hochwertigen Sekundärrohstoffen auf dem Markt, bevor in neue Techniken und Verarbeitungsverfahren investiert wird. Erste Kooperationen zwischen Herstellern und Entsorgern zeichnen sich ab. Diese gilt es zu unterstützen.

Dämmstoffe wie z.B. diejenigen aus nachwachsenden Rohstoffen sind erst seit vergleichsweise kurzer Zeit auf dem Markt und können daher nur auf sehr geringe Mengen an Post-Consumer Dämmstoffen als Abfallmassen zurückgreifen. Hier gilt es, weiterhin das Bewusstsein der Kreislaufführung zu stärken und bereits frühzeitig Verwertungskonzepte zu etablieren und zu prüfen, wie sich diese dann auf weitere Regionen übertragen lassen.

Schon bei Konstruktion und Bau sollte darauf geachtet werden, Dämmstoffe so zu verbauen, dass sie später möglichst zerstörungsfrei und rückstandsfrei rückgewonnen werden können.

Die verschiedenen Akteure in der gesamten Verwertungskette müssen über neue Entwicklungen und Lösungsansätze informiert werden und ein gegenseitiges Verständnis entwickeln. Sich etablierende gute Praxisbeispiele zur stofflichen Verwertung von rückgebauten Dämmstoffen sollten kommuniziert werden.

Inhalt

Projektkennblatt	0
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Zusammenfassung und Schlussfolgerung	12
2 Einleitung und Zielsetzung	17
3 Situationsaufnahme Baden-Württemberg	18
3.1 Produktionsstruktur Dämmstoffe	18
3.2 Derzeitige und zukünftige Stoffströme	19
3.2.1 Sanierung	20
3.2.2 Abriss	22
3.2.3 Szenarien	23
3.2.4 Umrechnung Modelloutput in Dämmstoffoutputs	23
3.2.5 Ergebnisse und Diskussion	27
4 Die Kreislaufwirtschaft mineralischer Dämmstoffe	33
4.1 Steinwolle	33
4.1.1 Stoffliche Rückführung in die Produktion	33
4.1.2 Einsatz von Recycling Rohstoffen bei der Herstellung	34
4.1.3 Aufbereitung & Sortierung	35
4.1.4 Sammlung / Erfassung	35
4.1.5 Rückwirkung auf Baustelle	36
4.1.6 Folgerung für Material- und Konstruktionsverbunde	37
4.1.7 Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick	37
4.2 Glaswolle	39
4.2.1 Stoffliche Rückführung in die Produktion	39
4.2.2 Einsatz von Recycling Rohstoffen bei der Herstellung	40
4.2.3 Aufbereitung & Sortierung	40
4.2.4 Sammlung / Erfassung Rückwirkung auf Baustelle Material und Konstruktionsverbunde	41
4.2.5 Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick	41
5 Die Kreislaufwirtschaft von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen	43

Inhalt

5.1	Stoffliche Rückführung in die Produktion	44
5.2	Aufbereitung & Sortierung	44
5.3	Sammlung / Erfassung Rückwirkung auf Baustelle Material- und Konstruktionsverbunde	45
5.4	Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick	45
6	Die Kreislaufwirtschaft von synthetischen Dämmstoffen	47
6.1	Expandiertes Polystyrol (EPS)	47
6.1.1	Stoffliche Rückführung in die Produktion	47
6.1.2	Verwertung als Sekundärrohstoff	49
6.1.3	Stoffliches Recycling über Polystyreneloop (PS Loop)	51
6.1.4	Chemisches Recycling	52
6.1.5	Material und Konstruktionsverbunde	53
6.1.6	Einsatz von Sekundärrohstoffen aus anderen Kunststoffbereichen in der Dämmstoffindustrie	54
6.1.7	Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick	54
6.2	Extrudiertes Polystyrol (XPS)	55
6.2.1	Stoffliche Rückführung in die Produktion durch Sekundärrohstoffherstellung und Verwertung als Sekundärrohstoff	56
6.2.2	Stoffliches Recycling über Polystyreneloop	56
6.2.3	Aufbereitung & Sortierung	57
6.2.4	Sammlung / Erfassung & Rückwirkungen auf Baustelle	57
6.2.5	Einsatz von Sekundärrohstoffen	58
6.2.6	Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick	58
6.3	Polyurethan (PU)	60
6.3.1	Verwertung als Sekundärrohstoff in Klebpressplatten	60
6.3.2	Aufbereitung & Sortierung	61
6.3.3	Sammlung / Erfassung & Rückwirkungen auf Baustelle	61
6.3.4	Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick	62
7	Die weitere Akteurskette	64
7.1	Baustelle	64
7.1.1	Rahmenbedingungen	64
7.1.2	Erfassung und Platzmangel	65
7.1.3	Verbunde	66
7.2	Containerdienste	68

Inhalt

7.3	Sortierer/Entsorger	69
7.4	Sekundärrohstoffhersteller	69
8	Allgemeine Rahmenbedingungen	70
8.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen	70
8.1.1	Gewerbeabfallverordnung und Vergaberecht	70
8.1.2	Erweiterte Herstellerverantwortung	71
8.1.3	Einführung von Recyclingquoten	71
8.1.4	Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht	72
8.2	Finanzielle Rahmenbedingungen und Anreize	73
8.2.1	Sortenreiner Rückbau	73
8.2.2	Subventionen Sekundärer Rohstoffe	73
8.3	Bauliche Rahmenbedingungen	74
8.3.1	Rückbaugerechte Verbauung von Dämmstoffen	74
8.3.2	Materialmix und Verbundbaustoffe	75
8.4	Technik	75
8.5	Akzeptanz und Nachfrage	76
8.6	Logistik	76
9	Ökobilanzieller Vergleich der Entsorgungswege von Post-Consumer-Dämmstoffabfällen Status Quo vs. Stofflich	78
9.1	Entsorgungswege Mineralische Dämmstoffe	79
9.2	Entsorgungswege Synthetische Dämmstoffe	84
9.3	Entsorgungswege Dämmstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen	87
10	Ökologische Amortisationszeiten der Dämmung	92
10.1	Vorgehensweise und Methodik	92
10.2	Ergebnisse	94
	Literaturverzeichnis	97
11	Anhang	101
11.1	Diskussion Belassen von alten Dämmstoffen im und am Gebäude und Marktverteilung Dämmstoffe	101
11.1.1	Befragte Akteure	101
11.1.2	Aktuelle Bedeutung des Belassens alter Dämmstoffe, Möglichkeiten und Probleme	101
11.1.3	Belassungsrate in Abhängigkeit der Bauteile und Akteure	103

Inhalt

11.1.4 Abfrage Dämmstoffmarktverteilung	104
11.2 Ökologische Amortisationszeiten der Dämmung – weitere Gebäudetypen	106

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Qualitätsanforderungen an die Rückführung oder sonstige stoffliche Verwertung von Dämmstoffen	13
Abbildung 3-1: Übersicht Dämmstoffhersteller Baden Württemberg und angrenzend [Quelle Karte: SymplyMaps]	18
Abbildung 3-2: Sanierungszyklen in GEMOD	21
Abbildung 3-3: Output an Dämmstoffvolumen im Rahmen von Sanierungen aus verschiedenen Gebäudetypen über die Zeit	21
Abbildung 3-4: Vorgegebene Verteilung des energetischen Standards der abgerissenen Gebäude	23
Abbildung 3-5: Prognostiziertes Dämmstoffvolumenabfallaufkommen ($\lambda = 0,035$) für Baden-Württemberg im Zuge der Sanierung für das Referenzszenario (links) und das Zielszenario (rechts)	27
Abbildung 3-6: Prognostiziertes Dämmstoffvolumenabfallaufkommen ($\lambda = 0,035$) für Baden-Württemberg im Zuge der Sanierung unter Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude für das Referenzszenario (links) und das Zielszenario (rechts)	28
Abbildung 3-7: Prognostiziertes Dämmstoffvolumenabfallaufkommen ($\lambda = 0,035$) für Baden-Württemberg im Zuge der Abrisstätigkeit für das Referenzszenario (links) und das Zielszenario (rechts)	28
Abbildung 3-8: Prognostiziertes Dämmstoffvolumenabfallaufkommen ($\lambda = 0,035$) für Baden-Württemberg in Summe aus Sanierung und Abrisstätigkeit für das Referenzszenario und Zielszenario ohne (links) und mit Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude (rechts)	29
Abbildung 3-9: Prognostiziertes Abfallaufkommen der verschiedenen Dämmstoffe für Baden-Württemberg als Volumen (oben) und Masse (unten) im Referenzszenario (links) und Zielszenario (rechts) ohne Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude	30
Abbildung 3-10: Prognostiziertes Dämmstoffmassenabfallaufkommen für Baden-Württemberg in Summe aus Sanierung und Abrisstätigkeit für das Referenzszenario und Zielszenario ohne (links) und mit Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude (rechts)	31
Abbildung 3-11: Sehr überschlägig prognostiziertes Dämmstoffmassenabfallaufkommen für Deutschland in Summe aus Sanierung und Abrisstätigkeit für das Referenzszenario und Zielszenario ohne (links) und mit Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude (rechts)	31

Abbildung 4-1: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von Steinwolle	38
Abbildung 4-2: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von Glaswolle	42
Abbildung 5-1: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von Holzfaserdämmstoffen	46
Abbildung 6-1: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von EPS Dämmstoffen	55
Abbildung 6-2: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von XPS Dämmstoffen	59
Abbildung 6-3: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von PU	62
Abbildung 9-1: Bilanzrahmen für den ökologischen Vergleich von Entsorgungsvarianten	79
Abbildung 9-2: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von Steinwolleplatten nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten Nettoergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren	81
Abbildung 9-3: Nettoergebnisse im Treibhauseffekt für die Entsorgungswege vs. Wiederverwendung der Steinwolleplatten	82
Abbildung 9-4: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von Glaswolleplatten nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten Nettoergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren	83
Abbildung 9-5: Nettoergebnisse im Treibhauseffekt für die Entsorgungswege vs. Wiederverwendung der Glaswolleplatten	84
Abbildung 9-6: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von EPS-Dämmplatten nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten Nettoergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren	85
Abbildung 9-7: Nettoergebnisse im Treibhauseffekt für die Entsorgungswege vs. Wiederverwendung der EPS-Dämmplatten	86
Abbildung 9-8: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von PU-Dämmplatten nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten Nettoergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren	87
Abbildung 9-9: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von trocken produzierten Holzfaserdämmplatten nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten	

Nettoergebnissen aller betrachteten
Wirkungskategorien/Indikatoren 89

Abbildung 9-10: Treibhauseffekt für die jetzt schon möglichen Entsorgungswege von trocken produzierten Holzfaserdämmplatten bei Anrechnung einer Kohlenstoffsенке für die Rückführung in die Produktion (schraffierte Balkensektoren) 89

Abbildung 9-11: Nettoergebnisse im Treibhauseffekt für die Entsorgungswege vs. Wiederverwendung der trocken produzierten Holzfaserdämmplatten 90

Abbildung 9-12: Treibhauseffekt für die jetzt schon möglichen Entsorgungswege von trocken produzierten Holzfaserdämmplatten im Falle einer zukünftigen Energieversorgung mit Energie aus erneuerbaren Quellen 91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Dämmstoffhersteller und Veredler nach Dämmstofftypen in Baden-Württemberg	19
Tabelle 3-2: Raten für das Belassen alter Dämmstoffe in den verschiedenen Gebäudeteilen (fett = die für die Modellierung herangezogenen Raten)	22
Tabelle 3-3: Marktanteil der Dämmstoffe über die Zeit und Gesamtvolumina (kursiv) für Deutschland; fett = die für die Modellierung herangezogenen Marktanteile	25
Tabelle 3-4: Angesezte Dämmstoffeigenschaften	27
Tabelle 7-1: Zusammenfassung der Hemmnisse und Lösungen auf der Baustelle	67
Tabelle 10-1: Dämmstoffdicken und –volumina sowie dadurch eingesparte Heizenergie in einem Einfamilienhaus, das vom ungedämmten Zustand auf den KfW-Effizienzhausstandard 55 gedämmt wird (Reinhardt et al. 2019)	92
Tabelle 10-2: Eigenschaften und daraus resultierende Volumen- und Massenverhältnisse zwischen den weiteren betrachteten Dämmstoffen relativ zu EPS	94
Tabelle 10-3: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Einfamilienhauses auf den KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe	95
Tabelle 10-4: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Mehrfamilienhauses auf den KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe	95
Tabelle 10-5: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Büro- und Verwaltungsgebäudes in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe	96
Tabelle 11-1: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Gebäudes zur Beherbergung/Gastronomie bzw. einer Klinik in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe	106
Tabelle 11-2: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Gebäudes für Handel/Dienstleistung bzw. eines Praxisgebäudes in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe	106

Tabelle 11-3: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Gebäudes für Gewerbe/Industrie in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe 107

Tabelle 11-4: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten sonstigen Nichtwohngebäudes in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe 107

Abkürzungsverzeichnis

AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
BHKW	Biomasseheizkraftwerk
CaO:	Calciumoxid
EBS	Ersatzbrennstoff
EI	ecoinvent
el	elektrisch
EPS	Expandierte Polystyrol
Eutrophierung t. oder Eutroph. t.:	terrestrisches Eutrophierungspotenzial
FCKW	Fluor-Chlorkohlenwasserstoffe
GEMOD	Gebäudemodell (Prognosetool ifeu)
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
HBCD	Hexabromcyclododecan
HBCD-frei	Konzentration von HBCD liegt unter Grenzwert: 100 ppm (mg/kg)
HFCKW	Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
HKW	Heizkraftwerk
Kap	Kapitel
KEA fossil	fossiler kumulierter Energieaufwand
M.-%:	Masseprozent
MVA	Müllverbrennungsanlage
MW	Mineralwolle
NaWaRo	nachwachsende Rohstoffe
Nr	Nummer
O. oder Opt. x:	Option
PM 2,5	PM 2,5-Potenzial (Feinstaub)
PS	Polystyrol
PS Loop	PolyStyreneLoop
PU	Polyurethan
RC	Recycling
th	thermisch
Versau.	Versauerungspotenzial
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
XPS	Extrudiertes Polysterol

1 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die zehn wichtigsten Erkenntnisse, Aussagen und Forderungen aus dem Forschungsvorhaben sind:

- Bis 2050 verdoppelt sich das Dämmstoffaufkommen in Baden-Württemberg fast von ca. 40.000 t / a auf ca. 70.000 t / a; sollen die Klimaschutzziele erreicht werden, ist dies mit einer Verfünffachung des Aufkommens bis 2050 verbunden.
- Falls es Schadstoffe und Baukonstruktionsarbeiten zulassen, sollten alte intakte Dämmstoffe im und am Gebäude belassen und durch neue Dämmschichten ergänzt werden.
- Durch eine bis dato kaum praktizierte stoffliche Verwertung könnten bei derzeitigem Abfallaufkommen nach dem Referenzszenario knapp 31.000 t CO₂-Äq. pro Jahr gegenüber einer Beseitigung in MVAs bzw. auf Deponien eingespart werden.
- Aus technischer Sicht ist ein Recycling und stoffliche Verwertung für die aktuell relevantesten Dämmstoffe Mineralwolle (Stein- und Glaswolle) sowie EPS bereits heute möglich.
- Das Recycling von synthetischen Dämmstoffen ist vor allem aus Sicht des Klimaschutzes wichtig. Das im Produkt enthaltene Erdöl kann im Kreislauf gehalten werden. Produktionslasten lassen sich einsparen.
- Das Recycling von mineralischen Dämmstoffen trägt wesentlich zur Schonung der knapper werdenden Deponieflächen und zum Ressourcenschutz bei. Eine Ablagerung von Mineralwollen (Glas- und Steinwolle) auf Deponien sollte nur im Ausnahmefall erfolgen, bspw. bei entsprechenden Verunreinigungen und Schadstoffbelastungen.
- Dämmstoffe müssen ab Baustelle möglichst sortenrein und sauber bereitgestellt werden, damit die für eine stoffliche Verwertung benötigte Qualität erreicht werden kann. Das muss durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen, ihre Umsetzung und Überwachung in der Praxis sowie eine entsprechende Ausgestaltung von Ausschreibung und Vergabe gewährleistet werden.
- Für die Aufbereitung von WDVS-Systemen müssen technische Lösungen entwickelt werden.
- Dämmstoffprodukte, die (in Anteilen) auf Rohstoffe aus dem Materialkreislauf zurückgreifen, sollten durch Förderprogramme, Investitionshilfen, Erweiterung der Herstellerverantwortung, dämmstoffmarktangepasste Recyclingquoten, Eingang in Zertifizierungssysteme zum nachhaltigen Bauen und Verteuerung der Beseitigungsoptionen bzw. Umsetzung der Vorgaben zur Abfallhierarchie gestützt werden.

- Klarstellung der rechtlichen Aspekte zur Abfalleigenschaft und ggf. Hilfestellung bei Genehmigungsverfahren. Diesbezüglich auch Zusammenarbeit mit Sekundärrohstoffherstellern.

Das stoffliche Recycling von Dämmstoffen ist aus ökologischer Sicht vorteilhafter als der aktuelle Status Quo, bei dem je nach Dämmstofftyp in der Regel eine Verbrennung / energetische Verwertung oder Deponierung erfolgt.

Für die derzeit relevantesten Dämmstoffe aus der Kreislaufwirtschaft (Mineralwollen und EPS) etablieren sich aktuell bereits stoffliche Verwertungswege. Das größte Hemmnis, das diesen Verwertungswegen entgegensteht, ist die geforderte Sortenreinheit und Sauberkeit der Dämmstoffe (gegenüber Fremd- und Störstoffen) sowie die aufgrund der derzeit noch vergleichsweise geringen Abfallmengen unwirtschaftliche Infrastruktur, um diese in der erforderlichen Reinheit (vergleiche Abbildung 1-1) rückführen zu können.

Dämmstoff	Erforderliche Qualität für Rückführung in die Produktion	Erforderliche Qualitäten für sonstige stoffliche Verwertung*
Steinwolle	Sauber und sortereinrein Leichte Verunreinigungen tolerabel Unkomprimiert oder komprimiert	Aktuell ist keine weitere stoffliche Verwertung etabliert
Glaswolle	Sauber und sortereinrein Leichte Verunreinigungen tolerabel Unkomprimiert oder komprimiert	Glasritzenherstellung: Sauber und sortereinrein lose oder komprimiert Leichte Verunreinigungen tolerabel
Holzfasern	Sauber und sortereinrein (keine Toleranzen) Unkomprimiert	Aktuell ist keine weitere stoffliche Verwertung etabliert
EPS	Sauber und sortereinrein (keine Toleranzen) Unkomprimiert HBCD - frei	EPS Perlen (z.B. Leichtestrich): leichte Verunreinigungen, HBCD-frei Regranulierung durch Extrusion: sauber, komprimiert möglich, HBCD-frei PS-Loop: Sauber mit bis zu < 7 Gew.-%, komprimiert möglich
XPS	Sauber und sortereinrein (keine Toleranzen) Unkomprimiert HBCD- / (H)FCKW - frei	Regranulierung durch Extrusion: sauber, komprimiert möglich, HBCD- / (H)FCKW - frei PS-Loop: Sauber mit bis zu < 7 Gew.-%, komprimiert möglich
PU	Keine direkte Rückführung in die Produktion möglich	Klebpessplatten: Verunreinigungen von ca. 5 – 15 M.-% möglich, komprimiert möglich (H) FCKW frei

■ In Anwendung für Dämmstoffe aus dem Rückbau (Post-Consumer)
■ In Testphase für Dämmstoffe aus dem Rückbau (Post-Consumer)

* Für alle Dämmstofftypen gilt: Eine Wiederverwendung ist dann möglich, wenn die Dämmstoffe unbeschädigt vorliegen und in ihrer Funktionalität den entsprechenden Anforderungen genügen.

©ifeu

Abbildung 1-1: Qualitätsanforderungen an die Rückführung oder sonstige stoffliche Verwertung von Dämmstoffen

Es ist nicht davon auszugehen, dass sich die stofflichen Verwertungswege in den nächsten Jahren dahingehend entwickeln, dass auch deutlich verunreinigte Dämmstoffe stofflich

verwertet werden können. Folglich ist eine Optimierung ab Baustelle, dem Anfallort der Dämmstoffe erforderlich, um die Qualitätsanforderungen der Recyclingsysteme zu erfüllen.

Ein wichtiger Hebel zur notwendigen Getrennthaltung ab Baustelle ist der Vollzug der GewAbfV und dessen strengere Überwachung. Hier würde zudem eine Erweiterung der Abfallschlüssel helfen, um Dämmstoffe auch getrennt nach Dämmstofftypen und damit Materialien zu halten. Auch weitere rechtliche Regelungen auf Landesebene können dazu dienen, die Sensibilisierung zum selektiven Rückbau zu erhöhen (siehe § 3 Abs. 4 Landes-Kreislaufwirtschaftsgesetz BW). Durch Sammlung in Big Bags und eine gute Abstimmung mit den Containerdiensten ist eine getrennte Bereitstellung auch auf Baustellen mit beengten Platzverhältnissen leistbar.

Bei zu großer Materialvielfalt und entsprechenden Materialverbunden z.B. durch WDVS kann eine komplexere Anlagentechnik in der Vorbehandlung erforderlich werden, um den notwendigen Reinheitsgrad für das eigentliche Recycling zu erreichen. Diese Technik kann aber vor allem auf kleinen Baustellen nur schwer zur Verfügung gestellt werden. Etablierte Aufbereitungs- und Vorbehandlungsanlagen verfügen vereinzelt bereits über die erforderlichen Techniken, konnten allerdings noch keinen Absatzmarkt für die erzeugten Sortierfraktionen identifizieren, der einen finanziellen Anreiz für den deutlich höheren Aufwand gewährt. Andersrum könnte ein hoch selektiver Rückbau diese erforderliche Aufbereitung unnötig machen, da dann die Verbunde bereits auf der Baustelle vergleichsweise sortenrein getrennt werden könnten. Ein Trennen bereits ab Baustelle ist nur dann sinnvoll, wenn diese auch in ausreichenden Qualitäten möglich ist. Aktuell werden mobile Anlagen zu diesem Zweck entwickelt. Eine Erprobung steht noch aus.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass es eines guten Zusammenspiels aus selektivem Rückbau und verbesserter Aufbereitungstechnik bedarf. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf. So beschäftigen sich bspw. aktuelle Studien ausschließlich mit dem Recycling gesamter WDVS und berücksichtigen nicht die Möglichkeiten der Vorbehandlung bereits auf der Baustelle (bspw. Abtrennung von Armierungsgewebe samt Putzschicht). Auf der anderen Seite gilt es zu prüfen, inwieweit die Aufbereitung und Verwertung eines hoch selektiv rückgebauten Dämmstoffes tatsächlich mit geringerem Aufwand durchgeführt werden kann und trotzdem den geforderten Spezifikationen entspricht

Erste logistische Lösungen in Form von Sammelstellen und Kooperationen mit Entsorgern, die ggf. auch eine Komprimierung umfassen, etablieren sich in der Branche. Treiber sind die novellierte Deponieverordnung, die 2024 in Kraft tritt, sowie sich etablierende Verwertungswege, die wirtschaftlich interessante Entsorgungswege versprechen. Auch die GewAbfV sollte konsequenter vollzogen werden, was ein Umdenken auf den Baustellen beschleunigen kann.

Beispielgebende Hersteller von Dämmstoffen oder auch Produzenten von Sekundärrohstoffen, die hohe Investitionen in Anlagentechnik und Produktentwicklung schultern müssen, um hohe Recyclingquoten und Verwendung von Rohstoffen aus dem Materialkreislauf zu ermöglichen, gilt es zu stützen. Förderprogramme für Bauherren zum Einsatz von Dämmstoffen, die ihre Rohstoffe (in Anteilen) aus dem Materialkreislauf beziehen und eine allgemeine erweiterte Herstellerverantwortung sowie Recyclingquoten, könnten den Technologiefortschritt beschleunigen. Auch Unternehmer, die eine hoch selektive Entkernung und Rückbau oder auch Sanierung sicherstellen, sollten durch einen einheitlichen Vollzug der gesetzlichen Rahmenbedingungen und eine entsprechende Ausschreibung, die diesbezüglich klare Standards setzt, gestützt werden.

Die Akzeptanz und Nachfrage nach Produkten mit Sekundärrohstoffanteil kann dadurch erhöht werden, dass Zertifizierungssysteme zum nachhaltigen Bauen (BNB, DGNB) den Einsatz derartiger Baustoffe fordern und honorieren. Nur bei entsprechender Nachfrage wird sich eine hierfür notwendige Recyclinginfrastruktur auf dem Markt etablieren können.

Gleichzeitig gilt es, die Rechtssicherheit über die gesamte Akteurskette hinweg zu verbessern. Dies gilt insbesondere für die Rückführung von Altmaterialien in die Produktion. Hier sind einerseits die Unternehmen gefragt, entsprechende Ressourcen für dazu notwendige Genehmigungsverfahren bereit zu stellen. Auf der anderen Seite müssen klare Regelungen zum Abfallende gefunden werden, die mit einer hochwertigen Aufbereitung und dem qualitätsgesicherten Erreichen von Produkt- und Rohstoffspezifikationen verbunden sein sollte, wie auch im Koalitionsvertrag 2021 der neuen Bundesregierung explizit benannt.

Zuletzt gilt es, die zur Optimierung des Materialkreislaufes erforderlichen Informationen in die Fläche zu bringen. Informationskampagnen über die gesamte Akteurskette hinweg sind erforderlich. Zum einen, um die aktuelle Entsorgungswirtschaft über alternative Verwertungswege zu informieren und die aktuelle Kreislaufführung zu stärken. Zum anderen sollte aber auch ein zukünftiges Recycling bereits heute mitgedacht und auf die mögliche Entsorgungsproblematik bspw. von WDVS hingewiesen werden, sofern sich diese am Ende der Nutzungszeit nicht ausreichend gut auftrennen lassen.

Die Wiederverwendung, die nicht im Fokus dieses Forschungsprojektes stand, ist unumstritten die aus ökologischer Sicht die vorteilhafteste Form der Kreislaufwirtschaft, so sie den dann geltenden Produktnormen und resultierenden Anforderungen entspricht. Die Qualitätsanforderungen sind enorm hoch. Auch optisch müssen die rückgebauten Dämmstoffe höchsten Ansprüchen genügen, um ausreichend Akzeptanz bei den Bauherren zu finden. Verklebte Dämmstoffe, die sich nicht zerstörungsfrei zurückbauen lassen, werden den Weg der Wiederverwendung nicht gehen können.

Pilotprojekte, die bereits heute bestehenden Möglichkeiten zu einem selektivem Rückbau beispielgebend aufzeigen und so eine stoffliche Verwertung ermöglichen, sollten als Best Practice Beispiele in der Branche kommuniziert werden, um entsprechende Impulse in den Markt hinein zu setzen. Entsorger stehen nicht nur in der stetigen Pflicht, neue hochwertige Verwertungswege zu erschließen, sondern diese Optionen auch offensiv gegenüber ihren Auftraggebern zu kommunizieren.

Perspektivisch werden Vorreiterregionen mit entsprechend entwickelter Entsorgungsinfrastruktur in der Lage sein, eine saubere und sortenreine Bereitstellung der Dämmstoffabfälle zu gewährleisten und ggf. die stoffliche Verwertung erfolgreich zu etablieren. Diese praxisbewährten Erfolgsmodelle gilt es zu identifizieren und hinsichtlich der Erfolgsfaktoren zu analysieren, um sie auf andere Regionen übertragen zu können.

Die ökologische Bewertung der aktuell möglichen Entsorgungswege zeigt, dass die jeweils aufgezeigte stoffliche Verwertungsoption insbesondere bei den synthetischen Dämmstoffen der Status-Quo-Entsorgung vorzuziehen ist. Eine Verwertung von beispielsweise EPS durch PS Loop ist über alle betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren hinweg mit einem deutlichen ökologischen Vorteil gegenüber dem aktuellen Entsorgungsweg –der energetischen Verwertung – verbunden.

Bei den Dämmstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen schneidet die energetische Verwertung bis dato nicht zwangsläufig schlechter ab als die stoffliche Verwertung, was sich in Zukunft mit der Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Quellen aber ändern wird. Eine

Wiederverwendung ist nochmals vorteilhafter als eine stoffliche Verwertung. Dies gilt insbesondere für mineralische Dämmstoffe und Dämmstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen.

Die ökologischen Amortisationszeiten zeigen, wie lange es dauert, bis sich die mit dem gesamten Lebensweg der Dämmstoffe verbundenen Umweltlasten bei einer jetzt schon möglichen stofflichen Verwertung über die damit erzielte Energieeinsparung amortisiert haben. Die Amortisationszeiten sind deutlich kleiner als die Standzeit der Dämmstoffe. Dämmen lohnt sich!

2 Einleitung und Zielsetzung

Die Standards im Gebäudebetrieb zur Senkung des Energiebedarfes sind im Verlauf der vergangenen Jahre deutlich gestiegen. Eine grundlegende Säule zur Erreichung der gesetzten Energiestandards ist die Dämmung der Gebäudehülle. Die gängigsten Dämmstoffe sind mineralischen oder synthetischen Ursprungs. In den letzten Jahren gewinnen aber auch Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) immer weiter an Bedeutung.

Die Relevanz von Dämmstoffabfällen wird in der Entsorgungswirtschaft in den nächsten Jahren voraussichtlich stark zunehmen. Je nach Dämmstofftyp kann die Entsorgung von rückgebauten Dämmstoffen zum einen teuer und zum anderen ökologisch nachteilig ausfallen. Die wachsenden Mengen zu entsorgender Dämmstoffaltmassen müssen von Strukturen aufgefangen werden können, die eine hochwertige und damit möglichst stoffliche Verwertung sicherstellen. Zudem müssen Dämmstoffe durch den Rückgriff auf den Materialkreislauf in der Herstellung umweltfreundlicher werden.

Im Rahmen dieser Studie erfolgt eine Analyse der Verwertungswege der Dämmstoffe Stein- und Glaswolle, Expandiertes Polysterol (EPS), Extrudiertes Polysterol (XPS), Polyurethan (PU) sowie Holzfaserdämmstoffe. Ziel ist die Identifikation der organisatorischen, technischen und wirtschaftlichen Hemmnisse, die einer stofflichen Verwertung entgegenstehen. Diese Analysen erfolgen entlang der Akteurskette vom Rückbau bzw. der Anfallstelle der Dämmstoffabfälle bis zum Dämmstoffhersteller. Im engen Austausch mit den Akteuren wurden Lösungsansätze herausgearbeitet und bewertet und wichtige Schnittstellen zwischen den Akteuren identifiziert.

Die Analyse erfolgt dabei „von hinten“ beginnend bei den Dämmstoffherstellern. Die für eine Rückführung in die Produktion erforderlichen Qualitäten werden erfasst und entlang der Akteurskette über Spezifikationen bis zur Baustelle weitergeben. Die betrachteten Akteure sind: Dämmstoffhersteller, Sekundärrohstoffhersteller, Sortierer/Entsorger, Containerdienste und Rückbau-/ Abrissunternehmen. Die Untersuchung ist auf Baden-Württemberg ausgerichtet, wobei auch Dämmstoffhersteller einbezogen wurden, die ihre Standorte knapp außerhalb der Landesgrenzen haben. Teil der Untersuchung waren auch Anlagenbesuche.

Ein weiteres Ziel war die Prüfung und eventuelle Anpassung der Ökobilanzen, mit denen die verschiedenen Entsorgungsoptionen für die unterschiedlichen Dämmstofftypen bewertet wurden. Der enge Austausch mit den unterschiedlichen Akteuren ermöglichte neue Erkenntnisse, die für die Bewertung berücksichtigt wurden. Zudem erfolgte eine Abschätzung des in Baden-Württemberg zukünftig zu erwartenden Aufkommen an Dämmstoffabfällen aus dem Rückbau.

3 Situationsaufnahme Baden-Württemberg

3.1 Produktionsstruktur Dämmstoffe

In Baden-Württemberg sind eine Vielzahl von Dämmstoffherstellern mit eigenen Produktionsstandorten angesiedelt (siehe Abbildung 3-1). Es handelt sich sowohl um kleine als auch um große international tätige Hersteller.

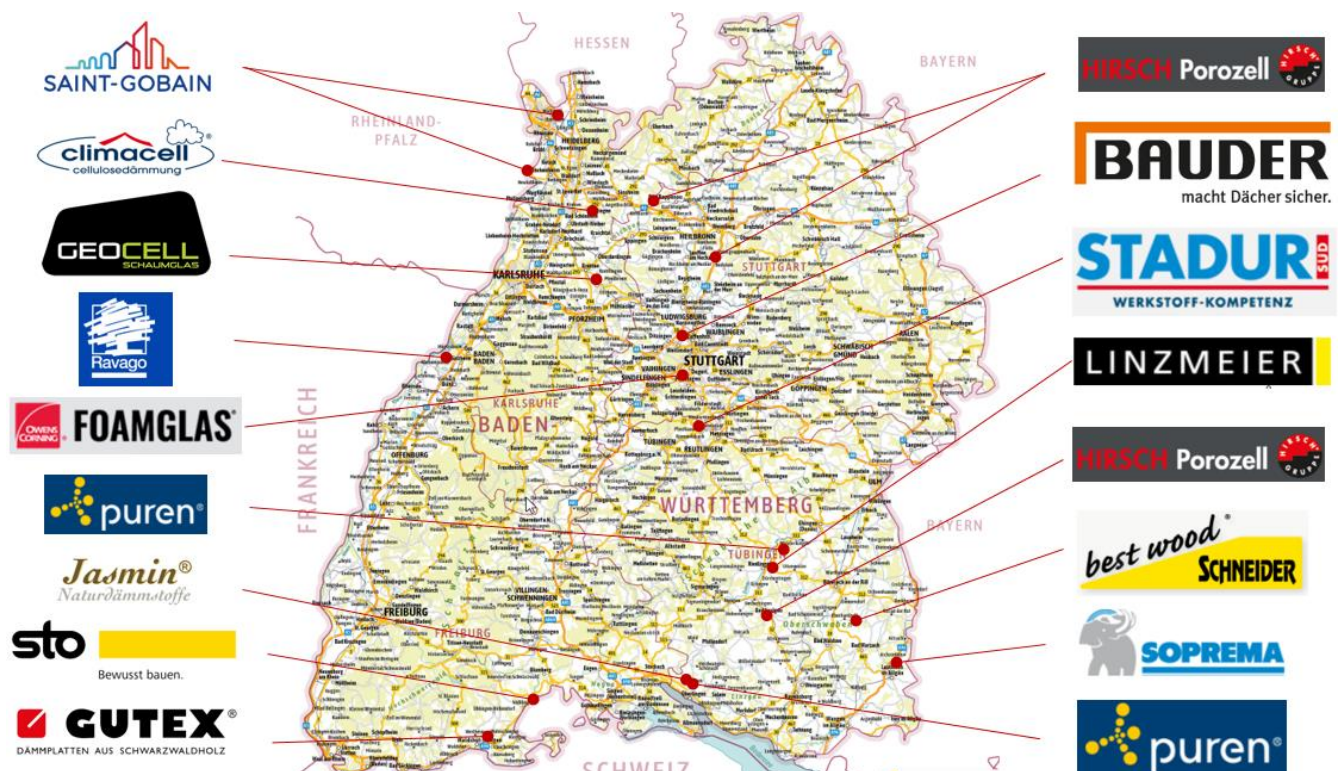


Abbildung 3-1: Übersicht Dämmstoffhersteller Baden Württemberg und angrenzend [Quelle Karte: SymplyMaps]

Folgende Tabelle 3-1 zeigt, welche Dämmstoffe von den jeweiligen Herstellern produziert werden. Nicht jeder Hersteller produziert die Dämmstoffe, die er als Systemlösung (z.B. WDVS) anbietet, auch selber. In diesen Fällen handelt es sich um Weiterverarbeiter bzw. Veredler, die den Dämmstoff von anderen Herstellern beziehen und in ihr eigenes Produkt integrieren bzw. den Dämmstoff noch einmal bearbeiten, wie z.B. mit einer Kaschierung versehen, bevor er in die Vermarktung geht.

Tabelle 3-1: Dämmstoffhersteller und Veredler nach Dämmstofftypen in Baden-Württemberg

Dämmstofftyp	Dämmstoff	Hersteller
Nachwachsend	Cellulose	Climacell CWA Cellulose Werk Angelbachtal GmbH
		GUTEX, H. Henselmann GmbH + Co KG
	Holzfaser	SOPREMA GmbH
		Holzwerk Gebr. Schneider GmbH
Mineralisch	Schaumglas	Holz Lehmhaus GmbH
		Geocell Schaumglas
	Glaswolle	Deutsche FOAMGLAS® GmbH
		Saint-Gobain Isover G+H AG (Rheinlad-Pfalz)
Synthetisch	EPS	Saint-Gobain Isover G+H AG
		HIRSCH Porzozell – 3 Werke
	XPS	Sto SE & Co. KGaA
		Ravago
PU	Paul Bauder GmbH & Co. KG	
	puren GmbH – 2 Werke	
Veredler	XPS, PU u.a. Holz, PU, EPS, XPS, MW	Linzmeier Bauelemente GmbH
		Stadur-Süd GmbH
		Sto SE & Co. KGaA

Im Rahmen des Projektes wurde mit diversen Herstellern – mindestens einer pro Dämmstofftyp – gesprochen und wenn möglich Werksbesichtigungen durchgeführt. Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass diese Gespräche nicht ausschließlich mit Herstellern in Baden-Württemberg geführt wurden. Da die Hersteller und Veredler unterschiedlich ambitionierte Ansätze verfolgen, war es vereinzelt erforderlich, mögliche Lösungsansätze auch mit Herstellern zu besprechen, die keinen Produktionsstandort in Baden-Württemberg haben, ihre Produkte aber dorthin vermarkten.

3.2 Derzeitige und zukünftige Stoffströme

Dämmstoffabfälle kommen aus folgenden Bereichen:

- Sanierung von bereits gedämmten Bauteilen
- Aufkommen bei Rückbau der Gebäude
- Verschnitt bei Neubau und/oder Sanierung
- Dämmstoffe in Innenbauteilen wie Trittschalldämmungen und Feuerschutzanwendungen;
- Innenwände und Decken (in den ersten beiden Tiers enthalten)

Die beiden ersten Bereiche werden in der Prognose der Dämmstoffabfälle berücksichtigt.

Die Prognose dieser Studie erfolgt unter Nutzung des Gebäudemodells GEMOD des ifeu Heidelberg. Es handelt sich dabei um ein Bottom-up-Modell, das für die Bestimmung und Prognose des Heizwärmebedarfs und Endenergiebedarfs mit den einhergehenden Primärenergiebedarfen und Treibhausgasemissionen im Zuge der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser für den Gebäudebestand konzipiert wurde. Der Bestand wird über 52 Wohngebäude- und 182 Nichtwohngebäudetypen in Anlehnung an die Typologie von (Loga et al.

2015) abgebildet. Neben der Gebäudetypologie fließen auch die Transmissionswärmeverluste und damit die Dämmung der Gebäude in das Modell ein. Daraus wird das Aufkommen von Dämmstoffabfällen über Nutzungsdauern, Sanierungstiefen sowie Neubau- und Abrissraten abgeschätzt. Dabei wird die Abhängigkeit von der Gebäudebestandsveränderung und damit u.a. von der Wohnfläche pro Kopf und der Bevölkerungsentwicklung berücksichtigt. Zur Anwendung kommt auch eine Prognose der Wohnflächenentwicklung in Baden-Württemberg. Demnach wächst der Bestand in Baden-Württemberg weiter an, es gibt entgegen dem Bundestrend kein Abfallen der Kurve nach 2040.

Das Modell unterscheidet in folgende Bauteile:

- Dach: umfasst Steildächer, Flachdächer und Geschossdecken
- Fassade
- Keller: umfasst Kellerdecken, Bodenplatten

Das Aufkommen zukünftiger Dämmstoffabfälle lässt sich in den Bereich Sanierung und Abriss unterteilen.

3.2.1 Sanierung

Die Berechnung der Sanierungszeitpunkte erfolgt unter Berücksichtigung von Sanierungsraten auf Basis von Gebäudealter und typischer Verteilung von Nutzungsdauern, indem eine statistische Weibull-Verteilung um mittlere Nutzungsdauern gelegt wird. Nach der Sanierung ist das Bauteil entsprechend lange von weiteren solchen Maßnahmen ausgeschlossen. Ob damit der Eingriff in eine bestehende Dämmung bzw. eine neue Dämmung verbunden ist, hängt von der Tiefe der Sanierung ab. "Pinselsanierungen", die oft nicht im Zusammenhang mit einer Dämmung stehen, nehmen zugunsten von zunächst konventionellen und zukünftig verstärkt ambitionierten Sanierungen immer weiter ab. Damit ist davon auszugehen, dass bei künftig stattfindenden Sanierungsvorhaben auch die Dämmung mit involviert sein wird.

Historische Dämmstärken werden im Modell berücksichtigt. In folgender Abbildung 3-2 ist die resultierende Verteilung der Sanierungstätigkeit eines Gebäudetyps mit Baualter 1919 im Modell dargestellt. Dafür ergeben sich entsprechend der Weibull-Verteilung Sanierungszyklen, die mit fortschreitender Prognosezeit und bei Gebäuden größeren Alters verschwinden. Die ausgeprägtesten Zyklen treten entsprechend bei Gebäuden auf, die aufgrund ihres geringen Alters erstmals zur Sanierung stehen.

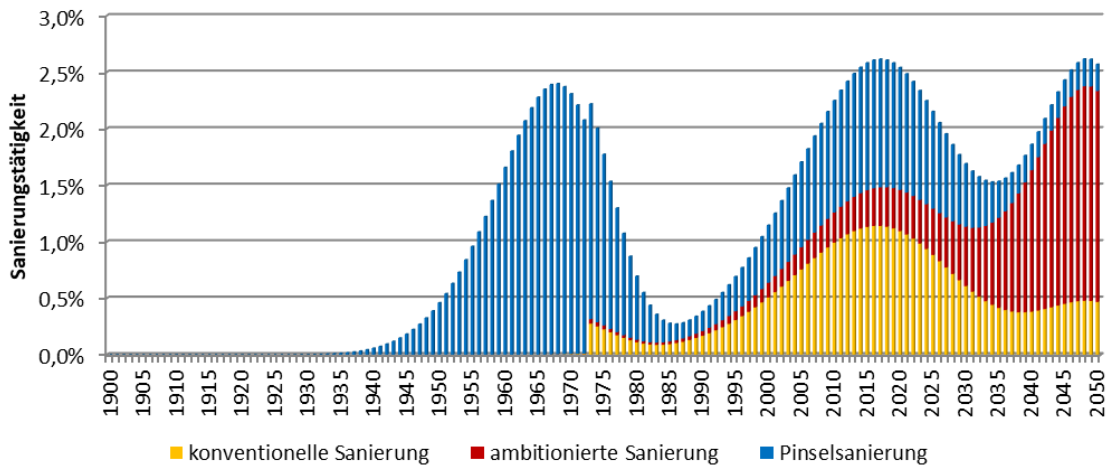


Abbildung 3-2: Sanierungszyklen in GEMOD

Über den gesamten Gebäudebestand überlagern sich diese Zyklen dann, so dass die Sanierungstätigkeit gleichmäßiger verläuft. In den kommenden Jahren könnte vor dem Hintergrund der aktuellen attraktiven Förderbedingungen mit (stark) steigenden energetischen und damit ambitionierten Sanierungen zu rechnen sein. Es ergibt sich ein Dämmstoffvolumen aus der Sanierung, das über die Zeit und die verschiedenen Gebäudetypen aus dem Bestand kommt; Wohngebäude dominieren das Sanierungsgeschehen (Abbildung 3-3).

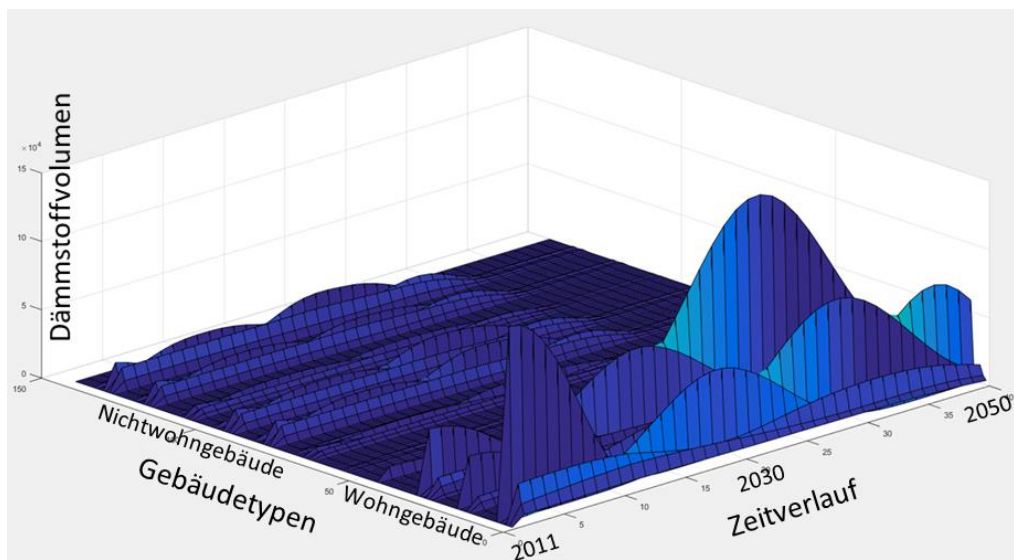


Abbildung 3-3: Output an Dämmstoffvolumen im Rahmen von Sanierungen aus verschiedenen Gebäudetypen über die Zeit

Sanierungen an Bauteilen werden nur durchgeführt, wenn Verbesserungen oder Reparaturen erforderlich sind. Die Sanierung des Daches kann bspw. aus einer Erneuerung der Dach- eindeckung bestehen, ohne dabei die Dämmung zu erneuern oder zum Belassen alter Dämmstoffe im Dach führen. Das Dachgeschoss kann aber auch aus gänzlich anderen Gründen aus- oder umgebaut werden und dennoch fallen die verbauten Dämmstoffe zur Entsorgung an. Die tatsächlich von der Sanierung tangierte Dämmstoffmenge, die potenziell als

Abfall anfallen kann, kann daher im Einzelfall von den im Modell angesetzten Mengen abweichen.

Das Modell geht im ersten Ansatz davon aus, dass bei einer Sanierung die an den Bauteilen vorhandene Dämmung ausgebaut wird und als Abfall anfällt. Dies stellt die Obergrenze des zukünftigen Abfallaufkommens dar, was entsprechend tendenziell überschätzt wird. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass die technische Haltbarkeit von Dämmstoffen in den meisten Fällen 50 Jahre und damit ggf. die Zeit der Sanierungszyklen überschreitet. Aufgrund mangelnder Erfahrungswerte wird der letzte Punkt im Modell nicht berücksichtigt.

Das Belassen alter Dämmstoffe und deren Ergänzung bei Sanierungen im und am Gebäude hingegen wird im Bauhandwerk und der Bauwirtschaft bauteilabhängig mehr oder weniger praktiziert. Die Ergebnisse aus Gesprächen mit diesen Akteuren, auf die im Anhang in Kap. 11.1 eingegangen wird, werden auf die Modellergebnisse angewandt, um eine Abschätzung auch für das dementsprechend reduzierte Abfallaufkommen zu erhalten. Folgende in Tabelle 3-2 genannte Raten werden angesetzt. Sie sind evtl. auch abhängig vom Dämmstoffalter - da ab den 90ern der Dämmstoffaufbau zuverlässiger wird, so dass die später verbauten Dämmstoffe eher verbleiben können -, was in der Modellierung aber nicht berücksichtigt wird. Die Raten werden zukünftig wahrscheinlich eher noch etwas ansteigen, werden hier aber als konstant angesetzt.

Tabelle 3-2: Raten für das Belassen alter Dämmstoffe in den verschiedenen Gebäudeteilen
(fett = die für die Modellierung herangezogenen Raten)

	Angesetzte Werte für Rate Belassen Dämmstoffe	Spannweite aus Abfragen
Steildach	15 %	<20 bis 20 %
Flachdach	2,5 %	0 bis 5 %
oberste Geschossdecke	40 %	Annahme: wie Außenwand
<i>Annahme Dach insgesamt</i>	10 %	
Außenwand	40 %	Selten bis 95 %
Innendämmung	/	/
Perimeter	40 %	Annahme: wie Außenwand
<i>Annahme Fassade insgesamt</i>	35 %	
Kellerdecken	40 %	Annahme: wie Außenwand

3.2.2 Abriss

Der Abriss von Gebäuden, der mit dem Anfall der angebrachten Dämmstoffe als Abfall einhergeht, wird über eine Abrissrate abgebildet, die sich mit der Zeit verändert und auch von der Neubautätigkeit abhängt. Die Verteilung der abgerissenen Gebäude wurde exogen vorgegeben (Abschätzung) und umfasst v.a. ungedämmte Gebäude (Abbildung 3-4). Ältere Gebäude ohne Dämmschichten oder mit dünneren aus heutiger Sicht unzureichenden Dämmschichten werden bevorzugt zurückgebaut. In der derzeitigen Abrisswelle fallen bislang nur wenige Dämmstoffe an. Sobald noch mehr moderne Gebäude u.a. aus dem Gewerbebereich abgerissen werden, ist mit einem höheren Abfallaufkommen an Dämmstoffen zu rechnen. Die verbauten Dämmstoffstärken haben sich entsprechend der Rückmeldung aus dem Bauhandwerk und der Bauwirtschaft fast verdoppelt.

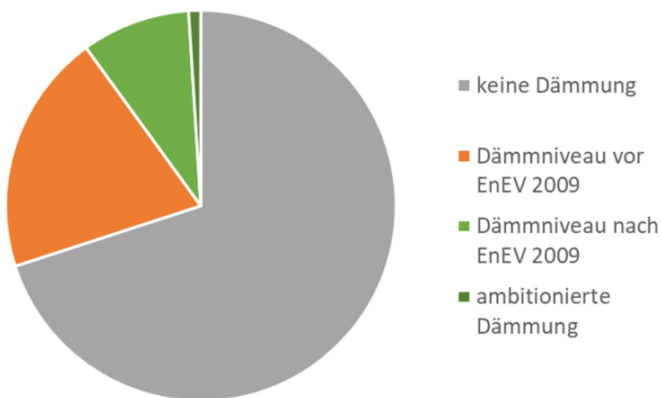


Abbildung 3-4: Vorgegebene Verteilung des energetischen Standards der abgerissenen Gebäude

3.2.3 Szenarien

Im Modell werden zwei **Szenarien**, die sowohl die Sanierungs- als auch die Abrisstätigkeit beeinflussen, betrachtet. Mit dem Referenzszenario sollen die Treibhausgasemissionen für Raumwärme und Warmwasser bis 2050 um 73 % gegenüber 1990 absinken, im Zielszenario um 91 %. Die Beiträge aus Öl- und Gas-Heizungen sinken entsprechend.

Im Referenzszenario ergibt sich damit eine Sanierungsrate und -tiefe auf gleichbleibend derzeitigem Ambitionsniveau. Im Zielszenario halbieren sich die "Pinselsanierungen" bei gleichzeitiger Versechsfachung der ambitionierten Sanierungen und die Sanierungsraten steigen auf 1,9 %, es wird also schneller mehr Dämmstoff verbaut. Weiterhin steigen im Zielszenario die Abrissraten von 0,10 % auf 0,54 %, weil aufgrund der größeren Anstrengung bei der Gebäudeeffizienz die Neubaufortschreibung höher ausfällt und entsprechend mehr Gebäude, darunter auch bereits besser gedämmte, abgerissen und neugebaut werden.

Mit einer größeren Anzahl von Neubauten mit sehr hohen energetischen Standards ergibt sich ein wirksamer Hebel zum Erreichen des Zielszenarios. Durch den Bevölkerungszuwachs der Ballungsräume besteht auch die Notwendigkeit, bestehende Quartiere nachzuverdichten, um mehr Wohnraum auf derselben Grundfläche zur Verfügung stellen zu können. Wichtig: der Abriss insbesondere von bereits sanierten Gebäuden sollte auch aus Ressourcen Gründen grundsätzlich möglichst vermieden werden. Im Referenzszenario sinken die Abrissraten hingegen von 0,10 auf 0,04 %.

3.2.4 Umrechnung Modelloutput in Dämmstoffoutputs

Der direkte Modelloutput liefert differenziert nach Sanierung und Abriss das prognostizierte Volumen an Dämmstoffabfällen aus jeweils Dach, Fassade und Keller, bezogen auf einen generischen Dämmstoff mit einem Wärmeleitfähigkeitswert (λ) von 0,035. Wie oben beschrieben, handelt es sich im Falle der Sanierung um das potenziell maximale Aufkommen, weil das in der Praxis durchaus übliche Belassen alter Dämmstoffschichten und ihre Ergänzung nicht berücksichtigt wird. Das verminderte Aufkommen hierdurch kann aber direkt aus dem Modelloutput für Sanierung ausgerechnet werden.

Die Modelloutputs müssen nun noch vom generischen Dämmstoffaufkommen in konkrete Dämmstoffabfälle umgerechnet werden. Dafür müssen Marktverteilungen der Dämmstoffe

in den verschiedenen Bauteilen abgeschätzt werden. In Summe über alle Bauteile ergibt sich aber wiederum die gesamte Marktverteilung der Dämmstoffe. Daher wird näherungsweise davon ausgegangen, dass auf die Summe des Dämmstoffabfalls aus allen Bauteilen die gesamte Marktverteilung der Dämmstoffe angewendet werden kann. Weiterhin wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die sich die Verteilung der Dämmstoffe im Abfalloutput durch das Belassen von Dämmstoffen nicht verschiebt, obwohl dies bei manchen Bauteilen häufiger praktiziert wird und bestimmte Dämmstoffe in den Bauteilen unterschiedlich häufig eingesetzt werden. Für die Abfallprognose muss die Marktverteilung der Dämmstoffe von jeweils vor ca. 50 Jahren angesetzt werden, weil Dämmstoffe ca. 50 Jahre nach dem Einbau im Zuge von Sanierung und Rückbau von Gebäuden als Abfall anfallen.

Folgende Zahlen sind in Statistiken und Studien enthalten: Der bis Ende 2015 existente Gesamtverband Dämmstoffindustrie (GDI 2013) hat Zahlen zur Marktverteilung der Dämmstoffe ab 1988 bis 2013 auf Volumenbasis - unterschieden nach Mineralwolle, EPS, PU und XPS - angegeben. (FNR 2021) macht Angaben zum Absatzvolumen der Dämmstoffe in Deutschland für 2019, untergliedert nach mineralischen, fossilen und Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, wobei diese auch nach Dämmstoffart (Platten, Matten, Einblas) differenziert werden. (Landeshauptstadt München 2017) macht Aussagen zum Anteil der erneuerbaren Dämmstoffe im Jahr 2011 bzw. ab Mitte der 90er Jahre. Der VDPM weist Zahlen für die Marktverteilung von Dämmstoffen im WDVS von 2016 bis 2021 auf Quadratmeterbasis aus (WDVS 2021).

Für die Prognose lassen sich folgende Daten heranziehen: bis 2038 extrapolierte Daten des GDI von 1988 und ab 2039 die mitlaufenden Zahlen des GDI ab 1989, so dass stets die vor 50 Jahren verbaute Dämmverteilung in der Abfallprognose angesetzt wird. Vereinfachend muss allerdings davon ausgegangen werden, dass die Wärmeleitfähigkeiten und für die Umrechnung in Massen auch die Dichten der damals verbauten Dämmstoffe nicht sehr von den heute üblichen Werten derselben Dämmstofftypen abweichen. Für die früher verbauten Dämmstoffe sind diese Dämmstoffeigenschaften nicht genau bekannt.

Zusätzlich wurde die Verteilung der Dämmstoffe in den verschiedenen Anwendungen von früher und heute beim Bauhandwerk und der Bauwirtschaft abgefragt. Danach dominierte früher im Außenwandbereich EPS, im Dachbereich Glaswolle. Die Ergebnisse aus der Abfrage werden im Detail im Anhang in Kap. 11.1.4 dargestellt.

Zusammenfassend ergibt sich folgende Verteilung für die Marktanteile der Dämmstoffe über die Zeit (Tabelle 3-3). Die herangezogenen Werte sind hervorgehoben dargestellt. Die Werte des GDI liegen von 1988 bis 2013 jahresscharf vor und gehen so auch in die Berechnung ein, werden hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nur für ausgewählte Zeitpunkte dargestellt. Für die Zeit vor 1988 wurde in einer Extrapolation ausgehend von 1988 angenommen, dass die Dämmstoffmengen linear seit ihrem ersten Einsatzjahr angestiegen sind, wobei für Mineralwolle ein Einsatz ab Mitte der 1950er Jahre, für EPS ab 1960 und für PU sowie XPS ab 1968 unterstellt wurde.

Tabelle 3-3: Marktanteil der Dämmstoffe über die Zeit und Gesamtvolumina (kursiv) für Deutschland; fett = die für die Modellierung herangezogenen Marktanteile

	Mineralwolle	EPS	PU	XPS	Holz/nachwachsende /weitere	Σ Mio. m ³
2013 GDI (Mio m ³)	16,4 Mio m ³	9,0 Mio m ³	2,7 Mio m ³	2,0 Mio m ³	2,4 Mio m ³	33
1962 GDI extrapoliert	80,2 %	19,8 %				2,6
1970 GDI extrapoliert	66,9 %	30,2 %	1,9 %	1,0 %	/	6,2
1980 GDI extrapoliert → für Prognose 2030	60,7 %	32,2 %	4,5 %	2,5 %	/	11,1
1988 GDI → 2038	58,7 %	32,9 %	5,4 %	3,0 %	/	15,0
1989 GDI → 2039	59,6 %	31,9 %	5,4 %	3,2 %	/	15,9
1995 GDI → 2045	59,7 %⁰	29,1 %⁰	4,1 %⁰	3,1 %⁰	4,0 % Nachwachsende angenommen⁰ (Verteilung wie bei FNR aktuell angenommen)	31,2
2000 GDI → 2050	58,3 %⁰	28,1 %⁰	4,6 %⁰	4,0 %⁰	5,0 % Nachwachsende angenommen⁰ (Verteilung wie bei FNR aktuell angenommen)	34,3
2019 FNR (2021)	Mineralisch: 43 %		48 %		Nachwachsende: 9 % → davon 58 % Holzfaser, 32 % Zellulose, 10 % Sonstige → davon 24 % Einblas-, 24 % Matten-, 52 % Plattendämmung	38,5
WDVS 2016	23,6 %	62,9 %		9,8 % ²	3,8 % Andere	
WDVS 2020	26,8 %	50,6 %		9,1 % ²	10,8 % Holzweichfaser 2,6 % Andere	
WDVS 2021	26,7 %	50,3 %		8,8 % ²	11,5 % Holzweichfaser 2,7 % Andere	
Außenwand aktuell Abfrage	20-50 %	30-80 %			5-20 % Holzfaser	

	Mineralwolle	EPS	PU	XPS	Holz/nachwachsende /weitere	Σ Mio. m ³
Steildach aktuell und Verlauf Ab- frage	Bis 100 %; Glaswolle 1960-80 dominant	Ja	Ja		Ja, (bis zu >50 %); Ab den 90ern; /Zel- lulose nach den 90ern etwas durch Holz zurückge- drängt Zuvor auch Holz- wolleleichtbauplat- ten	
Flachdach aktuell Ab- frage	Ja; stark zu- genom- men	50 % ¹ ; mittler- weile un- beliebter	50 % ¹ ; hat zu- genom- men		//Schaumglasplat- ten zugenommen, aber noch Nische	
Kellerdecke	20 % ¹	80 % ¹				
Kellerwand				Ja		
Oberste Ge- schossde- cke	50 % ¹	50 % ¹				
Innendäm- mung					//Perlite- bzw. Cal- ciumsilikatdämm- platten	

⁰: korrigiert um angenommenen Anteil Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen;
Quelle: (Landeshauptstadt München 2017) sowie (FNR 2021): lineare Interpolation von
4 % Mitte der 90er Jahre auf 7 % im Jahr 2011 sowie weiter auf 9 % im Jahr 2019
¹: Basis = Schätzung eines Akteurs
²: Sockeldämmplatten
GDI (GDI 2013) und FNR (FNR 2021): Basis = Anteile berechnet aus jeweiligen Mengen
Dämmstoffvolumen in 1.000 m³
WDVS (WDVS 2021): Basis = Anteile an WDVS-Fläche in 1.000 m²
Abfrage: Anteile wurden durch die Akteure abgeschätzt → Basis = eher Anteil an Bauvor-
haben und nicht Dämmstoffvolumen

Bei Mineralwolle wird in Ermangelung an Daten angenommen, dass sich das Volumen zeitunabhängig zu 65 % aus Glas- und 35 % aus Steinwolle zusammensetzt. Für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen wird zeitunabhängig eine Aufteilung entsprechend (FNR 2021) angesetzt. Für die dort aufgeführten sonstigen Dämmstoffe wird je hälftig Hanf- und Jutematten angenommen. Für Zellulose wird angesetzt, dass diese den ebenso dort angegebenen Anteil an Einblasdämmstoffen ausmacht und der Rest in Mattenform zur Verfügung gestellt wird. Für Holzfasern wird angesetzt, dass diese zum einen den verbleibenden Anteil an Mattendämmstoffen darstellen und sonst v.a. in Plattenform bereitgestellt werden, wobei dafür jeweils hälftig das nasse und trockene Herstellungsverfahren angenommen wird. Der Anteil an Holzfasereinblasdämmung wird hingegen vernachlässigt.

Die Umrechnung der jeweiligen Dämmstoffvolumina in Massen erfolgt über die in Tabelle 3-4 angesetzte Dichte. Die Zusammensetzung der Dämmstoffabfälle nach Masse verschiebt sich in Richtung der Dämmstoffe mit der größeren Dichte, also Steinwolleplatten.

Tabelle 3-4: Angesetzte Dämmstoffeigenschaften

Dämmstoff	λ [W/(m*K)]	Dichte [kg/m ³]
Nass prod. Holzfaserdämmplatten	0,048	240
Trocken prod. Holzfaserdämmplatten	0,041	131,1
Holzmatten	0,038	60
Holzfaserinblasdämmung	0,04	32,5
Zellulose	0,0395	41,5
Hanfmatten	0,044	37,5
Jutematten	0,038	37
Steinwolleplatten	0,036	99
Glaswolleplatten	0,035	20
EPS	0,036	23
XPS	0,0365	39
PU	0,023	33

3.2.5 Ergebnisse und Diskussion

In folgender Abbildung 3-5 zeigt sich, dass sich das prognostizierte Dämmstoffvolumen, das als Abfall bei Sanierungstätigkeiten anfällt, bis 2050 mindestens verdoppelt. Mit dem Zielszenario, in welchem der Gebäudebestand auf einen guten energetischen Standard gebracht werden soll, wäre sogar eine Verfünffachung des Dämmvolumenabfallaufkommens zu erwarten. Die Dämmstoffe aus dem Dach stellen dabei den größten Anteil. Die Schwankungen werden durch die Sanierungszyklen im Modell verursacht, die sich gegenseitig verstärken oder abschwächen.

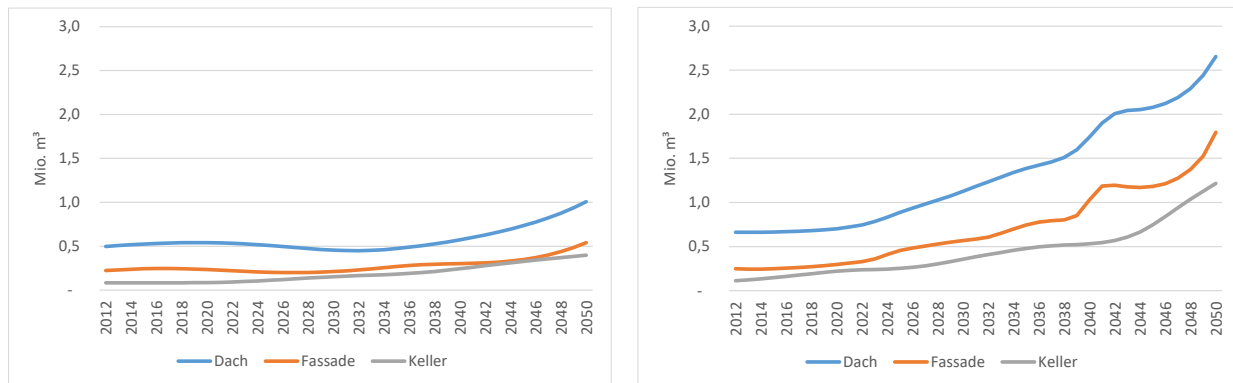


Abbildung 3-5: Prognostiziertes Dämmstoffvolumenabfallaufkommen ($\lambda = 0,035$) für Baden-Württemberg im Zuge der Sanierung für das Referenzszenario (links) und das Zielszenario (rechts)

Durch Belassen der alten Dämmstoffe im und am Gebäude verringert sich insbesondere das Abfallaufkommen aus Fassade und Keller, so dass der relative Beitrag aus dem Dach noch steigt (Abbildung 3-6).

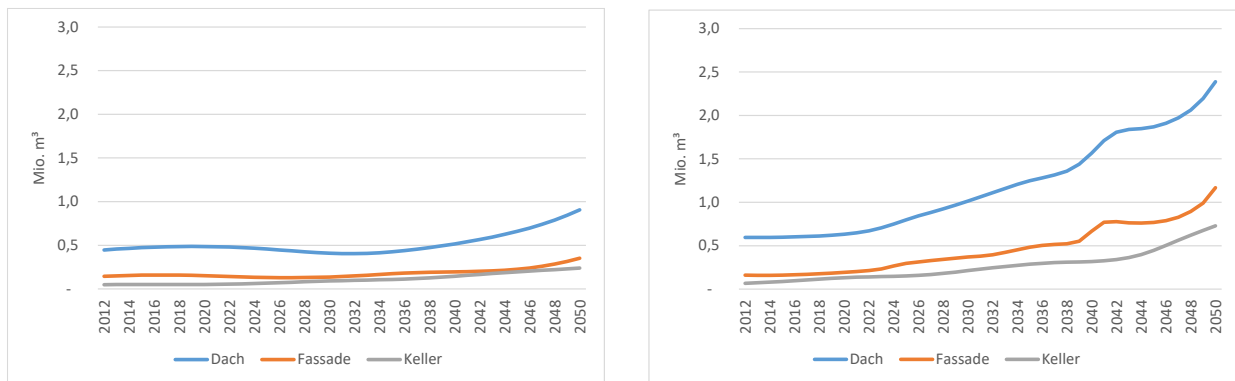


Abbildung 3-6: Prognostiziertes Dämmstoffvolumenabfallaufkommen ($\lambda = 0,035$) für Baden-Württemberg im Zuge der Sanierung unter Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude für das Referenzszenario (links) und das Zielszenario (rechts)

Durch die Abrisstätigkeit wird für Baden-Württemberg ein um ca. Faktor 10 geringeres Aufkommen an Dämmstoffvolumenabfällen im Vergleich zur Sanierungstätigkeit prognostiziert (Abbildung 3-7). Vor diesem Hintergrund gilt es zu bedenken und kritisch zu hinterfragen, dass die Normen v.a. für den Neubau und weniger für Sanierungen gedacht werden (Dachdeckerverband 2021). Im Referenzszenario sinkt das Aufkommen aufgrund der reduzierten Neubaurate bis 2050 sogar geringfügig. Im Zielszenario hingegen steigt es um Faktor fünf an, weil zum Erreichen des hohen Standards neben Sanierung auch der Abriss und Neubau von Gebäuden mit hohen energetischen Standards stattfinden, wobei die abgerissenen Gebäude auch bereits besser gedämmt waren und entsprechend viel Dämmstoffabfall anfällt. Dach und Fassade liefern im Gegensatz zur Sanierung beim Abriss fast denselben Beitrag. Die Stufen im Abfallaufkommen resultieren aus dem Verlauf der Abrissraten.

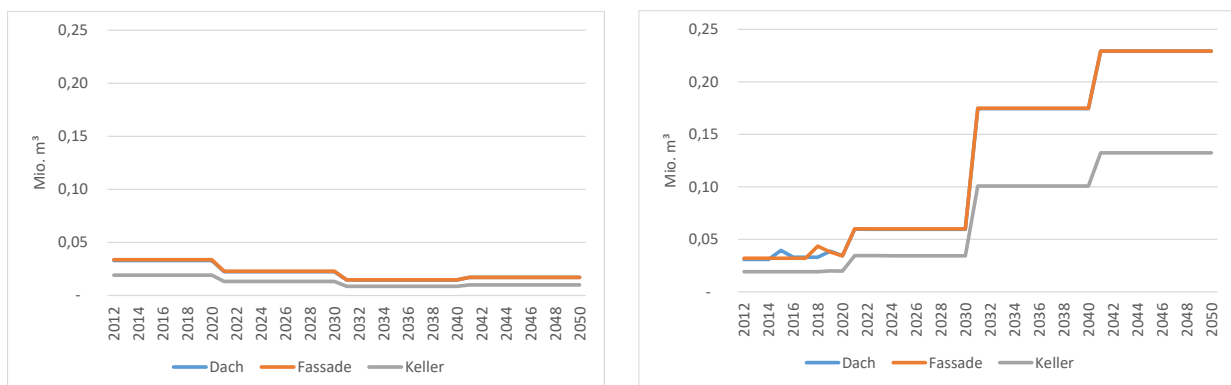


Abbildung 3-7: Prognostiziertes Dämmstoffvolumenabfallaufkommen ($\lambda = 0,035$) für Baden-Württemberg im Zuge der Abrisstätigkeit für das Referenzszenario (links) und das Zielszenario (rechts)

In Summe aus Sanierung und Abriss ergibt sich folgendes prognostiziertes Abfallaufkommen an Dämmstoffvolumen im Referenz- und Zielszenario ohne und mit Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe (Abbildung 3-8). Je nach Szenario verdoppelt oder versechsfacht sich das Abfallvolumen.

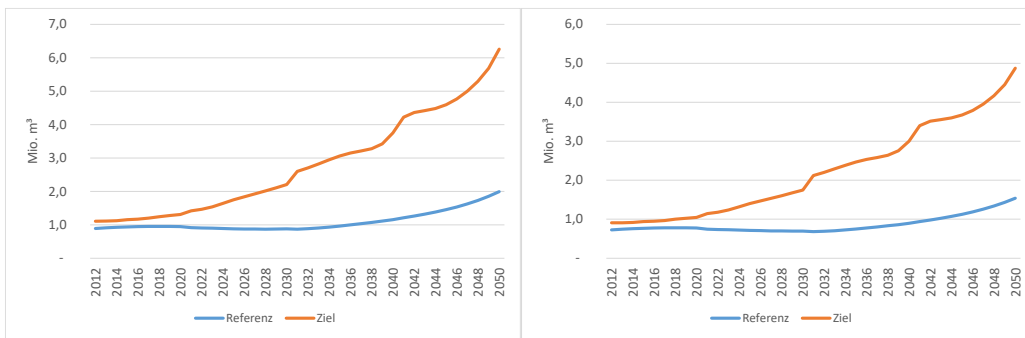


Abbildung 3-8: Prognostiziertes Dämmstoffvolumenabfallaufkommen ($\lambda = 0,035$) für Baden-Württemberg in Summe aus Sanierung und Abrisstätigkeit für das Referenzszenario und Zielszenario ohne (links) und mit Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude (rechts)

Wird nun die jeweilige Dämmstoffverteilung auf die Summe des Abfallaufkommens an Dämmstoffvolumen aus Sanierungs- und Abrisstätigkeit aus allen Bauteilen unter Berücksichtigung der jeweiligen Wärmeleitfähigkeitswerte angewendet, so ergeben sich die in folgender Abbildung 3-9 dargestellten Abfallvolumina der verschiedenen Dämmstoffe.

Über die Dichte der Dämmstoffe sind diese in die zugehörigen Massen umgerechnet und mit dargestellt. Das größte Abfallvolumen wird für die mineralischen Dämmstoffe (Glaswolle, Steinwolle) und EPS erwartet. XPS und PU liegt bis zum Ende des Prognosezeitraums über den Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, die jedoch zum Ende des Prognosezeitraums stärker zulegen. Bei Betrachtung der Abfallmassen liegen die mineralischen Dämmstoffe aufgrund der geringen Dichte von EPS und der größeren Dichte von Steinwolle noch weiter vorne. Umgekehrt überholen die Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen am Ende des Prognosezeitraums EPS und XPS, weil die Dichten der Holzplatten vergleichsweise hoch ausfallen.

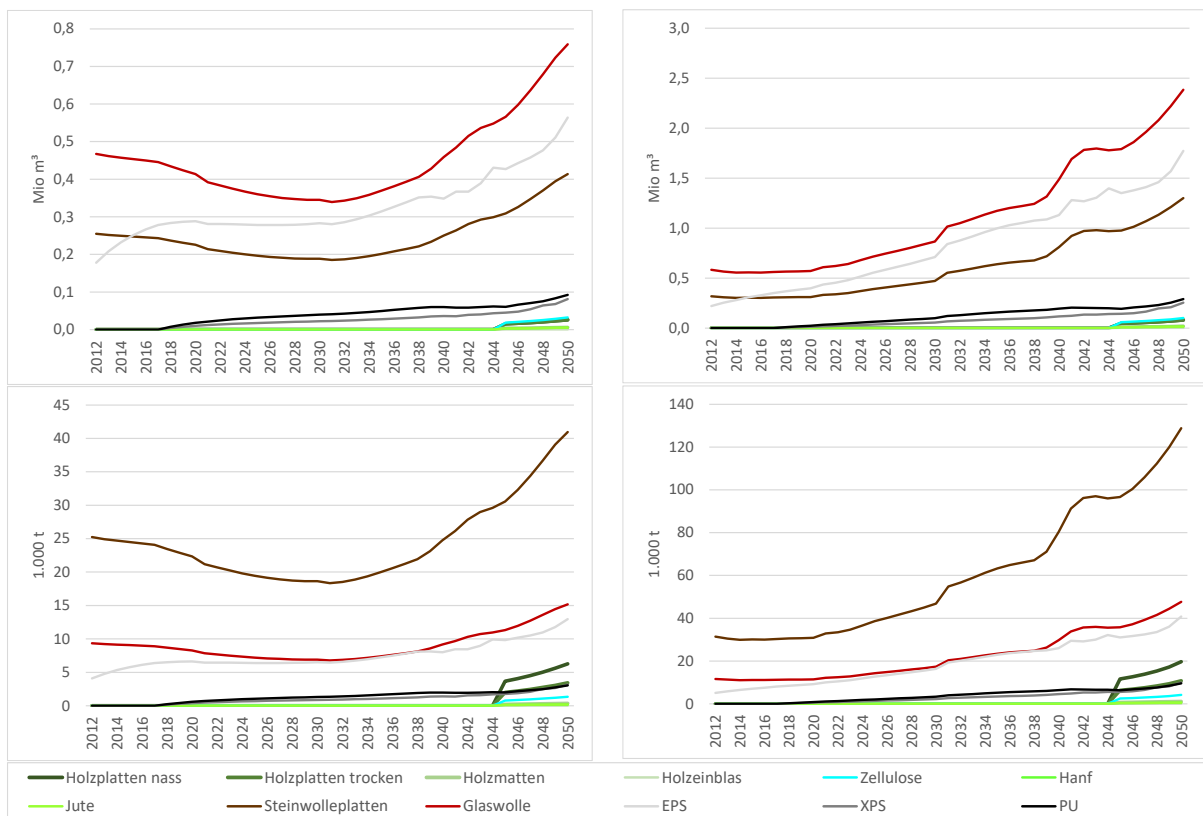


Abbildung 3-9: Prognostiziertes Abfallaufkommen der verschiedenen Dämmstoffe für Baden-Württemberg als Volumen (oben) und Masse (unten) im Referenzszenario (links) und Zielszenario (rechts) ohne Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude

In Summe ergeben sich die in Abbildung 3-10 aufgeführten prognostizierten Abfallmassen für die beiden Szenarien. Die Mengen werden sich danach im Referenzszenario bis 2050 mindestens auf knapp 100.000 t verdoppeln oder im Zielszenario sogar auf 250.000 t vervielfachen. Unter Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude fallen die Mengen entsprechend etwas geringer aus. Das Belassen alter Dämmstoffe kann aus Ressourcensicht daher zielführend sein.

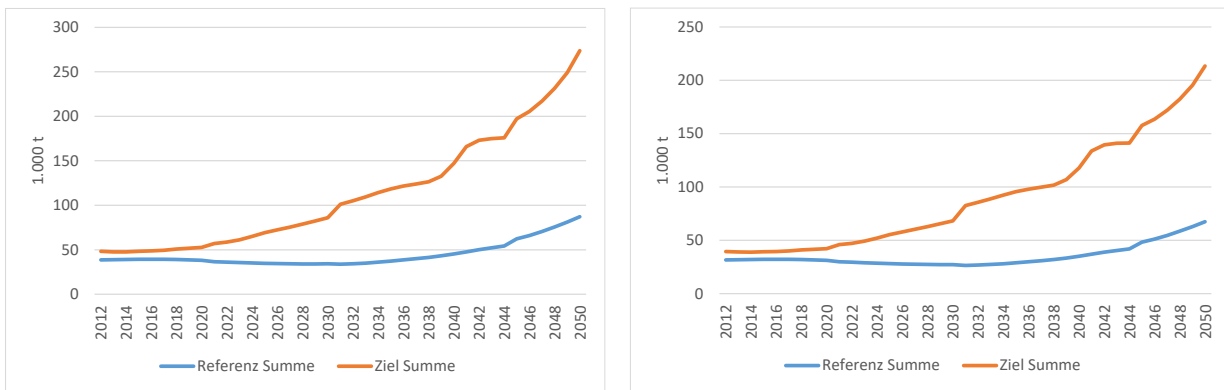


Abbildung 3-10: Prognostiziertes Dämmstoffmassenabfallaufkommen für Baden-Württemberg in Summe aus Sanierung und Abrisstätigkeit für das Referenzszenario und Zielszenario ohne (links) und mit Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude (rechts)

Derzeit fallen gemäß dem Modell, unter Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe, je nach Szenario jährlich 0,7 bis 1,1 Mio. m³ bzw. 30.000 bis 46.000 t Dämmstoffabfälle in Baden-Württemberg an.

Für Deutschland wurde ebenso eine überschlagsmäßige Berechnung der zu erwartenden Dämmstoffabfallmassen bis 2030 durchgeführt. Das Modell hierfür konnte aber nicht so gut wie das für Baden-Württemberg parametrisiert werden. Die Zahlen geben daher nur eine grobe Abschätzung wieder.

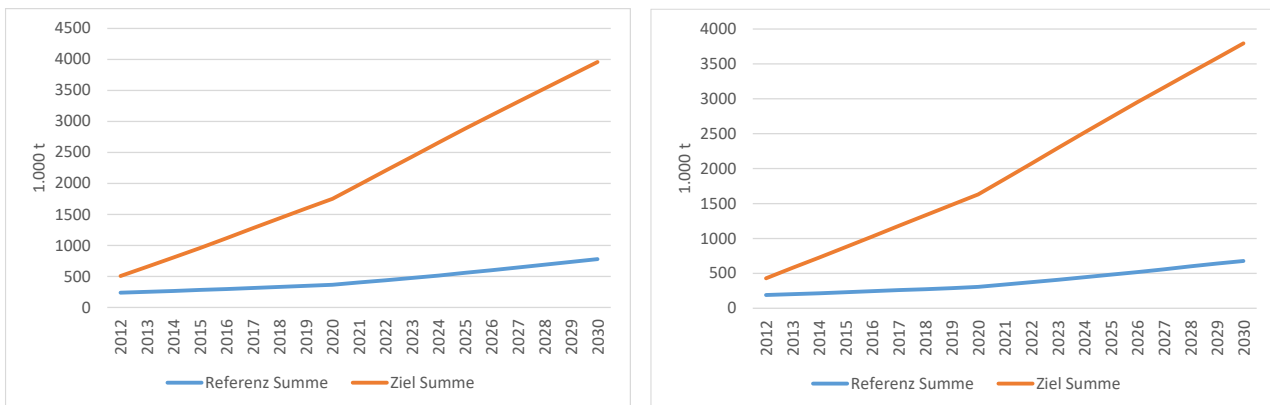


Abbildung 3-11: Sehr überschlägig prognostiziertes Dämmstoffmassenabfallaufkommen für Deutschland in Summe aus Sanierung und Abrisstätigkeit für das Referenzszenario und Zielszenario ohne (links) und mit Berücksichtigung des Belassens alter Dämmstoffe im und am Gebäude (rechts)

In der Abfallstatistik werden Dämmstoffabfälle unter den Abfallschlüsseln 170603* (anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen besteht...) und 170604 (anderes Dämmmaterial... [ohne Asbest und gefährliche Stoffe]) geführt, insofern eine getrennte Bereitstellung der Dämmstoffe erfolgt. Eine Unterscheidung nach verschiedenen Dämmstoffmaterialien ist nicht möglich. Weiterhin wird eine unbekannte Menge Dämmstoffe über gemischte Bauabfälle mit dem Abfallschlüssel 170904 entsorgt. In Summe fielen 2018 und 2019 deutschlandweit jährlich mehr als 270.000 t Dämmstoff über den Abfallschlüssel 170603* (v.a. alte Mineralwolle) und 170604 in Abfallentsorgungsanlagen an, davon um die 220.000 t aus Deutschland (Destatis 2021). Diese Mengen liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die vom Modell berechneten. Der direkte Vergleich dieser Zahlen gestaltet sich schwierig,

weil in den Massen der Abfallstatistik auch die mineralischen Anteile des WDVS enthalten sein könnten, die aufgrund ihrer deutlich größeren Dichte die Massen signifikant erhöhen. Der Modelloutput bezieht sich hingegen ausschließlich auf die Dämmstoffe.

Auch in (Deilmann et al. 2016) wird ein Dämmstoffabfallaufkommen von knapp 600.000 t im Jahr 2010 benannt. (Vogdt et al. 2019) zitiert (BBSR 2011) und (Müller et al. 2009), wonach alleine für mineralische Dämmstoffe ein Aufkommen von 200.000 bis 300.000 t/a schon jetzt zu erwarten ist.

Die Prognose ist nur als eine überschlägige Abschätzung zu sehen. Unsicherheiten ergeben sich u.a. für die Gebäude, die seit der 1. Wärmeschutzverordnung (1979) mit besserem Wärmeschutz errichtet wurden. Es wurde angenommen, dass die Hälfte dieser Gebäude mit Dämmschichten in Form eines WDVS bestückt wurden, wohingegen im Rest der Wärmeschutz über entsprechende monolithische Bauweisen (Blähton, Gasbeton, etc.) erfüllt wird. Die Dämmschichten in Gebäuden, die vor der 1. Wärmeschutzverordnung errichtet wurden, sind uneinheitlich eingebaut. Weiterhin musste abgeschätzt werden, inwieweit im Prognosezeitraum auch schon (sehr) gut gedämmte Gebäude abgerissen werden.

4 Die Kreislaufwirtschaft mineralischer Dämmstoffe

Die mineralischen Dämmstoffe werden im Rahmen dieser Studie betrachtet. Das Hauptaugenmerk liegt auf Stein- und Glaswolle, da diese Dämmstoffe wie in Kapitel 3.2.4 und 3.2.5 gezeigt, die größte Relevanz unter den mineralischen Dämmstoffen auf dem Markt haben.

Im Rahmen dieses Projektes wird ausschließlich die stoffliche Verwertung der Dämmstoffe betrachtet, da der Fokus auf der Kreislaufführung liegt. Die Frage, inwiefern bei der Herstellung der Dämmstoffe auf sekundäre Rohstoffe zurückgegriffen wird oder zukünftig werden kann, wird ebenfalls untersucht.

4.1 Steinwolle

Steinwolle wird häufig auch als Mineralwolle bezeichnet, was nicht falsch ist, aber dazu führt, dass sie mit Glaswolle gleichgesetzt wird. Sowohl der Herstellungsprozess als auch die Rezepturen dieser beiden Mineralwollen unterschieden sich voneinander. Zur Herstellung von Steinwolle werden Steine, zementgebundene Formsteine und Sekundärrohstoffe wie z.B. Filterstäube verwendet, indem sie bei ca. 1500°C aufgeschmolzen und zu Fasern versponnen werden. Zum Aufschmelzen wird in den meisten Fällen ein Kupolofen verwendet. Bei Glaswolle kommt vor allem Altglas als Rohstoff zum Einsatz, die Schmelze erfolgt hier zudem in einer Glaswanne (SW 2021).

Bei Steinwolle handelt es sich um einen nicht brennbaren Dämmstoff der Baustoffklasse A1. Der Dämmstoff liegt sowohl in druckbelastbarer Plattenform vor, als auch als flexible Matte und ist somit in den meisten Bauteilen eines Gebäudes einsetzbar (Reinhardt et al. 2019).

Mit Hinblick auf die Entsorgung ist zu beachten, dass Steinwolle, die vor dem Jahr 2000 hergestellt wurde, als gefährlich eingestuft wird, da dessen Fasern im Verdacht stehen, über den Atemweg krebserregend zu sein. Die Bezeichnungen „alte“ und „neue“ Wolle beschreiben Steinwollen, die vor bzw. nach dem 1. Juni 2000 hergestellt wurden. Beim Rückbau und Entsorgung von „alter“ Wolle handelt es sich um gefährlichen Abfall (Abfallschlüssel 17 06 03*), bei „neuer“ Wolle um ungefährlichen Abfall (Abfallschlüssel 17 06 04) (LfU 2018).

4.1.1 Stoffliche Rückführung in die Produktion

Bereits heute werden Verschnittreste und Fehlchargen, die bei der Dämmstoffherstellung anfallen, in die Produktion zurückgeführt und stofflich verwertet. Diese Rückführung erfolgt mittels Zementformsteinen, da im Kupolofen keine losen Steinwolleabfälle eingesetzt werden können. Die Zementformsteine sorgen aufgrund ihrer Form und Größe im geschütteten Zustand für eine gute Zirkulierbarkeit der Luft im Ofen und gewährleisten dadurch die erforderliche Sauerstoffversorgung des Schmelzprozesses (SW 2021).

Neben Zement werden den Formsteinen bei ihrer Herstellung weitere Stoffe der Steinwollerezeptur hinzugefügt, unter anderem auch fertige Steinwolle (Verschnittreste) aus der Produktion. Dieser Kreislauf wurde ursprünglich etabliert, um eine möglichst abfallfreie Produktion zu gewährleisten und ökonomische Lösungen für den Umgang mit Produktionsverschnitt und Fehlchargen zu implementieren (SW 2021).

Für eine Rückführung in die Produktion werden die Steinwollerezepte zunächst zerrissen, anschließend durch einen FE-Abscheider von Metallen befreit und final zerkleinert und zu Steinwolle gemahlen. Dieses Steinwolle gemahlene kann anschließend in der Zementformsteinherstellung als Rohstoff verwendet werden und gelangt somit zurück in den Kreislauf (SW 2021).

Durch dieser Methode der Rückführung kann in der Steinwolleproduktion bis zu 30 M.-% recycelter Rohstoff eingesetzt werden (SW 2021).

Anforderung an das rückgeführte Material: Grundsätzlich sollte das Material sauber und sortenrein sein. Leichte Anhaftungen, sowohl organisch als auch mineralisch, sind zwar für den Prozess eher unproblematisch, aufgrund der Qualitätsanforderungen aber nicht bzw. nur in sehr kleinen Mengen erwünscht. Metalle müssen verlässlich entfernt sein, da diese die Mühle und andere Aggregate beschädigen und dessen Verschleiß beschleunigen. Aufgrund der ähnlichen Rezepturen der jeweiligen Steinwollehersteller ist grundsätzlich auch eine Rückführung von werksfremder Steinwolle möglich. Die Prozessrückführung von Glaswolle könnte theoretisch ebenfalls in kleinen Anteilen erfolgen, würde die Rezeptur (Glaswolle enthält Boroxid) aber soweit beeinflussen, dass patent- und genehmigungsrechtliche Probleme die Folge wären (SW 2021).

4.1.2 Einsatz von Recycling Rohstoffen bei der Herstellung

Der Kupolofenprozess ist aufgrund seiner sehr hohen Betriebstemperaturen von ca. 1.500 °C zwar ein energieaufwändiger Prozess, erlaubt dadurch aber ein weitestgehend schadstofffreies Aufschmelzen diverser Post Consumer-Abfälle, die als Rohstoff oder auch Brennstoff eingesetzt werden können. Welche Rohstoffe dies neben Industriefilterstäuben genau sind, unterliegt der Geheimhaltung der einzelnen Hersteller (SW 2021).

Sämtliche Sekundärrohstoffe werden über die Zementformsteine zurückgeführt. Diese Rohstoffe müssen zum Zweck der Dosierung und Förderung als Schüttgut vorliegen, da die Herstellung der Zementformsteine ähnlich wie in einem herkömmlichen Betonmischer erfolgt: Zement wird mit Wasser und den jeweiligen Recyclingrohstoffen vermischt, gerührt und in Formen gegossen. Um die erforderlichen Qualitäten zu erhalten, müssen die jeweiligen Rohstoffe homogen im Formstein verteilt sein (SW 2021).

Für „neue“ Steinwolle ist dieses Verwertungssystem etabliert, das technisch funktioniert und vermehrt umgesetzt wird. Komplizierter verhält es sich bei „alter“ Steinwolle, da ihre Verarbeitung wie das Reißen und Mahlen in luftdichten Räumen stattfinden muss, damit keine gefährlichen Fasern in die Umwelt gelangen. Sind diese Fasern einmal im Zementformstein gebunden, stellen sie keine Gefahr mehr dar. Diese Anforderungen an die Aufbereitung sind laut Hersteller umsetzbar und bereits im Aufbau begriffen. Es wird davon ausgegangen, dass zukünftig demnach auch „alte“ Steinwolle als Rohstoff für die Steinwolleproduktion zur Verfügung steht (SW 2021).

Hemmnisse: Wird Steinwolle zurückgebaut, handelt es sich gemäß Abfallrecht um einen Abfall. Folglich bedarf es für dessen Lagerungen und Verarbeitung einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung und Zulassung als Abfallbehandlungsanlage. Diese zu erhalten, ist für die Hersteller möglich, allerdings mit Aufwand verbunden. Dieser Aufwand erhöht sich weiter, wenn auch gefährliche Abfälle in Form von „alter“ Steinwolle gelagert und verarbeitet werden sollen.

Ziel sollte es außerdem sein, Steinwolle auch von anderen Herstellern verarbeiten zu können. Hierfür bedarf es für jede herstellereigenspezifische Steinwolle einer entsprechenden Annahme- und Verarbeitungsgenehmigung. Aus Gründen der Logistik und den Schwierigkeiten, die Steinwolleabfälle konkreten Herstellern zuzuordnen zu können, bedürfen die Steinwolleproduzenten, die Altmassen aufzubereiten, einer Zulassung, rückgeführte Steinwolle sämtlicher Produzenten verarbeiten zu dürfen (SW 2021).

4.1.3 Aufbereitung & Sortierung

Ab Werk erfolgt eine Aufbereitung in Form einer Zerkleinerung mit vorheriger Metallabscheidung. Eine Sortierung auf dem Werksgelände ist nicht erforderlich, da aktuell nur ungefährliche Steinwolle angenommen werden kann (SW 2021).

Aus diesem Grund wird Steinwolle aktuell vor allem nur bei großen Dachsanierungen zurückgenommen, wenn der ursprüngliche Hersteller bekannt ist und keine vorherige Sortierung stattfinden muss. Eine Strategie könnte sein, die Aufbereitung und Sortierung über einen externen Dienstleister bewerkstelligen zu lassen. Für eine stoffliche Verwertung ist es zwingend erforderlich, dass Steinwolle von Glaswolle getrennt erfasst wird. Auch weitere Anhaftungen sollten weitestgehend entfernt werden. Vor allem bei gefährlicher Steinwolle muss diese Aufbereitung in einem luftdichten Raum stattfinden, damit keine gefährlichen Fasern in die Umwelt gelangen, eine entsprechende immissionsschutzrechtliche Zulassung ist erforderlich (SW 2021).

Wird die Steinwolle von einem dafür spezialisierten Dienstleister von Glaswolle und anderen Verunreinigungen separiert und anschließend zerkleinert, können diese Massen problemlos und sicher mit einem Silowagen zum Hersteller transportiert und verarbeitet werden. Nach der Zerkleinerung und durch die Druckbefüllung des Schüttgutes ist die Transportdichte deutlich erhöht, was den Transport wirtschaftlicher macht. Dieser Zwischenschritt der externen Sortierung und Aufbereitung könnte zudem dazu dienen, der recycelten Steinwolle ihre Abfalleigenschaft zu nehmen. Dies würde es den Herstellern ermöglichen, ohne umfangreiche Genehmigungen auch „alte“ Steinwolle und die Steinwolle anderer Hersteller in der Produktion einzusetzen. Aktuell laufen Gespräche und Überlegungen zwischen Herstellern und Entsorgern, ein solches System zu etablieren (SW 2021).

Bauschutt-aufbereiter verfügen derzeit nicht über die erforderliche Technik, um Steinwolle zu separieren und weiterzuverarbeiten. Aktuell kommen Künstliche Mineralfasern (Stein & Glaswolle) in Big Bags bei diesen Anlagen an und werden ohne weitere Sichtung oder Aufbereitung auf Deponien entsorgt (KR 2021).

4.1.4 Sammlung / Erfassung

Wie die Sammlung und Erfassung von Steinwolle ab Baustelle erfolgt, ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Größe der Baustelle -> anfallende Massen
- Platzverhältnisse auf der Baustelle -> Mobile Vorbehandlungsanlage / Verdichter
- Distanz zum nächsten Sammelpunkt / Aufbereiter

Eine allgemeingültige Aussage, wie die Sammlung und Erfassung ab Baustelle erfolgen sollte, kann nicht ohne weiteres getroffen werden. Handelt es sich um eine große Baustelle, bei der z.B. das Dach erneuert wird, besteht die Möglichkeit, Steinwolleabfälle als Rücklast abtransportieren zu lassen, was die Logistikkosten deutlich senkt. Große Baustellen verfügen oft auch über Flächen, die zur Aufstellung von mobilen Verdichtungsanlagen genutzt werden können, was ebenfalls zur Senkung von Logistikkosten beitragen kann. Eine Verdichtung in Form einer Zerkleinerung darf nur mit ungefährlichen Steinwollen erfolgen.

Handelt es sich um kleinere Baustellen, bei denen weder Platz für mobile Anlagen noch die Nutzung von Retourfahrten bei Anlieferung von neuem Material möglich ist, ist eine möglichst geringe Entfernung zur Annahmestelle wichtig, um eine Bündelung der Abfalltransporte zu ermöglichen. Handwerksbetriebe werden bei Sanierungsarbeiten oftmals auch mit der Entsorgung des rückgebauten Materials beauftragt. Verfügen diese auf dem eigenen Gelände über entsprechend Kapazitäten, kann dort diese Zwischenlagerung und Bündelung erfolgen. Analog wird bereits bei anderen Dämmstoffen, für die es etablierte Verwertungswege gibt, verfahren.

Eine Zwischenlagerung ist gem. der 4. BImSchV ab für gefährlichem Abfall ab 30 Tonnen genehmigungsbedürftig, (8.12.1.2), für ungefährlichen Abfall ab einer Menge von 100 Tonnen (Nr. 8.12.2) (4. BImSchV 2013).

Unabhängig von den genannten Faktoren ist für eine Verwertung entscheidend, dass die Steinwolleabfälle als Monofraktion vorliegen und getrennt erfasst und gesammelt werden. In Verbindung mit der GewAbfV wäre es für das Recycling von Steinwolle von großem Nutzen, wenn diese einen eigenen Abfallschlüssel erhalten würde (siehe dazu auch Kapitel 8.1.1).

Bereits im Status Quo wird Steinwolle auf der Baustelle separat als Monofraktion in Big Bags gesammelt, da in den meisten Fällen von einem gefährlichen Abfall ausgegangen wird. Entsorger und Containerdienste nehmen Steinwolle nur in dieser Form vom Abfallerzeuger an. Entsorger berichten, dass bei Stichproben die Big Bags in unterschiedlichem Maße mit anderen Abfällen verunreinigt sind. Hier gilt es seitens der Sammler und Entsorger strenger bei den Annahmekriterien zu sein, auch wenn dies zunächst einen Mehraufwand in Form von Kontrollen mit sich bringt. Bei dem aktuellen Entsorgungsweg über die Deponie bleiben die Verunreinigungen in den Big Bags oft unerkant bzw. werden toleriert (BEI 2021).

4.1.5 Rückwirkung auf Baustelle

Eine Verwertung von Steinwolle kann nur für sortenreine und saubere Steinwolleabfälle erfolgen. Für die Baustelle heißt das: Steinwolle muss in den dafür vorgesehenen Gebinden (Big Bags) sauber und sortenrein bereitgestellt werden. Auf diesem Wege lassen sich aufwändige Aufbereitungsschritte vermeiden und die Abfälle können direkt zum Recycler gehen.

Für die Baustelle gilt es außerdem in Erfahrung zu bringen, ob es sich um gefährliche (alte) Wolle oder ungefährliche (neue) Wolle handelt, weil für ungefährliche Wolle bereits eine Verdichtung ab Baustelle erfolgen kann. An der TU Berlin laufen aktuell Forschungen zu

einem Schnelltestverfahren, das eine Unterscheidung von „alter“ und „neuer“ Steinwolle ermöglichen soll (FMI 2021).

Bieten die Hersteller ein Rücknahmesystem an, das günstiger ist als die Beseitigung auf der Deponie, bedeutet dies für die Baustelle eine mögliche Kostenreduzierung, wodurch der Anreiz zur Bereitstellung von Steinwolle als Monofraktion zunehmen dürfte, auch unabhängig von gesetzlichen Regulierungen. Ein möglicher erhöhter Zeitaufwand beim Rückbau ließe sich somit rechtfertigen bzw. ausgleichen.

4.1.6 Folgerung für Material- und Konstruktionsverbunde

Aufgrund der vielseitigen Einsatzmöglichkeit von Steinwolle, wird diese in diversen Bauteilen und entsprechend vielfältigen Material- und Konstruktionsverbunden verbaut. Für ein Recycling sind Material- und Konstruktionsverbunde problematisch, da die Steinwolle sauber vorliegen muss.

Bei verklebten Flachdächern, die laut Hersteller die häufigste Bauweise bei nicht belüfteten Flachdächern ist, wird der Dämmstoff sowohl mit der untenliegenden Dampfsperre als auch mit der darüber liegenden Dichtungsbahn verklebt (RW 2019). Diese Bauweise hemmt den selektiven Rückbau massiv. Bauweisen wie Flachdach mit Auflast oder mit Metallabdeckung erlauben sowohl einen leichten Rückbau als auch eine einfache sortenreine und saubere Trennung der Materialien.

Gleiches gilt für Wärmedämmverbundsysteme der Außenwand, wobei auf der Innenseite Klebemörtel verwendet wird und auf der Außenseite Putze aufgetragen werden. Ein sauberer Rückbau des Dämmstoffes ist somit kaum bzw. nur mit sehr hohem Aufwand zu bewerkstelligen (Vogdt et al. 2019). Aktuell gibt es erst ein Verbundsystem auf dem Markt, das mit seiner guten Rückbaubarkeit wirbt und auf Klebemörtel verzichtet (WEB 2019). Erfahrungswerte aus der Praxis konnten noch nicht ermittelt werden, da dieses System erst seit kurzem auf dem Markt ist.

Grundsätzlich sind Material- und Konstruktionsverbunde, die über ein Verkleben entstehen, für das Recycling der Steinwolle sehr problematisch. Aus Kostengründen werden jedoch häufig gerade diese Verbunde gewählt. In dieser Kostenrechnung sind der zukünftige Rückbau und die Entsorgung allerdings nicht berücksichtigt. Eine erweiterte Herstellerverantwortung, wie sie ab dem 01. Januar 2022 für sämtliche Baustoffe in Frankreich gilt, kann diese unzureichende Kalkulation korrigieren (vergl. 8.1.2).

4.1.7 Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick

Mit der Rückführung in die Produktion anhand von Zementformsteinen verfügt die Steinwolle über ein erprobtes Verfahren zum Recycling. Mit einem RC-Anteil von ca. 30 M.-% (im neuen Produkt) schneidet dieses Verfahren aktuell im Vergleich zu anderen Dämmstoffen sehr gut ab. Im Vergleich zu anderen Dämmstoffen wurden aktuell allerdings keine weiteren stofflichen Verwertungswege identifiziert.

Da auf den Baustellen bereits heute Mineralfasern in Big Bags getrennt bereitzustellen sind, ist für das zukünftige Recycling eine gute Basis gelegt. Hier muss zukünftig nur noch sichergestellt werden, Steinwolle von Glaswolle getrennt zu halten und das möglichst frei von

Störstoffen. Ein eigener Abfallschlüssel für Steinwolle und ein entsprechender Vollzug der GewAbfV würde das Recycling weiter stärken.

Aktuell gibt es erste Gespräche zwischen Dämmstoffherstellern und Entsorgern mit dem Ziel, eine Aufbereitung außerhalb der Werksgelände zu etablieren. Auch für gefährliche Steinwollen zeichnen sich Lösungsansätze ab. Würde die Steinwolle nach der Aufbereitung zukünftig aus dem Abfallrecht entlassen, wäre eine wichtige genehmigungsrechtliche Hürde für fas Recycling von Steinwollgedämmstoffen genommen.

Die Änderung der Deponieverordnung verbietet ab dem 01.01.2024 eine Deponierung von recyclingfähigen Materialien (§ 7 Abs. 3 DepV neu), soweit eine Verwertung technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist (§ 7 Abs. 4 KrWG). Es wird davon ausgegangen, dass Steinwolle als recyclingfähig eingestuft wird und dies auch als technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar angesehen werden kann. Diese Aussage gilt es zu stützen und breit zu kommunizieren.

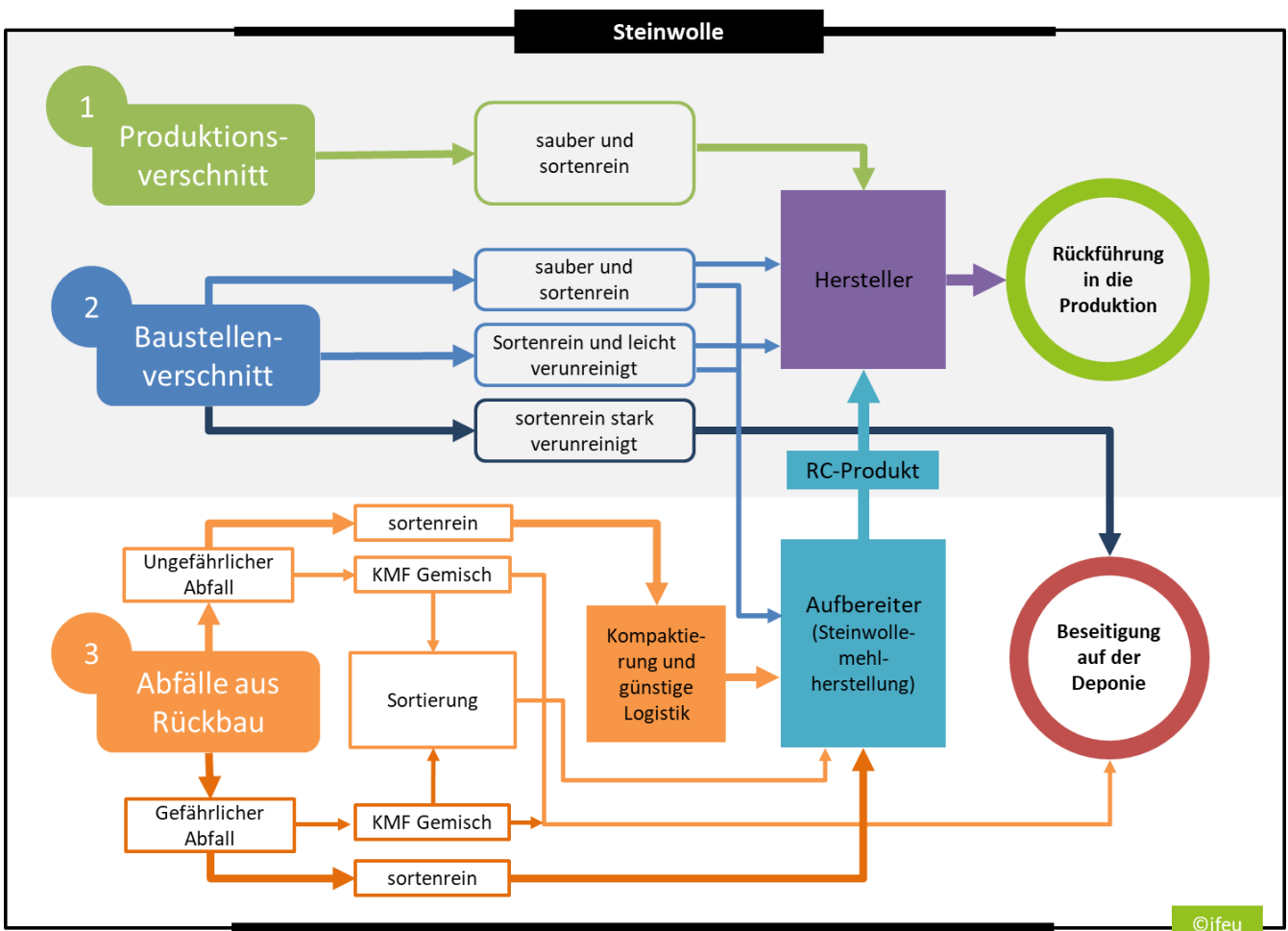


Abbildung 4-1: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von Steinwolle

Eine Deponierung sollte zukünftig wie in Abbildung 4-1 dargestellt nur dann erfolgen, wenn Steinwolle als Teil eines Gemisches vorliegt und nicht ausreichend gut aufbereitet werden

kann. Etablieren sich vermehrt die Recyclingsysteme über Aufbereiter, könnte der Markt aufgrund der geringeren Preise zur Verwertung im Vergleich zu Deponie für eine bessere Trennung ab Baustelle sorgen. Eine gemischte Sammlung ab Baustelle und erst eine spätere Sortierung beim Entsorger halten die Akteure für nicht umsetzbar und plädieren für eine sortenreine Trennung bereits ab Baustelle. Logistische Lösungen und die kommunizierte Problematik beschränkter Platzverhältnisse auf der Baustelle betreffen alle Dämmstoffe und werden im gesonderten Kapitel 7.1 diskutiert.

4.2 Glaswolle

Glaswolle gehört, wie die Steinwolle, zu den Dämmstoffen aus künstlichen Mineralfasern. Sie ist in den meisten Fällen heller als Steinwolle, verfügt über eine deutlich geringere Rohdichte und ist daher nicht so druckfest (Reinhardt et al. 2019). Während Steinwolle vorrangig in druckfester Plattenform bei Flachdächern und in WDVS in der Außenwand zum Einsatz kommt, wird Glaswolle in flexibler Mattenform vor allem als Gefachdämmung und Zwischensparrendämmung eingesetzt. Zur Herstellung von Glaswolle wird Altglas, Sand und Dolomit in einer Glaswanne aufgeschmolzen und anschließend zerfasert (IBU 2016).

Aufgrund der mineralischen Zusammensetzung der Glaswolle handelt es sich auch bei dieser um einen nicht brennbaren Dämmstoff der Brandschutzklasse A1 (IBU 2014).

Wie auch bei der Steinwolle muss Glaswolle mit Hinblick auf die Entsorgung in „alte“ und „neue“ Wollte unterschieden werden: „alte“ Wolle wurde vor dem 01. Juni 2000 hergestellt und ist gefährlicher Abfall (Abfallschlüssel 17 06 03*), „neue“ Wolle danach, sie ist ungefährlicher Abfall (Abfallschlüssel 17 06 04) (AVV 2020).

4.2.1 Stoffliche Rückführung in die Produktion

Eine Rückführung von Produktionsverschnitt findet bereits heute statt. Die Art der Rückführung hängt von der Art der Schmelzwanne und der damit einhergehenden Wärmezuführung ab. Handelt es sich um eine elektrisch betriebene Schmelzwanne, werden die zerkleinerten Verschnittreste zuvor in einem Zyklonofen eingeschmolzen und in eingeschmolzenem Zustand der Glasschmelzwanne zugeführt. Ein direktes Rückführen von Verschnittresten in die elektrisch betriebene Glaswanne ist nicht möglich, da aus Gründen der Prozesssicherheit in den Zyklonen zuvor die Organik (Bindemittel) verbrannt werden muss (FMI 2021; GW 2021). Laut Verband (FMI 2021) sind in Deutschland keine elektrisch betriebenen Glasschmelzwannen in der Glaswolle-Produktion im Einsatz.

Eine OxyFuel betriebene Glasschmelzwanne ist robuster, ein „Vorsmelzen“ ist nicht erforderlich, so dass rückzuführende Glaswolle gemahlen und direkt der Schmelze zugeführt werden kann.

Auch die Rückführung von Baustellenverschnitt wird von einigen Herstellern angeboten, diese Verschnittreste gehen denselben Weg wie der Produktionsverschnitt. Zuvor erfolgt eine Sichtung und Zerkleinerung des Materials (GW 2021).

In modernen Glasschmelzwannen wird perspektivisch von einem rückführbaren Anteil von ca. 10 M.-% ausgegangen (FMI 2021). Sind zukünftig aufgrund von z.B. Deponieverboten und steigendem Rücklauf aus Rückbaumaßnahmen höhere Anteile zur Rückführung erforderlich, besteht die Möglichkeit, die rückgebaute Glaswolle vorab zu Glasfritten zu

verarbeiten. Diese Technologie kommt bereits heute u.a. in Frankreich zum Einsatz. Hierbei werden die Abfälle in einer Oxyfuel betriebenen Glaswanne geschmolzen und zu Glasfritten verarbeitet. Diese können anschließend wie bereits heute eingesetztes Altglas erneut der Glaswolleproduktion zugeführt werden (ISO 2018).

Anforderung an das rückgeführte Material: für eine aktuelle Rückführung muss das Material sauber und sortenrein vorliegen (GW 2021). Es wird davon ausgegangen, dass bei der Glasfrittenherstellung zukünftig leichte Verunreinigungen unproblematisch sind, was aufgrund des Pilotcharakters der großtechnischen Anlage in Frankreich aber noch nicht final bestätigt werden kann.

4.2.2 Einsatz von Recycling Rohstoffen bei der Herstellung

Glaswolle kann je nach Produkt bis zu 80 M.-% aus Altglas bestehen (GW 2021). Der Einsatz von Post-Consumer Glaswolle, die mittels Glasfrittenherstellung konditioniert wird, erhöht diesen Anteil nicht, sondern ersetzt das bereits zum Einsatz kommende Altglas. Neben dem ohnehin schon sehr hohen Anteil an Recyclingglas kommen bei der Glaswolleherstellung keine weiteren Rohstoffe aus dem Materialkreislauf zum Einsatz (IBU 2016).

4.2.3 Aufbereitung & Sortierung

Eine Aufbereitung von rückgeführter Glaswolle, die als Verschnittrest von der Baustelle kommt, wird gesichtet und wenn erforderlich händisch sortiert. Die Glaswollen müssen sauber und sortenrein sein. Wobei sortenrein nicht nur bedeutet, dass es sich um Glaswolle handeln muss, sondern auch, dass sie aus den eigenen Werken kommt und nicht von einem anderen Hersteller (GW 2021).

Nach der Sichtung und händischen Sortierung erfolgt eine Aufbereitung in Form einer Zerkleinerung: die Glaswolle wird zerrissen und gemahlen. Dieser Aufbereitungsschritt wurde nicht eigens für die Baustellenverschnittreste etabliert, sondern gehört zu dem Rückführungsprozess der Produktionsverschnittreste (GW 2021).

Für eine zukünftige direkte Rückführung (Glaswollemehl) oder indirekte über die Glasfrittenherstellung, muss eine Separierung der Glaswolle von Steinwolle stattfinden. Verfügt die Anlage über eine immissionsschutzrechtliche Zulassung zur Verarbeitung von Post-Consumer Glaswolle (auch gefährlicher Glaswolle) muss darauf geachtet werden, dass die Genehmigung auch die Verarbeitung von Glaswolle anderer Hersteller gestattet ist.

Es wird aktuell nicht davon ausgegangen, dass eine technisch anspruchsvolle Aufbereitung bzw. Abtrennung anderer Abfallfraktionen in den Anlagen der Hersteller erfolgt und ausschließlich ausreichend saubere Glaswolleabfälle bzw. aufbereitetes Glaswollemehl angenommen werden (GW 2021).

Wie auch bei der Steinwolle ist eine Kooperation mit Entsorgungsunternehmen bzw. Aufbereitern naheliegend. Diese geben die erforderlichen Reinheitskriterien an die Baustelle und die Containerdienste weiter und verfügen ggf. über weitere Sortierlinien, bevor eine Aufbereitung zu Glasmehl stattfindet.

4.2.4 Sammlung / Erfassung | Rückwirkung auf Baustelle | Material und Konstruktionsverbunde

Die Sammlung und Erfassung von Glaswolle erfolgt wie bei Steinwolle. Glaswolle unterliegt derselben Abfallschlüsseln 17 06 03* (gefährlich) und 17 06 04 (ungefährlich) (AVV 2020).

Auch die Rückwirkungen auf die Baustelle sowie die Folgerungen für Material und Konstruktionsverbunde können von der Steinwolle auf die Glaswolle übertragen werden (s. Kapitel 4.1.5, 4.1.6).

Material- und Konstruktionsverbunde sind für Glaswolle ein geringeres Hemmnis als für Steinwolle, da die Einsatzbereiche von Glaswolle vor allem in Bauteilen liegen, die eine lose oder rein mechanische Verbauweise ermöglichen (FMI 2021).

4.2.5 Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick

Anders als Steinwolle verfügt die Glaswolle aufgrund der empfindlicheren Glaswannentechnologie im Vergleich zum Kupolofen über einen weniger robusten Weg, Verschnittreste und damit auch zukünftig post consumer Abfälle in die Produktion zurückzuführen. Dennoch wird die direkte Rückführung in die Produktion über die Glasmehlherstellung als perspektivisch wahrscheinlichster stofflicher Verwertungsweg identifiziert.

Auf längere Sicht kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Entsorgungsweg wie in Abbildung 4-2 dargestellt, für die zukünftig anfallenden Glaswolleabfälle aus dem Rückbau ausreichend ist. Sollten sich nicht weitere stoffliche Verwertungsverfahren etablieren oder der rückführbare Anteil von derzeit max. 10 M.-% erhöht werden können, wird ein weiterer Schmelzvorgang erforderlich werden. In Frankreich wird dieses Konzept bereits von der Firma Saint Gobain verfolgt (ISO 2018). Dort werden rückgebaute Glaswolleabfälle zu Fritten verarbeitet und zurück in die Produktion geführt. Es handelt sich somit um eine alternative erprobte funktionierende Technologie.

Die Anlage in Frankreich bekommt die Glaswolleabfälle von unterschiedlichen Entsorgungsunternehmen angedient, die die Glaswolle von anderen Abfällen getrennt halten und mittels Pressen kompaktieren, wodurch die Logistikkosten gesenkt werden.

Wie auch bei Steinwolle werden die gefährlichen Fasern durch das Einschmelzen unschädlich gemacht, wodurch diese erneut der Produktion zugeführt werden können. Ein Nachteil dieser Technologie ist der erhöhte Energieaufwand durch den weiteren Schmelzvorgang.

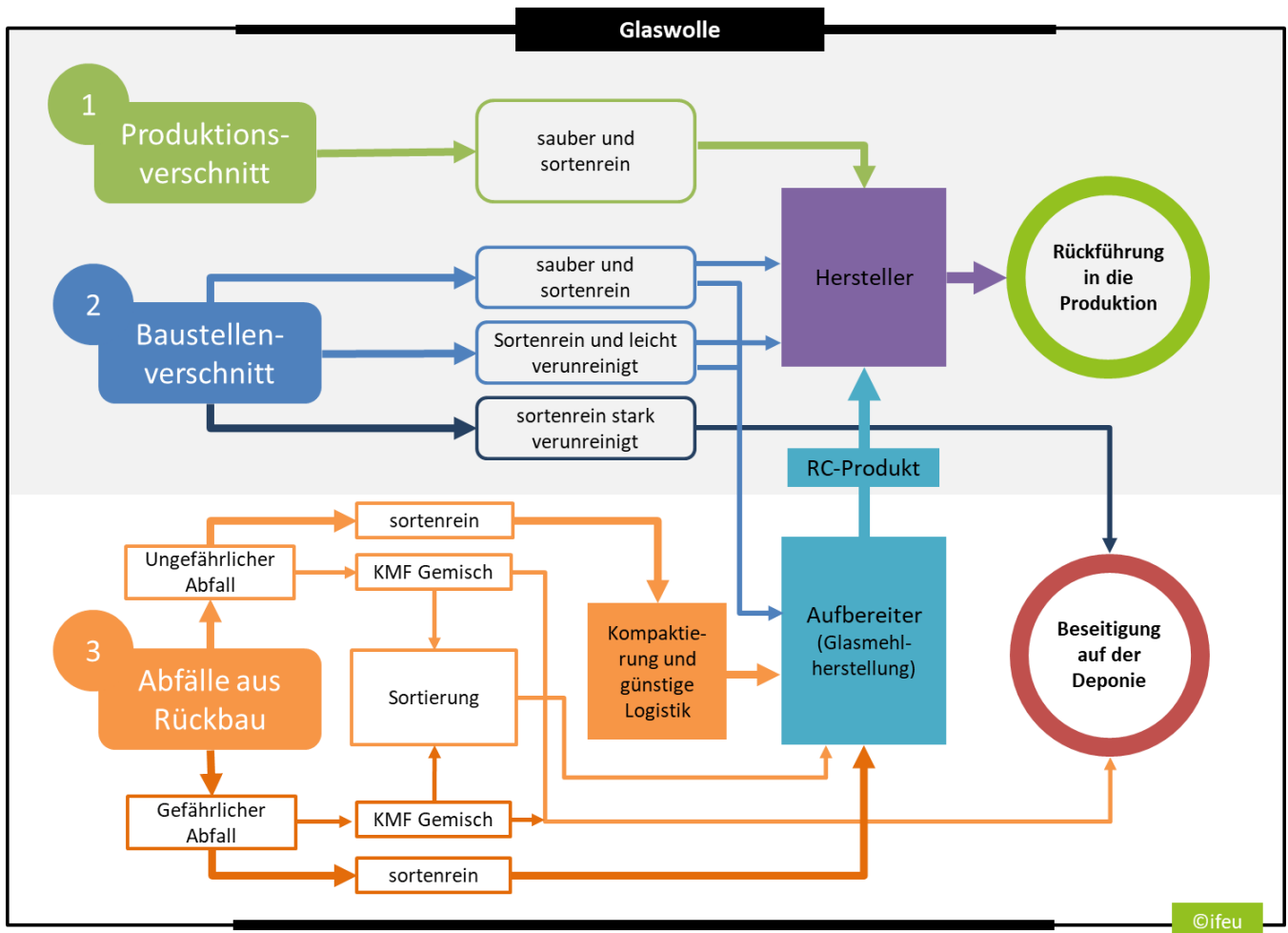


Abbildung 4-2: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von Glaswolle

Bei der direkten Rückführung in die Produktion kann ebenfalls gefährliche Glaswolle verwendet werden, da auch hier das Aufschmelzen der gefährlichen Fasern zu einer Zerstörung selbiger führt. Eine Rückführung dieser Fasern ist nur dann möglich, wenn die Hersteller über geschlossene Beschickungslinien verfügen, da eine Verarbeitung der gefährlichen Fasern nur dann zulässig ist, wenn diese nicht in die Umgebung gelangen können. Gleiches gilt für die vorgeschaltete Glasmehlherstellung. Der Transport vom Aufbereiter zum Hersteller kann analog zum Steinwollemehl gefahrlos in hermetisch dichten Silowägen erfolgen.

5 Die Kreislaufwirtschaft von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen haben einen eher geringen Marktanteil (Kapitel 3.2.4 und 3.2.5). Der meist verbaute Dämmstoff ist der auf Holzfaserbasis. Es gibt noch viele weitere Dämmstoffe z.B. aus Cellulose, Jute, Hanf oder Seegras. Im Rahmen dieser Studie werden aus Gründen der aktuellen Relevanz aber ausschließlich die Holzfaserdämmstoffe genauer betrachtet.

Bei den Holzfaserdämmstoffen wird grundsätzlich in drei verschiedene Arten von Dämmstoffen unterschieden:

- Druckfeste Holzfaserplatten
- Flexible Holzfasermatten
- Holzfasereinblasdämmung

Aktuell findet eine stoffliche Verwertung ausschließlich in Form der Rückführung in die Produktion statt. Dies gilt nur für Verschnittreste und Baustellenverschnitt bzw. für Verschnitt von den Weiterverarbeitern, nicht für rückgebaute Dämmstoffe. Da diese Dämmstoffe erst seit wenigen Jahren vermarktet werden, fallen diese Dämmstoffe angesichts der Nutzungszeiten aktuell nur sehr vereinzelt zur Entsorgung an. Aus diesem Grund haben sich außer der Rückführung in die Produktion noch keine weiteren stofflichen Verwertungswege etabliert. Aus technischer Sicht ist diese Rückführung aber auch für Post-Consumer-Dämmstoffe möglich (HF 2021; vdnr 2021).

Holzfaserdämmstoffe lassen sich von ihrer Struktur und ihren Materialeigenschaften mit MDF- und HDF-Platten vergleichen. Das sind Baustoffe, die auch in anderen Bereichen wie in der Möbelherstellung vielfach zur Anwendung kommen. Auch für diese Holzbaustoffe ist in Deutschland aktuell kein stofflicher Verwertungsweg bekannt. Diese Holzbaustoffe, wie auch die Holzfaserdämmstoffe, fallen unter die Altholzkategorie A II und können gem. Altholzverordnung stofflich recycelt werden. Der einzige in Deutschland etablierte stoffliche Verwertungsweg von Altholz dieser Kategorie ist die Spanplattenproduktion. Holzfaserbaustoffe lassen sich aufgrund ihrer feinen Faserbeschaffenheit hierzu allerdings nicht gut verarbeiten und werden von der Industrie bisher gemieden (BAV 2021).

Bei Herstellergesprächen hat sich gezeigt, dass aktuell wenig Energie in die Erprobung von Technologien zur stofflichen Verwertung fließt, was auch darin begründet ist, dass die energetische Verwertung von Holzfasern aufgrund der CO₂-neutralen Verbrennung von Holz bereits ein sehr attraktiver Verwertungsweg ist (HF 2021).

Dieses Vorgehen wird durch die ökologische Betrachtung der verschiedenen Entsorgungswege gestützt, die zeigt, dass eine energetische Nutzung mit einer höheren CO₂-Gutschrift einhergeht, als die stoffliche Verwertung. Der Grund dafür liegt in der Substitution von Frischholz, dessen Bereitstellung mit weniger Lasten verbunden ist als die Energie, die

eingespart wird, wenn Holz energetisch verwertet wird (Reinhardt et al. 2019). Dies liegt am derzeit noch hohen fossilen Rohstoffanteil im deutschen Energiemix. Ändert sich der deutsche Energiemix zukünftig hin zu erneuerbaren Energieträgern, wird die Ökobilanz zur energetischen Verwertung deutlich schlechter ausfallen.

5.1 Stoffliche Rückführung in die Produktion

Eine stoffliche Verwertung über eine Rückführung in die Produktion findet aktuell für die Platten und Matten statt. Holzfasereinblasdämmung kann nicht erneut zu Einblasdämmung verarbeitet werden, weil sich die Fasern nach der ersten Verdichtung im Bauwerk irreversibel verändern und nach Rückbau nicht mehr die geforderten Qualitäten aufweisen. Eine Rückführung dieser Fasern in die Produktion von druckfesten Platten hingegen ist möglich (HF 2021).

Die Rückführung erfolgt für Platten wie für Matten nach dem gleichen Prinzip, auch wenn die Dämmstoffe neben den Holzfasern unterschiedliche Rezepturen aufweisen. Beide Dämmstofftypen werden getrennt voneinander zerkleinert und anschließend den frischen Holzfasern der jeweiligen Produktionslinie zudosiert und vermischt. Der Anteil von rückgeführten Dämmstoffen im Endprodukt kann laut Hersteller perspektivisch bis zu 10 M.-% betragen. Aktuell liegt dieser Anteil bei ca. 1 M.-%, was bedeutet, dass noch nennenswerte Kapazitäten vorhanden sind (HF 2021).

Das auf diese Weise rückgeführte Material substituiert Frischholz. Leim bei den Platten und Bikomponentenfasern bei den Matten wird nicht substituiert. Neben der Ressource Holz wird ebenfalls Prozessenergie eingespart, die zur Zerkleinerung der Hackschnitzel und dessen anschließender Trocknung benötigt wird (Reinhardt et al. 2019).

Anforderung an das rückgeführte Material: Sämtliche Dämmstoffe, die zurück in die Produktion gelangen, müssen absolut sauber und sortenrein sein. Die Sortenreinheit bezieht sich nicht nur auf die Art des Holzfaserdämmstoffes (Platte / Matte), sondern auch auf die Hersteller. Die Qualitätsanforderungen sind hoch und fremde Holzarten nicht erwünscht. Ob die Dämmstoffe nass oder trocken vorliegen, ist nicht relevant (HF 2021).

5.2 Aufbereitung & Sortierung

Zur Rückführung in die Produktion muss sichergestellt werden, dass die Platten- von den Mattendämmstoffen separiert werden. Diese lassen sich optisch gut voneinander unterscheiden. Da sämtliche Dämmstoffe absolut sauber vorliegen müssen, wird vor der Rückführung eine Sichtung durch die Mitarbeiter und händische Sortierung durchgeführt (HF 2021).

Aktuell verfügen die Dämmstoffe über keinen Aufdruck, der Rückschlüsse zum entsprechenden Hersteller zulässt. Sollen auch rückgebaute Dämmstoffe zukünftig zurückgeführt werden und der Hersteller ausschließlich eigene Dämmstoffe verarbeiten können/dürfen, muss durch einen Aufdruck oder die Baudokumentation sichergestellt werden, dass es sich um den richtigen Hersteller handelt.

Leicht verunreinigte Dämmstoffe müssten, bevor sie in den Prozess rückgeführt werden, mechanisch gereinigt werden. Hier wurde seitens der Hersteller das Abfräsen der obersten

Schichten als Reinigungsmethode genannt. Erforderliche Maschinen seien auf dem Markt verfügbar.

Holzfraktionen, die von Bauschuttzubereitern anhand von Windsichter oder Schwimmverfahren separiert werden, sind zerkleinert und mit anderen Holzarten und Faserstrukturen bzw. Leichtstoffen vermischt. Eine Rückführung dieser Fraktionen in die Produktion ist ausgeschlossen (HF 2021).

5.3 Sammlung / Erfassung | Rückwirkung auf Baustelle | Material- und Konstruktionsverbunde

Die Sammlung und Erfassung von Holzfaserdämmstoffen zur Rückführung in die Produktion kann über Big Bags oder Container erfolgen. Material, das bei den Verarbeitern anfällt, wird bereits heute in Big Bags gesammelt und zurückgeführt. Bei großen Baustellen bieten sich Container an. Eine Komprimierung der Dämmstoffe ist aufgrund der festen Struktur nicht vorteilhaft, auch nicht für die flexiblen Matten, die zwar weicher sind, aber dennoch über eine sehr stabile Struktur verfügen (HF 2021).

Wie auch bei den übrigen Dämmstoffen lohnt sich eine Sammlung bei dezentral aufgestellten Sammelstellen, um die Logistikkosten zu senken.

Konstruktionsverbunde lassen sich laut Hersteller leichter lösen als beispielsweise bei EPS, da die Anhaftungen an den Holzfasern nicht so stark sind. Bei einem WDVS lässt sich die Putzschicht samt Armierungsgewebe laut Hersteller sauber vom Dämmstoff trennen (HF 2021). Wird beim Verbundsystem auf Kleber zum Befestigen an die Hauswand verzichtet und auf mechanische Verfahren wie Schrauben oder Klammern zurückgegriffen, kann der Dämmstoff sauber und sortenrein zurückgebaut werden. Dieser selektive Rückbau ist zeitintensiver und somit teurer.

5.4 Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick

Holzfaserdämmstoffe können aus technischer Sicht recycelt werden, indem sie zurück in die Produktion geführt werden. Wie Abbildung 5-1 zeigt, wäre eine direkte Rückführung in die Produktion jedoch nur dann möglich, wenn der Dämmstoff sauber und sortenrein vorliegt. Sortenrein bezieht sich in diesem Fall nicht nur auf die Art des Dämmstoffes (fest oder flexibel), sondern auch auf den Hersteller. Verunreinigte Dämmstoffe müssten zunächst vergleichsweise aufwendig gereinigt werden. Bei Vermischung mit anderen Dämmstoffen ist zudem eine Sortierung erforderlich.

Dieser Recyclingansatz wird seitens der Hersteller aktuell aber nicht als zukünftiger Entsorgungsweg kommuniziert. Die aktuelle geringe Verfügbarkeit von Post Consumer Holzfaserdämmstoffen und der Nutzen im Treibhauspotenzial durch die Verbrennung in Biomasseheizkraftwerken mindern den Druck auf die Hersteller. Es wird davon ausgegangen, dass zukünftig eine anderweitige stoffliche Verwertung z.B. in der Baustoffherstellung erfolgen wird, bevor eine Rückführung in die Produktion stattfindet.

Eine weitere Überlegung der Hersteller ist die Erweiterung ihrer Produktpalette, die gezielt ein Recycling berücksichtigt und Dämmstoffe herstellt, die in Ihren Leistungszahlen zwar nicht den Dämmstoffen aus reinem Primärholz entsprechen, aber für entsprechende

anspruchslösere Anwendungsfelder wie die z.B. die Fußbodendämmung vollkommen ausreichend sind.

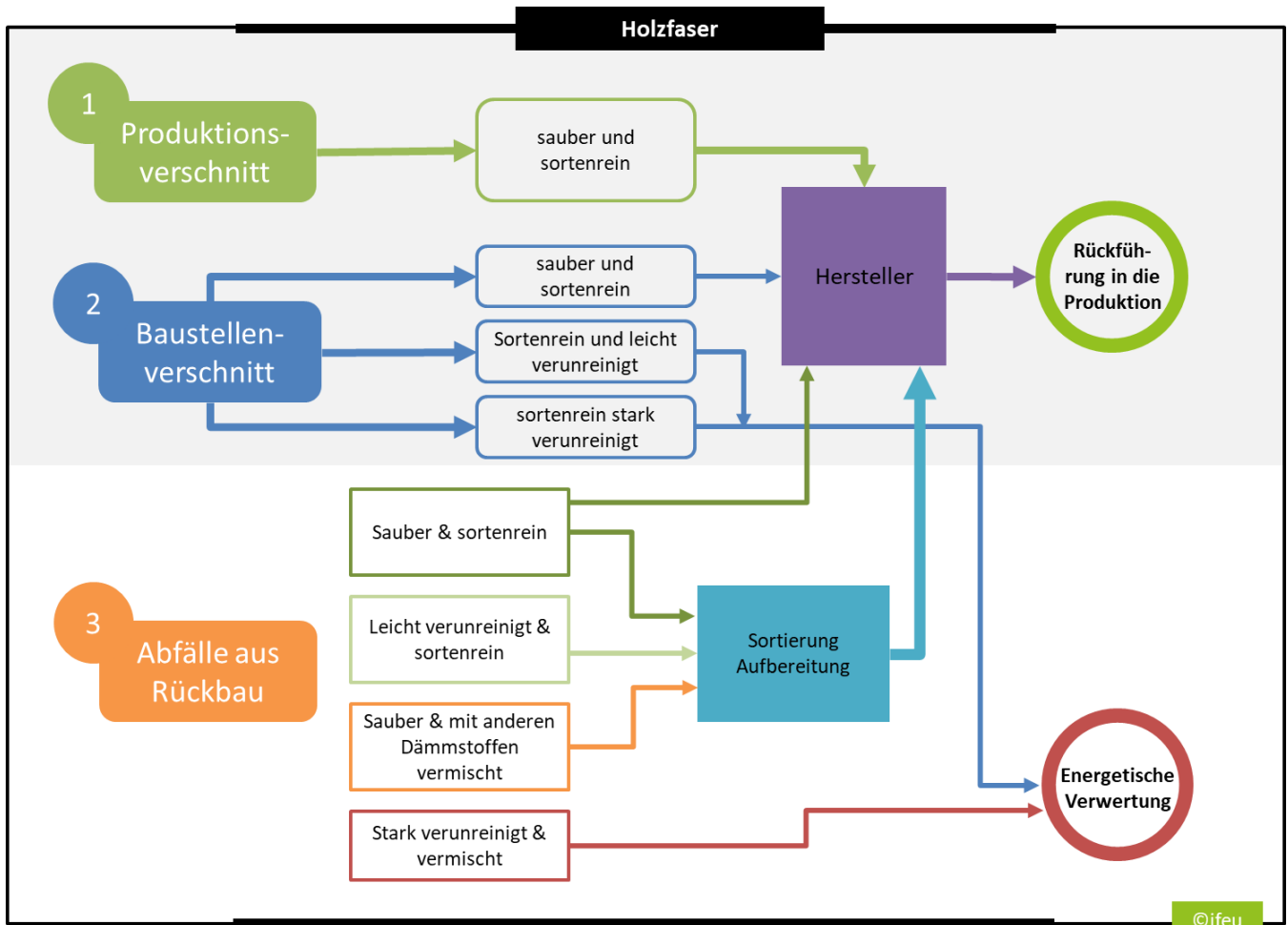


Abbildung 5-1: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von Holzfaserdämmstoffen

Treiber zur Entwicklung von weiteren stofflichen Verwertungswegen seitens der Hersteller oder in der Baustoffindustrie ist der wachsende Bedarf an Holz in der Baubranche, einhergehend mit den signifikant gestiegenen Preisen (Breitkopf 2021). Auch der allgemeine Trend zum stofflichen Recycling könnte den Druck zur Entwicklung von Produkten mit Sekundärrohstoffanteil erhöhen. Zudem verringert sich zukünftig der aktuell noch hohe ökologische Nutzen für die energetische Verwertung, da die damit einhergehende Substitution fossiler Energieträger aus dem deutschen Strom- und Wärmemix mit steigenden erneuerbaren Anteilen am Energiemix abnehmen.

6 Die Kreislaufwirtschaft von synthetischen Dämmstoffen

Die synthetischen Dämmstoffe aus expandiertem Polystyrol (EPS), extrudiertem Polystyrol (XPS) und Polyurethan (PU) werden im Rahmen dieser Studie betrachtet. Das Hauptaugenmerk liegt auf den EPS-Dämmstoffen, da diese Dämmstoffe, wie in Kapitel 3.2.4 und 3.2.5 gezeigt, die größte Relevanz unter den synthetischen Dämmstoffen auf dem Markt haben.

Im Rahmen dieses Projektes wird ausschließlich die stoffliche Verwertung der Dämmstoffe betrachtet, da der Fokus auf der Kreislaufführung liegt. Die Frage, inwiefern bei der Herstellung der Dämmstoffe auf sekundäre Rohstoffe zurückgegriffen wird oder zukünftig werden kann, wird ebenfalls untersucht.

6.1 Expandiertes Polystyrol (EPS)

EPS wird in zwei grundlegenden Schritten hergestellt. Zunächst wird PS-Granulat vorgeschäumt und anschließend in der jeweils gewünschten Form ausgeschäumt. Das verwendete PS-Granulat wird in der Regel nicht von den Dämmstoffherstellern selbst hergestellt, sondern von Chemieunternehmen eingekauft. Das eingekaufte Granulat enthält bereits die gesamten Komponenten wie Farbe, Treibmittel und Flammenschutzmittel. In den Dämmstoffwerken wird ausschließlich Dampf und Hitze benötigt, um den reinen unkaschierten Dämmstoff herzustellen (EPS 2021).

Der aktuell gängigste Entsorgungsweg von EPS-Dämmstoff ist die energetische Verwertung durch Verbrennung (Strunk 2018). Stoffliche technisch mögliche Verwertungswege sind das Polystyreneloop Verfahren, eine Rückführung in die Produktion und eine Verwertung in der Baustoffindustrie bzw. in der sonstigen Produktherstellung.

6.1.1 Stoffliche Rückführung in die Produktion

Bereits heute erfolgt eine stoffliche Rückführung von Produktionsverschnitt und Baustellenverschnitt in die Produktion. Einige Hersteller geben an, aus abfallrechtlichen Gründen ausschließlich die eigenen EPS-Dämmstoffe von der Baustelle zurückzuführen. Dabei wäre aber auch eine Rückführung der Dämmstoffe von anderen Herstellern technisch möglich. Dies wird von einigen Herstellern auch schon entsprechend praktiziert, eine Genehmigung hierfür ist wohl vergleichsweise einfach zu erhalten. Die Hersteller, die auch fremde Dämmstoffe zurückführen und stofflich verwerten, berufen sich auf ein in Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde erstelltes Rechtsgutachten. Eine Rückführung von Post-Consumer-Abfällen erfolgt derzeit noch nicht (EPS 2021).

Für die stoffliche Rückführung werden die Verschnittreste zunächst geschreddert und die EPS-Kügelchen auf eine definierte Korngröße vereinzelt. Ein Pressen oder Mahlen darf nicht

erfolgen, da die EPS-Kügelchen nur in expandierter Form erneut verwendet werden können. Die vereinzelt EPS-Kügelchen werden mit den frisch aufgeschäumten EPS-Kügelchen aus dem ersten Aufschäumungsschritt vermischt und gemeinsam mit diesen in den weiteren Ausschäumungsschritt gegeben, wo sie erneut mittels Hitze und Druck in Form gebracht und verbunden werden (EPS 2021).

Laut Hersteller beträgt der durchschnittliche stofflich rückgeführte Anteil in die Produktion ca. 10 M.-%. Je nach Produkt kann dieser derzeit bis zu 30 M.-% erreichen. (EPS 2021)

Erforderliche Materialeigenschaften für die Rückführung:

In der POP-Verordnung wurde 2016 ein Grenzwert für HBCD festgelegt, mit dem das Ziel verfolgt wird, HBCD-Flammschutzmittel aus dem Wertstoffkreislauf auszuschließen (EU 2016). Das rückgeführte EPS muss absolut sauber und sortenrein sein. Auch darf der Dämmstoff nicht komprimiert vorliegen, da er dadurch seine dämmende Eigenschaft verliert. Einmal kompakter Dämmstoff kann nicht in die EPS-Produktion zurückgeführt werden (EPS 2021). Ist im Folgenden von HBCD-„freiem“ EPS die Rede bedeutet dies, dass es sich um EPS handelt, das die HBCD-Konzentrationsgrenze von 100 mg/kg gem. POP Verordnung (EG) Nr. 850/2004 über persistente organische Schadstoffe nicht überschreitet. Dämmstoffe, die heute neu hergestellt werden enthalten kein HBCD.

6.1.1.1 Aufbereitung & Sortierung

Von der Baustelle kommende EPS-Dämmplatten werden im Werk gesichtet und händisch sortiert. Eine weitere vorgeschaltete Aufbereitung ist nicht erforderlich bzw. erfolgt derzeit nicht, da ausschließlich saubere und sortenreine Platten angenommen werden. Sollen perspektivisch auch HBCD-freie EPS-Dämmstoffe aus dem Rückbau erneut in der Produktion eingesetzt werden, ist sowohl eine Aufbereitung (ggf. Reinigung) als auch eine Sortierung erforderlich, sofern die Dämmstoffe nicht sauber ab Baustelle bereitgestellt werden (EPS 2021).

Diese Aufbereitung und Sortierung wird perspektivisch sowohl aus technischen als auch aus immissionsschutzrechtlichen Gründen nicht durch die Hersteller erfolgen. Hier muss auf teilweise schon bestehende Infrastrukturen von EPS-Recyclern zurückgegriffen werden, die über entsprechende Genehmigungen zur Verarbeitung dieser Abfälle verfügen. Diese EPS-Recycler nehmen selber nur sortenreines Material an, allerdings herstellerübergreifend (SEK 2021).

Wird EPS ab Baustelle mit Bauschutt vermischt, gelangt dies zum Bauabfallaufbereiter, dieser sortiert EPS mit weiteren Kunststoffen über Windsichter, Nasstrennung, Infrarot- oder Röntgentechnik aus, woraus sich eine gemischte Kunststofffraktion ergibt, die nicht weiter sortiert wird. Diese Fraktion wird aktuell zu Ersatzbrennstoff aufbereitet und energetisch verwertet. Laut Aufbereiter ist eine weitere Trennung mit dem Ziel, EPS sortenrein zu erhalten, aktuell nur mit hohem technischem Aufwand möglich (SORT 2021). Des Weiteren wird in diesem Prozessschritt HBCD-freies und HBCD-haltiges EPS vermischt. Eine Rückführung dieser Fraktion in die Produktion von Dämmstoffen ist aus rechtlichen Gründen somit ausgeschlossen.

6.1.1.2 Sammlung / Erfassung & Rückwirkungen auf Baustelle

Eine Komprimierung auf der Baustelle für eine optimierte Logistik kann nicht erfolgen, da EPS in komprimierter Form nicht in die Produktion rückgeführt werden kann. Hersteller bieten große Foliensäcke an, die ab Baustelle befüllt werden können und optimalerweise über Rückfahrten der LKW zurück zum Herstellerwerk gelangen.

Diese Form der Sammlung würde sich auch für EPS-Abfälle beim Rückbau von Gebäuden anbieten. Das Sammeln in kleinen Chargen (Foliensäcken) ermöglicht einen händischen Transport auf der Baustelle, setzt aber voraus, dass die Foliensäcke ausschließlich mit EPS befüllt werden, das die Grenzwerte gemäß Anhang IV POP-Verordnung zu HBCD einhält. Auch die Verbauweise des Dämmstoffes entscheidet darüber, ob ein sauberer Rückbau möglich ist. EPS aus WDVS liegt nach dem Rückbau nicht in ausreichend sauberer Form vor (ABB 2021).

Für eine Rückführung von EPS nach dem Rückbau in die Produktion müssten somit folgende Kriterien erfüllt sein:

- Frei von HBCD – kann durch Schnelltest kostengünstig nachgewiesen werden
- Frei von Verunreinigungen – nicht bei WDVS möglich
- Hersteller haben eine eigene immissionsschutzrechtliche Genehmigung (aktuell nicht der Fall)
- EPS-Recycler sammeln und zerkleinern HBCD-freies Material und verkaufen es als Sekundärprodukt an Hersteller oder Kunden (Ende Abfalleigenschaft)
- Hersteller können dann herstellerübergreifendes Material verarbeiten

Die Gespräche mit Herstellern und EPS-Recyclern lassen den Schluss zu, dass dieser Verwertungsweg für eine baldige stoffliche Verwertung von EPS nicht realistisch ist. Auch, weil der aktuelle Fokus auf der stofflichen Verwertung mit PS Loop liegt (siehe folgendes Kapitel 6.1.3)

Erschwerend kommt hier hinzu, dass in Anwendungen, die den Zulassungsverordnungen des DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) unterliegen (bspw. WDVS), der Einsatz von Rezyklaten quasi ausgeschlossen wird, weil Stoffstrom und Rezeptur und dies auch vom Rohstoffhersteller genau bekannt sein müssen. Anwendungen, für die keine Zulassung nötig ist (Dachbereich, Innenausbau), unterliegen hingegen nur der europäischen Produktnorm, was diesbezüglich keine Einschränkungen bedingt.

6.1.2 Verwertung als Sekundärrohstoff

EPS Dämmstoffe, die nicht das Flammenschutzmittel HBCD enthalten, können als Sekundärrohstoff zur Herstellung anderer Produkte verwendet werden. Hier wird unterschieden zwischen komprimiertem und nicht komprimiertem EPS, also den in ihrer expandierten Struktur erhaltenen EPS-Kügelchen.

Eine beispielhafte Verwertung der nicht komprimierten EPS-Kügelchen (Mahlgut) ist in der Baustoffindustrie gegeben, die die Kügelchen als Leichtzuschlag in Putzen, Estrichen oder Porosierungsmittel in Ziegeln verwenden. Dämmstoffschüttung in Leichtestrichen ist nach Herstellerangaben ein hochwertiges Produkt; Zement und Sand im Estrich werden dadurch eingespart; die Anforderungen an den Reinheitsgrad sind nicht ganz so hoch wie für die Rückführung in die Dämmstoffproduktion (EPS 2021). Auch wird EPS als leichtes

Füllmaterial, z.B. für Sitzsäcke, herangezogen (SEK 2021). Für all diese Formen der Verwertung darf das EPS nicht komprimiert sein, so dass keine Komprimierung vor dem Transport stattfinden darf. Eine herstellereigenspezifische Sortenreinheit ist nicht erforderlich. Anhaftungen von Putz oder Mörtel sollten aber nicht enthalten sein. Einer Nutzung in der Verpackungsindustrie stehen der Transportaufwand sowie Verschmutzung und andere Anforderungen an das Material dort entgegen.

Komprimiertes EPS kann mit einem Extruder granuliert werden. Der Extrusionsprozess führt zu einem Einschmelzen des PS, wodurch es zu Regranulat (R-GPPS) geformt wird (SEK 2021). Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis ist für Regranulat größer als für Mahlgut, weil der energieaufwändige Extrusionsschritt entfällt. Die o.g. Anforderungen an die Qualität gelten auch hier. Flammenschutzmittel (außer HBCD) stellen hingegen in Abhängigkeit von der Anwendung in der Regel kein Problem dar. Die Ansprüche an die Qualität fallen zwischen den verschiedenen Anwendungsbereichen relativ ähnlich aus (SEK 2021).

Das Regranulat aus weißem EPS kann der XPS-Dämmstoffproduktion zur Verfügung gestellt werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind bspw. Eisenbahnschwellen oder Eimer. Auch regranuliertes graues EPS kann in ggf. etwas eingeschränkter Form in weiteren Kunststoffanwendungen genutzt werden, wofür es bislang aber keine Nachfrage gibt. Graues EPS hat einen geringeren Marktwert und muss langsamer extrudiert werden als weißes EPS, um Abrieb am Extruder zu vermeiden (SEK 2021; XPS 2021). Eine getrennte Regranulierung von weißem und grauem EPS ist anzustreben. An der Fassade wird heute vorrangig graphithaltiges graues EPS verbaut, das im Verpackungsbereich nicht sinnvoll einsetzbar ist.

Ein weiterer Weg ist die Extrusion von komprimiertem EPS zu neuen EPS-Kügelchen. Bereits heute wird die Extrusion zur Herstellung von Granulaten genutzt, aus denen dann wiederum graues EPS hergestellt wird. Zu diesem Zweck wird primäres GPPS und Graphit mit den übrigen Zusatzstoffen wie z.B. Treib- und Flammenschutzmittel extrudiert und so das Ausgangsgranulat zur EPS-Herstellung hergestellt (EPS 2021).

Flammenschutzmittel oder andere Additive können dazu führen, dass eine Extrusion oder eine andersartige heiße Verarbeitung nicht zulässig ist (BVSE 2021).

Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis gebietet, falls möglich, die stoffliche Verwertung als EPS-Kügelchen. „Gleiches zu Gleichem“ ist im Kunststoffbereich nicht immer praktikabel, weil die Produkte vielfältige Anwendungsbereiche haben können und der Aufwand auch in einem guten Verhältnis zum Nutzen stehen sollte.

6.1.2.1 Aufbereitung & Sortierung

Eine Aufbereitung und Sortierung durch die EPS-Recycler erfolgt nur bedingt, denn diese nehmen aktuell nur sauberes EPS entgegen, wenn dieses zu einem Sekundärrohstoff aufbereitet werden soll. Die Produktion von Sekundärrohstoffen aus nicht-sortenreinem Material gestaltet sich aufwändig, was mit entsprechenden Kosten verbunden ist.

Gewisse Verunreinigung wie Beton- und Farbanhaftungen sind aber auch technisch nicht entfernbar. Ggf. können Muster vorab eingeschickt werden, um zu eruieren, ob die Qualitätsanforderungen eingehalten werden.

Durch die EPS-Recycler werden die Dämmstoffe farblich getrennt und HBCD-haltige Dämmstoffe entfernt. Sie verwerten unkomprimierte Dämmstoffe als EPS-Kügelchen, wie im

Überkapitel beschrieben, in zahlreichen Produkten der Baustoffindustrie oder eigenen Produkten. Eine Extrusion zu Regranulat ist aktuell nicht wirtschaftlich und wird bei Bedarf von den Herstellern selber durchgeführt. Falls erforderlich sortieren die Recycler die sauberen EPS-Fraktionen sowie zerkleinern und kompaktieren diese je nach Verwertungsweg (SEK 2021).

Die Recycler sind als Abfallbehandler zertifiziert: bei den von ihnen hergestellten Sekundärrohstoffen, die einem Produkt entsprechen, handelt es sich nicht mehr um Abfall. Gepresste Stangen unterliegen hingegen noch dem Abfallrecht (SEK 2021).

6.1.2.2 Sammlung / Erfassung & Rückwirkungen auf Baustelle

Die Sammlung und Erfassung kann wie auch bei der Rückführung anhand von Foliensäcken auf der Baustelle erfolgen. Eine direkte Sammlung von sortenreinem Material mittels Container ist ebenfalls möglich. Je nach Entfernung und Menge können die Gebinde direkt zum Recycler oder Entsorger gebracht werden. Wenn es der Verwertungsweg zulässt, kann der Entsorger das Material kompaktieren, bündeln und anschließend zum Recycler fahren. Bei grauem EPS geht die Verdichtung aufgrund der abrasiven Eigenschaften des Graphits etwas langsamer vonstatten (EPS 2021).

Eine weitere Möglichkeit ist die Kompaktierung direkt vor Ort. Bereits heute gibt es Entsorger, die mobile Kompaktierer anbieten. Diese passen in einen Standard Container, der auf der Baustelle abgerollt werden kann oder sogar als Hänger verfügbar ist. Auf diesem Wege können auch geringere Mengen ökonomisch kompaktiert und transportiert werden. Nasse EPS-Dämmplatten werden durch die Kompaktierung entwässert. Unabhängig vom Verwertungsweg sollten die EPS-Dämmplatten für die Kompaktierung bereits möglichst sauber sein (HUB 2021).

6.1.3 Stoffliches Recycling über Polystyreneloop (PS Loop)

Eine gewisse Sonderrolle innerhalb der Solvolyse nimmt das CreaSolv[®]-Verfahren ein, das sich seit Juli 2021 in einer Anlage in den Niederlanden im Testbetrieb befindet. Der EPS-Kunststoff wird hier über ein Formulierungsmittel selektiv aufgelöst und anschließend wieder gefällt. Anschließend kann es nach einer Extrusion als Polystyrolregranulat (R-GPPS) verwendet werden. Unlösliche und im Formulierungsmittel gelöste Verunreinigungen können abgetrennt werden. Auch erfolgt so eine Abtrennung des Flammschutzmittels HBCD, das bislang eine stoffliche Verwertung von vor 2016 produzierten EPS-Dämmplatten unmöglich machte. (PS Loop 2020) Da das Polystyrol in seiner eigenen Form wiedergewonnen wird, handelt es sich beim CreaSolv[®]-Verfahren nach Einschätzung der Branche um kein chemisches, sondern um ein physikalisches Recycling, was sich dem werkstofflichen Recycling zuordnen lässt (Schlummer et al. 2020). Damit ist auch ein höherer Reinheitsgrad im R-GPPS zu erreichen.

Erforderliche Materialeigenschaften für die Rückführung:

Laut den veröffentlichten Zugangskriterien darf die Gesamtmenge an Verunreinigungen der Dämmstoffe ≤ 7 M.-% ausmachen (van Dijk und Reichenecker 2020). Hier gilt zu beachten, dass das EPS-Material sehr leicht ist und die geforderte Menge schnell überschritten wird, wenn es sich um mineralische Anhaftungen handelt. Auch der HBCD-Gehalt darf 1,5 M.-% nicht überschreiten (van Dijk und Reichenecker 2020).

6.1.3.1 Aufbereitung & Sortierung | Sammlung & Erfassung

PS Loop verfügt in Deutschland über sogenannte Sammelhubs (derzeit 3 Stk.) (IVH 2021). Diese sind sowohl für die Logistik als auch die erforderliche Qualität verantwortlich. Die Hauptaufgabe dieser Hubs ist die Bündelung und Kompaktierung, die auch von Sortierern wahrgenommen werden kann. Dies erfolgt sowohl über stationäre als auch mobile Anlagen. Eine geeignete Technik zur Vorbehandlung, wie z.B. Windsichter, ist noch nicht vorhanden, perspektivisch aber geplant, wenn das Verfahren technisch stabil und wirtschaftlich betrieben werden kann. Die Sammelhubs werden von bestehenden Entsorgungsfachbetrieben betrieben, die über die erforderlichen Genehmigungen verfügen. Für HBCD-haltiges Material ist der mit dem Kreislaufwirtschaftsrecht verbundene Aufwand für Transport und Sammeln deutlich größer. Die Lagerung ist anzeigespflichtig; an die Flächen werden Auflagen u.a. zur Befestigung, Wasserablauf und Überdachung gestellt (HUB 2021).

Aktuell werden von den Hubs ausschließlich saubere Dämmstoffe aus dem Rückbau von Flachdächern angenommen (HUB 2021).

Aufgrund der Kompaktierung ist die Logistik aktuell wirtschaftlich. Vor allem in Ballungszentren sind die energetischen Entsorger laut Sammelhubbetreiber zumindest aktuell ausgelastet und rufen für die Entsorgung von HBCD-haltigem EPS hohe Preise auf. Laut Aussage eines Betreibers ist es wirtschaftlich attraktiver, auf einer Baustelle in Berlin das Material vor Ort zu kompaktieren und in die Niederlande zu fahren, als in der nächst möglichen Verbrennungsanlage energetisch zu verwerten.

6.1.3.2 Rückwirkung auf die Baustelle

Bereits heute werden EPS-Dämmplatten, die beim Rückbau von Flachdächern anfallen und lose verlegt wurden, auf diesem Wege verwertet. Der von den Kompaktierungsanlagen benötigte Platz ist gering. Bei einer Anhängerlösung kann gezielt für den Rückbautag des Flachdaches die Kompaktierungsanlage auf die Baustelle gefahren werden. Der dazu erforderliche zeitliche Koordinierungsaufwand ist vergleichsweise klein. Auf der Baustelle muss das Personal entsprechend geschult werden, dass ausschließlich saubere EPS-Platten der Anlage zugeführt werden dürfen (HUB 2021). Da es sich bei der Anlage nicht um einen typisch aussehenden Container handelt, ist die Hemmschwelle, Fremdstoffe in dieser zu entsorgen, voraussichtlich deutlich höher.

6.1.4 Chemisches Recycling

Im Vergleich zu den zuvor genannten Verwertungswegen handelt es sich bei dem chemischen Recycling von PS um eine Technologie, die noch am Anfang steht. Da dem chemischen Recycling in der Branche und vor allem beim allgemeinen Kunststoffrecycling eine gewisse Relevanz nachgesagt wird und diverse Firmen in diese Technologie investieren, wird diese im Rahmen der Studie kurz erläutert.

Durch die Pyrolyse und Vergasung sind über das Pyrolysekondensat Kohlenstoffrecyclingraten von bis zu knapp 70 % möglich (Bergs et al. 2020). Die Pyrolyse ist relativ robust und kann auch mineralhaltige WDVS-Stoffströme verarbeiten. Störstoffe, die nicht Anlagenteile zusetzen, dürfen in Abhängigkeit von der angesetzten Technologie entweder kaum bis hin zu größerem Maßstab enthalten sein. Die Pyrolyse ist theoretisch auch auf gemischte Kunststofffraktionen anwendbar. Ggf. wird die Aufbereitung des Kondensats dann schwieriger,

wohingegen bei der Pyrolyse von EPS ein Kondensat hoher Qualität mit einem sehr großen Anteil an Mono-, Di- und Trimeren entsteht, der vielleicht sogar einer Synthese zugeführt werden kann. Eine mechanische Aufbereitung vor der Pyrolyse ist zwingend erforderlich, damit die Anlage nicht blockiert wird, z.B. durch das Armierungsgewebe aus dem WDVS. Die Pyrolyse kann ein wichtiger Baustein im Gesamtsorgungssystem darstellen. Vorrangig sollte immer eine mechanische stoffliche Verwertung erfolgen. Ein chemisches Recycling steht für Abfallmassen offen, die sich nicht über diesen Weg verwerten lassen und bietet eine Verwertungsalternative gegenüber einer reinen energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung.

Die vorab nötige mechanische Aufbereitung umfasst eine Zerkleinerung per Hammermühle, Siebung, Windsichtung und Verpressung. Die Schüttdichten sind ohne Verdichtung für den Transport zu gering (Bergs et al. 2020). Untersucht wurde in genannter Studie auch die thermische Volumenreduktion. Es konnte bei der Aufarbeitung von WDVS auf Basis von EPS eine hohe Reinheit des separierten EPS-Stroms bei einem hohen Wertstoffausbringen erreicht werden. Verbleibende Verunreinigungen wie Stäube aus Kleber und Putz stellen für die nachgeschaltete Pyrolyse keine Probleme dar. Neben dem Zielstrom mit dem Dämmstoff, in diesem Fall EPS, verbleibt bei der WDVS-Aufbereitung ein Stoffstrom mit Putz, Mörtel, Glasfaser und Kunststoffen; für diesen wurde bislang kein geeigneter Verwertungsweg identifiziert. Die Aufbereitung kann auch mobil auf den Baustellen stattfinden. In einer weiteren Studie der RWTH Aachen, die bis Ende 2021 abgeschlossen sein soll, wird derzeit ein Optimierungsmodell für Gesamtdeutschland aufgestellt. Darin wird unter Angabe des Verwertungsweges ermittelt, wo welche Aufbereitungsanlage stehen sollte, um unter Einbezug der Transport- und Anlageninvestitionskosten die besten Varianten zu erhalten. Sammelzentren mit Möglichkeiten der Kompaktierung werden dabei ebenso berücksichtigt.

6.1.5 Material und Konstruktionsverbunde

EPS Dämmstoffe, die zur Dämmung der Außenwand zum Einsatz kommen, werden in den meisten Fällen als WDVS verbaut. Hierbei werden die EPS-Dämmstoffe beidseitig verklebt. Eine sortenreine Trennung der Verbundmaterialien ist derzeit nicht oder nur mit sehr großem technischen Aufwand möglich (ABB 2021; SORT 2021). EPS-Dämmplatten, die als WDVS verbaut wurden, lassen sich weder zurück in die Produktion führen noch ins Polystyreneloop-Verfahren einbringen, wenn sie nicht vorbehandelt werden (EPS 2021). Zum aktuellen Zeitpunkt ist diese Vorbehandlung für die Sortieranlagenbetreiber nicht wirtschaftlich und bei den Sammelhubs noch nicht etabliert (HUB 2021; SORT 2021). EPS-Dämmstoffe, die sortenrein vorliegen, können hingegen bereits heute stofflich recycelt werden. Das große Hemmnis sind somit die Verbundsysteme, wenn diese mit Kleber befestigt werden.

In der Ziegelindustrie gibt es bereits Hohlziegel, dessen Hohlräume mit EPS gefüllt sind. Hier gibt es seitens der Hersteller die Strategie, diese nicht in den Hohlräumen zu verkleben, sondern lediglich zu stecken. Das EPS kann beim Rückbau somit leichter vom Ziegel separiert werden. Trotzdem ist eine spätere Trennung auf den Baustellen ohne Verluste und großen händischen Aufwand nicht darstellbar (7.1.3), sondern erst beim dafür nachgerüsteten Bauschuttrecycler.

Ein absehbarer stofflicher Verwertungsweg für EPS mit Kleber- und Mörtelanhaftung ist kurzfristig nicht absehbar. Hier gilt es, Alternativen zu den gängigen Verbundsystemen zu erproben und zu forcieren. Sei es die Verbunde „trocken“, also ohne Kleber, zu ermöglichen oder eine gänzlich andere Bauweise wie die Vorgehängte Fassade zu wählen.

6.1.6 Einsatz von Sekundärrohstoffen aus anderen Kunststoffbereichen in der Dämmstoffindustrie

Polystyrol kommt nicht nur zur Herstellung von Dämmstoffen zum Einsatz, sondern z.B. auch in der Verpackungs- und Lebensmittelindustrie. Polystyrol aus diesen Industriezweigen kann ebenfalls zu R-GPPS regranuliert werden, unterscheidet sich aber in Parametern wie bspw. Fließverhalten, Polymerkettenlänge, Zusatzstoffen und Schmiermittel von dem Polystyrol zur Dämmstoffherstellung. Der Einsatz von diesem Polystyrol ist in der Dämmstoffherstellung noch nicht möglich. Bedingt durch das Herstellungsverfahren von EPS muss sich das Treibmittel bereits im R-GPPS befinden. An dieser Technologie wird aktuell noch geforscht (EPS 2021; SEK 2021).

Unkompaktierte Verpackungen wie bspw. Transportverpackungen von Elektrogeräten könnten theoretisch wie alte EPS-Dämmstoffe aufgemahlen und zu expandierten Perlen/Kügelchen verarbeitet in die Blockproduktion gegeben werden (SEK 2021). Allerdings fehlt diesen Perlen das erforderliche Flammenschutzmittel, das nicht erst in der EPS-Produktion zugegeben werden kann. Auch spricht der hohe Transportaufwand von unkompaktiertem EPS gegen den Einsatz von Verpackungs-EPS in der EPS-Dämmstoffherstellung.

6.1.7 Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick

Expandiertes Polystyrol (EPS) lässt sich aus technischer Sicht vergleichsweise vielseitig entsorgen. Die aktuellen stofflichen Entsorgungswege Rückführung in die Produktion, Herstellung einer Dämmschüttung sowie Herstellung von Regranulat (R-GPPS) finden gem. Abbildung 6-1 aktuell nur bei Produktionsverschnitten (1) und Baustellenverschnittresten (2) statt. Perspektivisch sind diese stofflichen Verwertungswege auch für Post-Consumer Abfälle aus dem Rückbau (3) denkbar, sofern es sich um HBCD-freies EPS handelt und dieses absolut sauber und sortenrein vorliegt. Die einzige Ausnahme bildet die Verwertung in der Dämmschüttung, wenn diese im Verbund mit Bindemittel wie Zement als Fließestrich zur Anwendung kommt. In diesem Fall darf das rückgeführte EPS laut Hersteller auch leichte Verunreinigungen aufweisen. Bei der Verwertung als Dämmschüttung mit Bindemittel handelt es sich nicht um einen Kreislauf, da durch den Verbund am Lebensende nur eine Verbrennung in Frage kommt.

Für die genannten Verwertungswege darf das EPS nicht kompaktiert werden, auch darf kein HBCD enthalten sein. Anders verhält es sich mit der stofflichen Verwertung im PS Loop Verfahren, welches EPS in kompaktierter Form und HBCD-Haltig stofflich verwerten kann. Gleiches gilt für eine mögliche Verwertung als Sekundärrohstoff in Form von R-GPPS. Die Kompaktierung ist mit Hinblick auf die Logistikkosten ein entscheidender Faktor, mobile Anlagen ermöglichen eine Kompaktierung bereits auf der Baustelle. Da der zugelassene Verschmutzungsgrad von ≤ 7 M.-% bei EPS aus dem WDVS sehr schnell erreicht ist, muss sich zeigen, ob ein hoch selektiver Rückbau eine Verwertung möglich macht.

Die PS Loop Anlage in den Niederlanden befindet sich zum Zeitpunkt der Recherche noch in der Versuchsphase. Sollte ein technisch qualitativ zufriedenstellender und wirtschaftlicher Betrieb möglich sein, ist dieser stoffliche Verwertungsweg im Vergleich zu den Alternativen am vielversprechendsten.

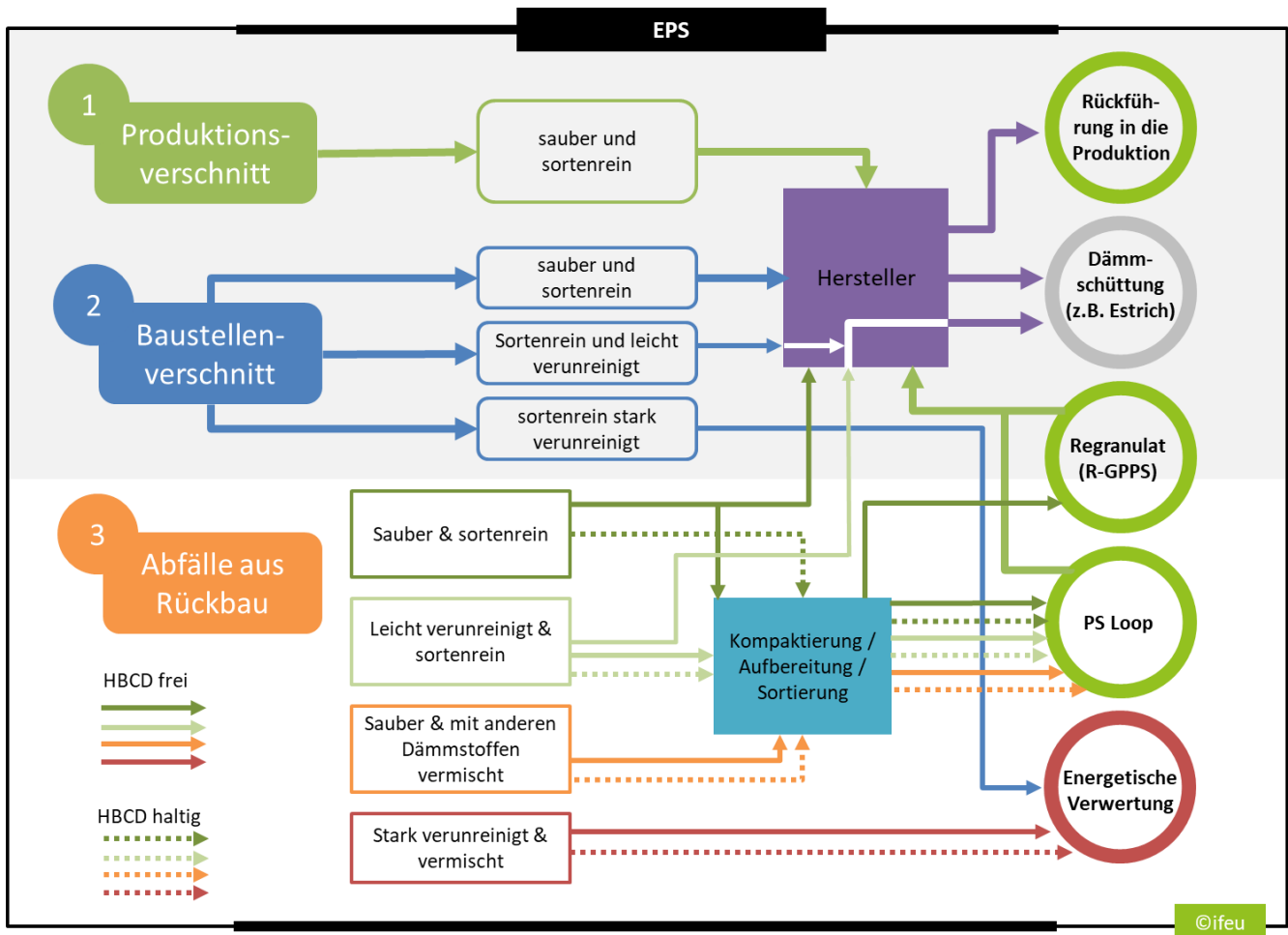


Abbildung 6-1: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von EPS Dämmstoffen

6.2 Extrudiertes Polystyrol (XPS)

Die Basis des XPS Dämmstoffes ist wie auch bei EPS das Polystyrol (PS). Zur Herstellung von XPS wird sog. General Purpose Polystyrol (GPPS) in einem Extruder geschmolzen und Treibmittel (CO₂) hinzugeführt. Weitere Zuschlagstoffe sind Flammenschutzmittel und je nach Hersteller verschiedene Farbstoffe. Einigen wenigen XPS Dämmstoffen, wird Graphit zugesetzt wird, um die dämmenden Eigenschaften zu verbessern (XPS 2021).

Der aktuell gängigste Entsorgungsweg von XPS-Dämmstoff ist die energetische Verwertung durch Verbrennung. Stoffliche technisch mögliche Verwertungswege sind das Polystyreneloop Verfahren sowie eine Rückführung in die Produktion über die Herstellung von R-GPPS (R=Recycling).

XPS Dämmstoffe, die heute zurückgebaut werden, enthalten mit hoher Wahrscheinlichkeit die Treibmittel FCKW oder HFCKW. Während das Treibmittel FCKW bereits im Jahre 1995 (EU 1994) verboten wurde, durfte HFCKW noch bis Ende 2001 industriell verwendet werden (EU 2000). Auch das seit 2016 verbotene Flammenschutzmittel HBCD darf im Fall einer stofflichen Verwertung nicht wieder in Umlauf gebracht werden (Wurbs et al. 2020). Ist im Folgenden von HBCD- „freiem“ XPS die Rede bedeutet dies, dass es sich um XPS handelt, dass

die HBCD-Konzentrationsgrenze von 100 mg/kg gem. POP Verordnung (EG) Nr. 850/2004 über persistente organische Schadstoffe nicht überschreitet. Dämmstoffe, die heute neu hergestellt werden enthalten kein HBCD.

6.2.1 Stoffliche Rückführung in die Produktion durch Sekundärrohstoffherstellung und Verwertung als Sekundärrohstoff

Verschnittreste sowohl aus der Produktion / bzw. Veredelung als auch von den Baustellen können in die Produktion zurückgeführt werden. Dies ist technisch möglich und wird bei den XPS-Herstellern bereits so praktiziert (XPS 2021).

Die Rückführung und stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff erfolgt mittels Zerkleinerung und anschließender Extrusion zur Herstellung von R-GPPS (Sekundärrohstoff). Das R-GPPS unterscheidet sich dadurch vom primären GPPS, dass es sowohl die Farbstoffe als auch das Flammenschutzmittel enthält. Das durch Extrusion hergestellte und pelletierte R-GPPS wird für die Rückführung mit primärem GPPS-Granulat vermischt und zur Herstellung von neuem XPS extrudiert, wobei erneut Flammenschutzmittel, Treibmittel und Farbstoffe der Extrusion hinzugeführt werden (XPS 2021).

Laut Hersteller liegt der so rückführbare Recyclinganteil bei maximal ca. 30 M.-%. Mit einem höheren RC-Anteil im Produkt verschlechtert sich die Dämmwirkung, da durch den Einsatz von R-GPPS offene Zellen entstehen, aus denen das Treibmittel entweicht. Hinzu kommt, dass der Dämmstoff anfälliger gegenüber Feuchtigkeit wird, was nicht erwünscht ist, da XPS vor allem in Spezialanwendungen wie der Perimeterdämmung zum Einsatz kommt (XPS 2021).

Erforderliche Materialeigenschaften für die Rückführung:

Für die Rückführung in die Produktion und die stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff muss das Material absolut sauber und sortenrein sein. Sowohl der Extruder als auch die Öffnung der Extruderdüse (ca. 2 mm) sind anfällig für feste Störstoffe. Darüber hinaus dürfen kein HBCD und kein (H)FCKW enthalten sein. Anders als beim EPS ist eine Rückführung von kompaktiertem XPS technisch möglich (XPS 2021).

Die Marktanteile von XPS aus dem Rückbau mit den erforderlichen Eigenschaften für eine Rückführung in die Produktion gehen laut Verbandsangaben gegen null. Grund ist, dass das Verbot von HBCD erst seit 2016 in Kraft ist. Folglich enthalten fast alle XPS-Dämmstoffe, die aktuell und in den nächsten Jahren zurückgebaut werden, HBCD sowie (H)FCKW (FPX 2021).

6.2.2 Stoffliches Recycling über Polystyreneloop

Da XPS wie EPS aus dem Grundstoff PS besteht, kann auch XPS in der niederländischen PS Loop Anlage stofflich durch die Solvolyse aufbereitet und zu R-GPPS verarbeitet werden. Zum Zeitpunkt der Recherche befand sich die Anlage in einem Testbetrieb, der seit Juli 2021 läuft. Zunächst ist ausschließlich die Verwertung von EPS angedacht. Sollte sich das Verfahren etablieren, geht die Branche davon aus, zukünftig das Post-Consumer XPS über diesen Weg entsorgen zu können (FPX 2021; IVH 2021; XPS 2021). Weitere Informationen zur Funktionsweise des Verfahrens können obigem Kapitel 6.1.3 entnommen werden.

Erforderliche Materialeigenschaften für die Rückführung:

Für eine Verwertung von XPS darf dieses kein (H)FCKW enthalten, da dieses beim Auflösen entweicht und in die Umwelt gelangen kann. Folglich ist eine Vorbehandlung zum Entfernen von (H)FCKW erforderlich (XPS 2021). Ein Entweichen dieser Treibmittel in die Umwelt ist verboten, so dass für eine sichere Entfernung eine Zerkleinerung mit anschließender Absaugung und Neutralisation etabliert werden muss. Ein solches Vorbehandlungsaggregat war zum Zeitpunkt der Recherche in der Polystyreneloop Anlage noch nicht in Betrieb.

Wie auch bei EPS dürfen die XPS-Dämmstoffe maximale Verunreinigungen von ≤ 7 M.-% aufweisen (van Dijk und Reichenecker 2020).

6.2.3 Aufbereitung & Sortierung

Da XPS zur Herstellung von R-GPPS absolut sauber und sortenrein sein muss, wenn es zurück in die Produktion gefahren werden soll, wäre zunächst eine Sortierung der Dämmstofffraktionen erforderlich. Hier muss neben der Unterscheidung der Dämmstofftypen auch innerhalb der XPS-Fraktionen getrennt werden, denn viele Hersteller nutzen unterschiedliche Farben für ihre Produkte. Um die Farbgebung nicht zu beeinträchtigen können andersfarbige XPS Dämmstoffe nicht in die Produktion zurückgeführt werden (XPS 2021). Für eine Verwertung durch PS Loop ist diese Trennung nicht erforderlich.

Liegt der XPS-Dämmstoff sortenrein vor, muss dieser für eine Rückführung in die Produktion von jeglichen Anhaftungen befreit werden. In der Branche konnte keine Lösung identifiziert werden, da es noch keine Erfahrungen mit XPS aus dem Post-Consumer-Bereich gibt, das frei von HBCD/(H)FCKW ist.

Analog zum EPS könnte ein Entfernen der verunreinigten Schicht (z.B. Kleberanhaftungen) mit einer Fräse oder Säge eine Möglichkeit zur Aufbereitung darstellen. Optimalerweise direkt auf der Baustelle, bevor die Platten beim Rückbau in kleinere Fraktionen zerstört werden, was händisch aber nur schwer umzusetzen sein wird. Eine entsprechende maschinelle Aufbereitung müsste daher ggf. auch beim Sortierer stattfinden.

Wird XPS mit hohem technischem Aufwand aus der gemischten Bauabfallfraktion in der Sortieranlage separiert, ist nicht nachvollziehbar, ob es sich um HBCD / (H)FCKW freies XPS handelt, wodurch eine stoffliche Verwertung ausgeschlossen ist, selbst wenn XPS in einer Monofraktion vorliegt. Ob Sortieranlagenbetreiber für gemischten Bauabfall die Investitionen zum Ausschleusen dieser Monofraktion tätigen, ist fraglich.

6.2.4 Sammlung / Erfassung & Rückwirkungen auf Baustelle

Die Sammlung von XPS gestaltet sich deutlich schwieriger als die von EPS, da sich XPS zum einen schwerer kompaktieren lässt und zum anderen nur kompaktiert werden darf, wenn das (H)FCKW dabei aufgefangen wird. Auf der Rückbaubaustelle gilt zunächst das Vorliegen der verbotenen Treibmittel auszuschließen. Gängige Leckagesuchgeräte sind in der Lage, (H)FCKW zu detektieren, wenn die Sonde in ein gebohrtes Dämmstoffloch eingeführt wird (BMK 2020). Zum Zeitpunkt der Recherche sind keine Kompaktierungsanlagen bekannt, die eine gleichzeitige Behandlung der (H)FCKW-Treibmittel ermöglichen.

Auch wenn die PS Loop Anlage in den Niederlanden über ein Abscheidungsmodul der verbotenen Treibmittel verfügt, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass ein kompaktierter

Transport bis zu der Anlage nicht möglich ist, was die Logistik vermutlich unwirtschaftlich machen würde.

Soll eine stoffliche Verwertung von XPS möglich werden, ist eine Kompaktierung von XPS in dezentral verteilten Sammelzentren bzw. bei Sortierern, die über eine entsprechende Anlagentechnik verfügen, erforderlich. Da keine Kompaktierung ab Baustelle stattfinden kann, wäre eine flächendeckende Verteilung umso wichtiger.

6.2.5 Einsatz von Sekundärrohstoffen

Zur Herstellung von XPS kommt bereits heute R-GPPS aus EPS (Dämmstoffe, Verpackungen) zum Einsatz. EPS Sammelhubs sowie Recycler, die über kompaktiertes, sauberes und HBCD-freies EPS verfügen, verkaufen dieses in Blockform an XPS Hersteller, die dieses in ihren Extrudern zu R-GPPS verarbeiten und zur Herstellung nutzen (HUB 2021; SEK 2021; XPS 2021).

Auf dem Markt befindliches PS aus der Verpackungsbranche oder von Jogurtbechern verfügt über andere Eigenschaften (hochschlagfestes Polystyrol) und lässt sich laut Hersteller nicht in relevanten Mengen als Sekundärrohstoff einsetzen.

6.2.6 Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick

Verschnittreste aus der Produktion (1) sowie saubere Verschnittreste von der Baustelle (2) lassen sich beim Hersteller über die Herstellung von R-GPPS bereits heute gut stofflich verwerten (vergl. Abbildung 6-2). Sofern die Verschnittreste Verunreinigungen aufweisen, wird eine Rückführung in die Produktion aus betriebssicherheitstechnischen Gründen vermieden.

Heute anfallende XPS-Abfälle aus dem Rückbau (3) können aktuell nicht stofflich verwertet werden, da sie neben dem verbotenen Flammschutzmittel HBCD auch die Treibmittel FCKW (bis 1995) oder HFCKW (bis 2002) beinhalten. Bei einer stofflichen Verwertung würden diese in die Umwelt entweichen. (H)FCKW-haltige XPS-Dämmstoffe gelten als gefährlicher Abfall. HBCD haltige Dämmstoffe als POP-Abfall. Im Status Quo erfolgt eine Verbrennung. Gefährliches XPS darf nur in entsprechend zulässigen Anlagen verbrannt werden. Erfolgt eine quantitative vollständige Entgasung, besteht theoretisch die Möglichkeit einer stofflichen Verwertung in der PS Loop Anlage.

Erschwerend für die Produktion von XPS-Dämmplatten aus RC-Materialien sind Zulassungsverordnungen des DIBt für die XPS-Spezialanwendungen erdberührter, statisch belasteter Bereich, Perimeter, Umkehrflachdach und Parkdecks. Zu Dämmstoffen für diese Anwendungen müssen ggf. wie für WDVS-Systeme Stoffstrom und Rezeptur und dies bis zum Rohstoffhersteller genau bekannt sein, was für Sekundärrohstoffe nicht leistbar ist (XPS 2021).

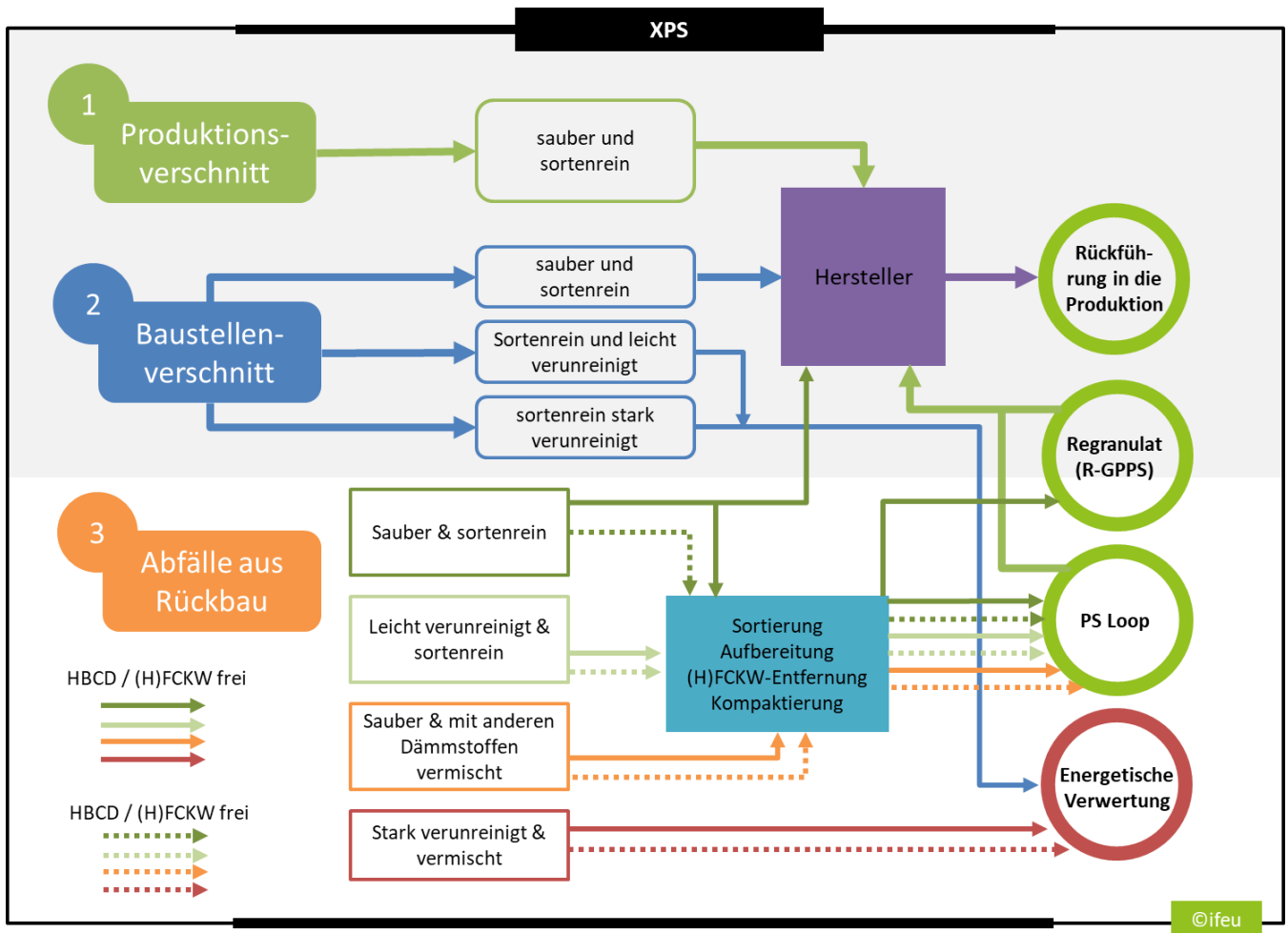


Abbildung 6-2: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von XPS Dämmstoffen

Sollte eine Entgasung des gefährlichen und POP deklarierten XPS in der PS Loop Anlage stattfinden, würde dies im Umkehrschluss hohe Transportkosten von unkomprimiertem XPS bedeuten. Umgekehrt würde eine Kompaktierung inkl. Entgasung in größerer Nähe zur Baustelle ein flächendeckendes Netz an Sammelhubs erforderlich machen, die eine immissionschutzrechtliche Genehmigung zur Behandlung von gefährlichen Abfällen besitzen. Beide Szenarien wären mit hohen Kosten verbunden.

Die stoffliche Verwertung von rückgebautem XPS, das ab 2002 verbaut wurde, kann analog zu EPS in der PS Loop Anlage erfolgen. Auch hier gilt es, Lösungsansätze zu finden, die von PS Loop geforderten Reinheitsgrade zu erreichen. Da es sich bei XPS um einen vergleichsweise festen Dämmstoff handelt, ist dieser besser für mechanische Reinigungsverfahren geeignet, da er bei möglicher mechanischer Beanspruchung nicht so schnell zerstört wird.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, das ab 2016 verbaute XPS zu regranulieren und als R-GPPS in der Dämmstoffproduktion oder weiteren Anwendungen zu nutzen.

6.3 Polyurethan (PU)

Polyurethan-Dämmstoffe bestehen aus einem Gemisch aus Polyolen und Isocyanaten, die in einer chemischen Reaktion und unter Verwendung eines Treibmittels aufgeschäumt werden (Fulev und Menkens 2012). PU-Dämmstoffe gehören zu den Duroplasten, was sie steif und belastbar macht. PU-Dämmstoffe werden als Aufsparrendämmung von Steildächern, als Flachdachdämmung, als Dachbodendämmung, als Innendämmung, als Dämmung im WDVS, als Kellerdeckendämmung und als Perimeterdämmung eingesetzt (PU 2021).

Im Gegensatz zu den meisten anderen Dämmstoffen verfügen die PU-Dämmstoffhersteller aktuell über keine Möglichkeit, Produktionsverschnitt oder Baustellenverschnitt zurück in die Produktion zu führen. Eine Rückführung wäre nur dann möglich, wenn die Polyole und Isocyanat chemisch voneinander getrennt werden, um sie erneut miteinander reagieren zu lassen. Diese Trennung ist z.B. mittels Glykolyse möglich, laut Hersteller aber noch nicht wirtschaftlich umsetzbar (PU 2021).

Um dennoch eine stoffliche Verwertung zu ermöglichen, hat sich in der Industrie ein Verfahren zur Herstellung von Funktionswerkstoffen (Klebepressplatten) etabliert, das auf den Rohstoff PU zurückgreift.

6.3.1 Verwertung als Sekundärrohstoff in Klebepressplatten

Klebepressplatten aus PU dienen als Funktionswerkstoff mit dämmenden Eigenschaften und kommen in lastabtragenden Übergangsbereichen zur Wärmebrückenvermeidung wie beispielsweise bei der Attika im Flachdachbau zum Einsatz, wo sie zwischen Dach und Wand verbaut werden (PU 2021).

Die Herstellung von Klebepressplatten erfolgt in zwei Schritten: der Zerkleinerung und Homogenisierung von PU-Verschnittresten und der anschließenden Verklebung und Pressung (PU 2021).

Der Sekundärrohstoffanteil dieser Platten kann bis zu 90 M.-% betragen, wovon 10 M.-% rückgeführte Pressplatten sein können (PU 2021).

Erforderliche Materialeigenschaften für die Rückführung:

Es können ausschließlich PU-Dämmstoffplatten verarbeitet werden, die nach der europäischen Norm DIN EN 13165 hergestellt wurden und folglich kein (H)FCKW haltiges Treibmittel enthalten. Diese Norm ist seit dem 01.01.2004 in Kraft. Handelt es sich um einen genormten PU-Dämmstoff, sind die wesentlichen Inhaltsstoffe bekannt. Die Verarbeitung von Dämmstoffen verschiedener Hersteller zu Pressplatten wurde seitens der Hersteller getestet und als qualitativ zulässig bewertet (PU 2021).

Verunreinigungen von Fasern sind bis zu 15 M.-% zulässig, da diese die Produkteigenschaften sogar verbessern können, wenn vom Kunden die entsprechenden Eigenschaften erwünscht sind. Grundsätzlich wurde seitens der Hersteller eine zulässige Verunreinigung von ca. 5 M.-% angegeben. Mineralische Anhaftungen und Metalle dürfen nicht enthalten sein (PU 2021).

6.3.2 Aufbereitung & Sortierung

PU-Dämmstoffe müssen sortenrein und weitestgehend sauber vorliegen. Eine maschinelle Aufbereitung ist noch nicht etabliert. Bauabfallaufbereiter nehmen den Dämmstoff, wenn er im Gemischten Bauabfall ankommt, nicht als relevanten Stoffstrom wahr (SORT 2021). Aufgrund seiner gelblichen Farbe und geringeren Dichte lässt sich der Dämmstoff problemlos von der mineralischen Fraktion trennen, liegt final aber immer noch als Gemisch mit anderen Kunststoffen vor. Eine weitere Trennung ist nicht wirtschaftlich, da aktuell kein Absatzmarkt für eine Monofraktion besteht (SORT 2021).

Selbst wenn ein Bauabfallaufbereiter mit moderner Abscheidetechnik eine sortenreine PU-Dämmstofffraktion bereitstellen würde, könnte diese nicht von den Herstellern zu Klebepressplatten verarbeitet werden, solange die Monofraktion noch als Abfall deklariert ist. Aktuell ist kein Hersteller bekannt, der die Genehmigung hat, PU-Abfälle zu verarbeiten. Der hohe bürokratische Aufwand wird in der Branche als signifikantes Hemmnis der Kreislauf-führung gesehen.

Selbst wenn ein Hersteller über die erforderlichen Genehmigungen verfügt, wird sich die Monofraktion der Sortieranlage nicht verarbeiten lassen, weil ausschließlich PU-Dämmplatten genutzt werden können, die nach DIN EN 13165 hergestellt sind und somit nicht das Treibmittel (H)FCKW enthalten dürfen. Ob die aussortierte Monofraktion dieses Kriterium erfüllt, kann im Nachhinein nicht mehr nachgewiesen werden.

Folglich lassen sich nur PU-Dämmstoffe stofflich verwerten, die als Monofraktion ab Baustelle angeliefert werden und dessen Hersteller bekannt sind. Die Hersteller sichten die angeordneten Dämmstoffe und lagern sie je nach Sauberkeit in unterschiedlichen Lagerstätten, um sie für die Produktion in den jeweils erforderlichen Verhältnissen dem Prozess beizufügen.

6.3.3 Sammlung / Erfassung & Rückwirkungen auf Baustelle

PU-Dämmstoffe können nur dann einer stofflichen Verwertung zugeführt werden, wenn diese bereits ab Baustelle sortenrein und möglichst sauber gesammelt werden. Sobald sie Teil des gemischten Bauabfalls werden, ist eine Verwertung ausgeschlossen.

Da im Rahmen der Produktion ohnehin eine Komprimierung des Dämmstoffes stattfindet, kann dieser auch bereits ab Baustelle komprimiert werden. So lassen sich die Logistikkosten senken. Für die Baustelle bedeutet dies, dass Platz für entsprechende Komprimiermaschinen erforderlich ist.

Eine weitere Möglichkeit wären dezentral platzierte Sammelhubs oder Sortierer, wie sie schon für EPS-Dämmstoffe beschrieben wurden. Diese können die Dämmstoffe annehmen und vor Ort in einer stationären Anlage verdichten. Dieses System ist nur dann wirtschaftlich, wenn die entsprechenden Hubs/Sortierer nahe der Anfallorte verfügbar sind. Laut Hersteller ist der Transport von unkomprimierten PU-Dämmstoffen bis zu einer Distanz von ca. 100 km wirtschaftlich.

6.3.4 Analyse der Entsorgungswege - ein Gesamtüberblick

Polyurethandämmstoffe (PU) lassen sich nicht so einfach zurück in die Produktion führen wie die übrigen betrachteten Dämmstoffe. Eine stoffliche Verwertung von Produktions- (1) und Baustellenverschnitt (2) hat sich über die Herstellung eines Funktionswerkstoffes etabliert (vergl. Abbildung 6-3). Diese dargestellten Verwertungswege funktionieren im Status Quo und werden wirtschaftlich von den Herstellern betrieben.

Auch für Post-Consumer Baustellenabfälle (3) ist eine zukünftige stoffliche Verwertung durchaus denkbar. Ein deutlicher Vorteil dieses Verwertungsverfahrens liegt an den zulässigen Verschmutzungen von bis zu 15 M.-%, auch leichte bituminöse Verunreinigungen gefährden den Recyclingprozess nicht. Da PU einen hohen Anwendungsbereich im Flachdach hat, ist diese Toleranz von großem Wert für das Recycling.

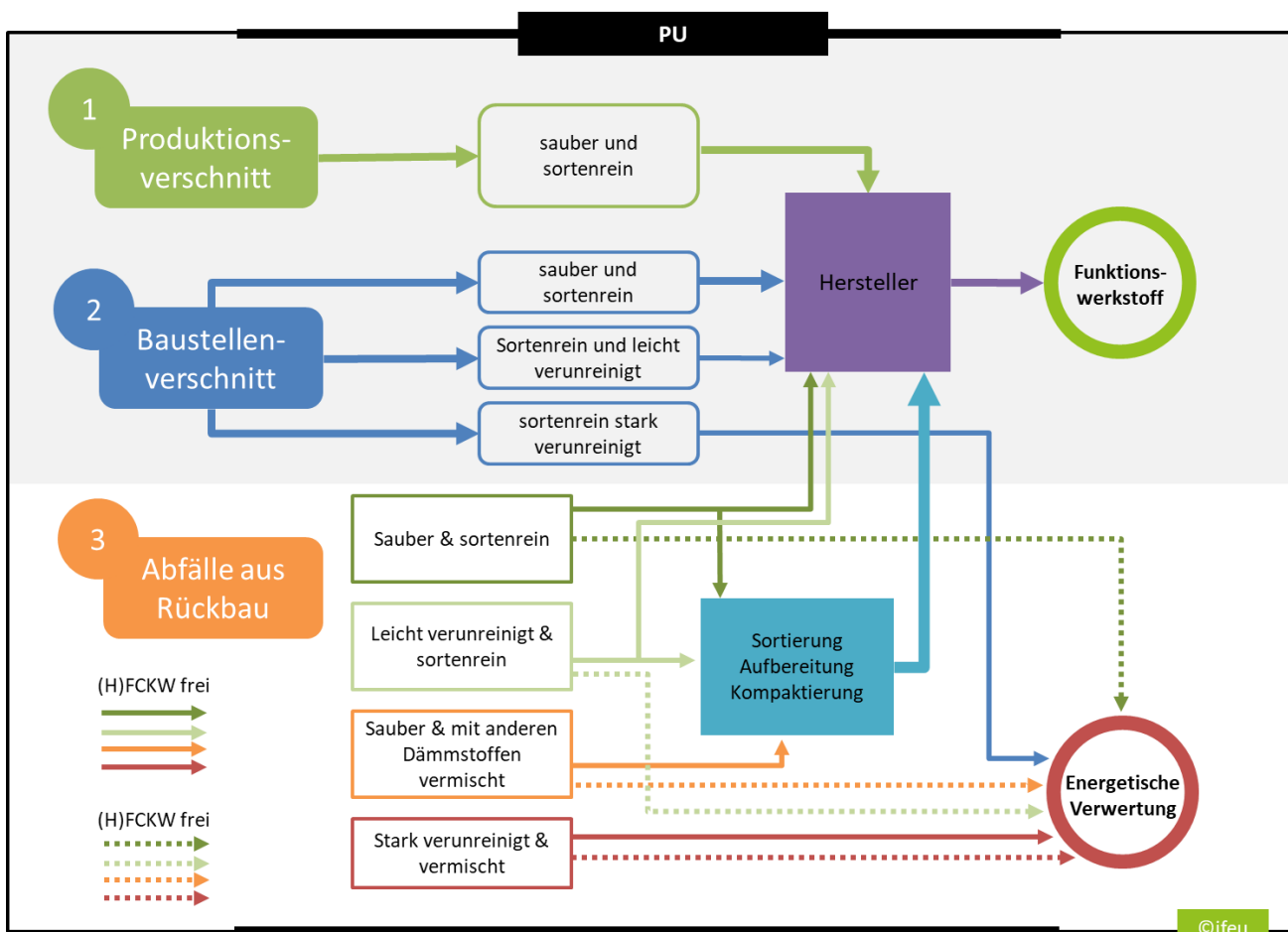


Abbildung 6-3: Mögliche aktuelle (Fraktion 1 und 2) sowie perspektivische (Fraktion 3) Entsorgungswege von PU

Die von den Herstellern genannten Hemmnisse, die dem zukünftigen Recycling im Wege stehen könnten, sind die hohen Logistikkosten und das Abfallrecht. Hierbei handelt es sich um dämmstoffübergreifende Hemmnisse, die in Kapitel 8.6 (Logistik) und 8.1.4 (Abfallrecht) näher beleuchtet werden.

Ein weiteres Hemmnis ist die unterschiedliche Rezeptur der Dämmstoffe. Um eine ausreichende Qualität der Funktionswerkstoffe gewährleisten und das Vorhandensein von (H)FCKW ausschließen zu können, werden ausschließlich Dämmstoffe verarbeitet, die ab 2004 mit Inkrafttreten der DIN EN 13165 hergestellt wurden. Ist beim Rückbau des Gebäudes nicht bekannt, ob der Dämmstoff gem. der Norm hergestellt wurde, kann keine stoffliche Verwertung erfolgen.

Der stoffliche Verwertungsweg von rückgebauten Dämmstoffen (3) durch die Funktionswerkstoffherstellung wird perspektivisch als gut umsetzbar eingeschätzt. Die aktuelle Nachfrage nach dem Funktionswerkstoff ist laut Hersteller höher als durch den aktuellen Rücklauf von Verschnittresten gedeckt werden kann.

7 Die weitere Akteurskette

7.1 Baustelle

7.1.1 Rahmenbedingungen

Das Material muss auf den **Baustellen** möglichst sauber und sortenrein erfasst werden. Die Bereitstellung als Gemisch schafft später Probleme, weil es zu Querverschmutzungen kommt und beim Sortierer nicht mehr ausreichend voneinander separiert werden kann, so dass es nicht viel Sinn ergibt, auf den Baustellen ein Gemisch zu sammeln und erst beim Sortierer zu trennen. Der Aufwand für die Trennung beim Sortierer wäre sehr groß (SORT 2021). Die GewAbfV schreibt vor, dass Dämmstoffe getrennt vom restlichen Baumassestrom gesammelt werden müssen. Es sollte darüber hinaus aber auch eine Trennung nach verschiedenen Dämmstoffen erfolgen, denn auch der Aufwand für die Trennung verschiedener Dämmstoffe beim Sortierer wäre sehr groß. Dies müsste auf einer Baustelle manuell sichergestellt werden können. In einem Gebäude sind zwar oft mehrere Dämmstoffarten verbaut, aber da die Sanierung und der Rückbau/Entkernung bauteilweise erfolgt, müsste eine Getrennthaltung möglich sein. Bei der Sanierung werden ggf. auch nicht alle Bauteile angefasst. Problematisch ist, dass auch neuere Produkte wie ihre schadstoffbelasteten Vorgänger aussehen. Glas- und Steinwolle ist augenscheinlich nur schwer differenzierbar. Daher müssen vor der Baumaßnahme Infos zu den verbauten Dämmstoffen eingeholt werden oder Analysen, sofern möglich, durchgeführt werden.

Dämmung in Dachflächen und Zwischenböden wird händisch zurückgebaut, Vollwärmeschutzsysteme außen werden, wenn der Platz es zulässt, mit dem Bagger abgeschält. Bei Platzmangel muss ein Gerüst gestellt werden, so dass der Rückbau mit großem händischen Aufwand verbunden ist (ABB 2021).

Die Maßnahmen zur Trennung schlagen sich in einem größeren Aufwand, Zeitbedarf und Transportaufwand auf der Baustelle nieder, was sich finanzieren muss. Hier müssen entsprechende Anreize Richtung getrennte Sammlung geschaffen und Fehlanreize beseitigt werden, die die Entsorgung als Gemisch günstiger machen. Zum Teil ist aber auch eine Geldersparung durch sortenreines Entsorgen zu erwarten, weil sonst eine höhere Tonnage an Verbund anfällt, die relativ teuer entsorgt werden muss. Wenn die Kosten für die Entsorgung über eine stoffliche Verwertung deutlich günstiger sind als die Beseitigung, kann sich der Zusatzaufwand rechnen. Dies hängt aber zusätzlich auch davon ab, wie teuer der daraus hergestellte Sekundärrohstoff im Vergleich zum äquivalenten Primärrohstoff ist. Falls der Sekundärrohstoff teurer ist, kann dem Abfallerzeuger ggf. kein günstiger Annahmepreis gewährt werden. Schlussendlich muss eine evtl. Kosteneinsparung dann auch noch bei den Baustellenakteuren ankommen.

Daher wäre die Schaffung eines überwachten Rückbaustandards wichtig. In den Ausschreibungen müssen die diesbezüglichen Anforderungen präzise benannt und durch Nachweise

dann in der Praxis eingefordert werden. Es bedarf dazu klarer, überwachter gesetzlicher und untergesetzlicher Regelungen.

7.1.2 Erfassung und Platzmangel

Als ein Gegenargument zur getrennten Sammlung von Dämmstoffen wird der Platzmangel auf den Baustellen ins Feld geführt, so dass die nötigen zusätzlichen Container nicht einfach gestellt werden können. Dem kann aber dadurch begegnet werden, dass bei geringem Platzangebot Container nur immer dann gezielt gestellt werden, wenn das zugehörige Material auch anfällt. Die Bestellzeit von Containern beträgt maximal zwei Tage (Bauwirtschaft 2021), was eine gut durchführbare Vorausplanung erfordert. Die Container für die unterschiedlichen Materialien gibt es in verschiedenen, auch sehr kleinen, Größen. Eine Anpassung an die unterschiedlich verbauten Mengen, die selektiv nacheinander rückgebaut werden, ist gut möglich.

Innerstädtisch könnte es schwierig sein, verschiedene Container stellen zu können. Mit nur einem Container steigen Mehraufwand und Kosten, um die Materialien nacheinander sortenrein entsorgen zu können. Es gibt mittlerweile aber auch Spezialfirmen, die für den Rückbau Rollcontainer zur Sammlung im Gebäude aufstellen, so dass getrenntes Sammeln auch bei beengten Verhältnissen möglich ist (Bauwirtschaft 2021).

Sehr nützlich auf Rückbau- und Sanierungsbaustellen mit beengten Platzverhältnissen sind Big Bags. Dämmstoffe können darin sortenrein gesammelt an Gerüste gehängt, gestapelt, unter Gerüsten und/oder auf beliebigen Containern (zwischen)gelagert werden. Im Falle von Sanierungen können diese dann bspw. mit zum Hof des Handwerkers gefahren werden, weil er die Baustelle täglich sauber verlassen muss. Big Bags sind rissfest und können gesichert werden. Sie werden solange getrennt gesammelt, bis jeweils lohnende Mengen für einen Transport zum Sortierer/Aufbereiter/Verwerter/Sekundärrohstoffhersteller zusammenkommen. Big Bags lassen sich durch Geländestapler auf der Baustelle an den Schlaufen transportieren und dann getrennt entsprechend ihres sortenreinen Inhalts in die passenden Container geben (Bauwirtschaft 2021).

Da die Handwerksbetriebe teilweise nicht über den nötigen Platz für eine Lagerung verfügen, stellt sich die Frage, kommunale Wertstoffhöfe für entsprechende Handwerksbetriebe für diese eher kleinen Dämmstoffmengen zu öffnen. Dagegen sprechen ggf. die dort erhobenen Gebühren für gewerbliche Abfallentsorger. Der nötige Platz für die Sammlung weiterer Abfallfraktionen ist dort tendenziell auch nicht vorhanden. Größere Abbruchunternehmen haben einen Recyclingplatz, die kleineren Unternehmen gegen eine entsprechende Kostenbeteiligung zur Verfügung gestellt oder zur Mitnutzung angeboten werden können (ABB 2021).

Bei einer guten Zusammenarbeit mit Containerdiensten ist eine Zwischenlagerung aber ggf. auch gar nicht nötig, wenn entsprechend oft abgefahren wird. Die mit zwei Tagen Vorlauf just-in-time gestellten Container können direkt zügig mit Big-Bags befüllt und wieder abgefahren werden.

Auf größeren Baustellen kann außerdem mit Ausnahme von EPS, das bei manchen Verwertungspfaden nicht komprimiert werden soll, ggf. ein mobiler Zerkleinerer vor Ort eingesetzt werden, so dass der Platzbedarf für die vorübergehende Dämmstofflagerung reduziert wird und eine bessere Auslastung im nachfolgenden Transportschritt erreicht wird. Auf kleinen Baustellen wird das eher nicht zielführend sein. Dort ist auch der Platz für das Aufstellen

einer solchen Anlage zumeist nicht vorhanden und die anfallenden Mengen sind zu gering. Bei Faserdämmstoffen ist eine Verdichtung teilweise bereits im Müllsack (Holzverband 2021) möglich.

7.1.3 Verbunde

Dämmstoffe lassen sich in Abhängigkeit von der Verbauweise und aufgrund ihrer Ausführung als Verbundbaustoff teilweise nur schwer sauber und sortenrein bereitstellen. Bei Wärmedämmverbundsystemen müsste auf der Baustelle vor der Entfernung von der Wand die obere Putzschicht mit dem Armierungsgewebe bspw. alle 50 cm eingeschnitten, in Bahnen abgezogen und dann getrennt vom eigentlichen Dämmstoff entsorgt werden (Bauwirtschaft 2021). Teilweise kann dies auch mit einem Sortiergreifer erfolgen (ABB 2021). Im Falle einer Verdübelung müssen die Dübelköpfe abgezackt werden (Stuckateurverband 2021). An der Armierungsschicht anhaftende Reste des Dämmstoffes werden mit entsorgt. Die Dämmung sollte dann im nächsten Arbeitsschritt von der Wand geschält/gestoßen und je nach Dämmstofftyp gesondert gesammelt und entsorgt werden. Rückstände des Klebemörtels von der Verklebung am Untergrund bleiben am Dämmstoff haften und gelangen somit in den Verwertungsweg. Diese müssten abseits der Baustelle manuell mechanisch oder zukünftig ggf. maschinell in einer Fabrik/Werkstatt bspw. durch Abhobeln/-fräsen entfernt werden (Bauwirtschaft 2021). Mit dem Sortiergreifer wird das WDVS hingegen zumeist als Verbund abgezogen und dann am Boden händisch getrennt und in Säcke verpackt. Diese Trennung findet aktuell nur statt, falls der Dämmstoff tatsächlich verwertet werden kann oder die Entsorgungskosten durch die Reduktion des Gewichts im Zuge der Mineralikabtrennung verringert werden können (ABB 2021). Für eine Trennung des WDVS in Dämmstoff und Mörtel/Armierungsgewebe sind entsprechend zwei Container bzw. eine Mitnutzung des klassischen Bauabfallcontainers (AVV 170904) nötig (Bauwirtschaft 2021). Aktuelle Forschungen wie (Bergs et al. 2020) beschäftigen sich mit der Frage, ob und wie das WDVS auch ohne Trennung in seine Bestandteile auf der Baustelle mechanisch aufbereitet, separiert und dann stofflich verwertet werden kann. Hier liegt der Fokus auf der Verwertung des gesamten WDVS ohne vorangehende Abtrennung des Dämmstoffes.

Auf der Baustelle schwer trennbar sind Mauersteine, die mit Dämmstoff gefüllt sind. Eine Auftrennung der Baustoffe in Mineralik und Dämmung bereits auf der Baustelle ist schwierig. Dies müsste tendenziell händisch erfolgen und birgt die Gefahr, dass Dämmstoffe auf der Baustelle verblasen werden. Erfolgt die Aufbereitung beim Bauschuttrecycler, ist eine Abtrennung von mineralischen Dämmstoffen per Leichtstoffabscheider ggf. schwierig, weil aufgrund der Unterbindung von Staubentwicklung auf der Baustelle Bauabfälle auch benäht werden müssen (ABB 2021). Grundsätzlich ist eine Auftrennung der Fraktionen mittels Backenbrecher oder schonender Zerkleinerung (Langsamläufer) möglich, die Zerkleinerung erfolgt selektiv. Das spröde Mauerwerk bricht, wohingegen der elastische Dämmstoff eher unzerkleinert bleibt und durch eine nachgeschaltete Siebung abgetrennt werden kann. Kraftschlussverbindungen von Mauersteinen und Dämmstoff lassen sich so trennen. Handelt es sich um Klebverbindungen bzw. sind die Mauersteine ausgeschäumt, ist die Auftrennung kaum möglich. Die mineralischen Fraktionen werden immer Dämmstoffreste aufweisen.

Dämmstoffe aus Flachdächern sind mit Bitumen vergossen oder mit aufgeschweißten Bitumenbahnen entsprechend verbacken. Die Schichten lassen sich zwar trennen, leichte Anhaftungen bleiben aber bestehen (Bauwirtschaft 2021). Aufsparrendämmung ist teilweise ober- und unterseitig kaschiert (Dachdeckerverband 2021). Alte Verbunde aus Papier, Gips und Hartschaum können je nach Verwertungsverfahren ebenfalls problematisch sein.

Eine Zusammenfassung der Hemmnisse und Lösungen zu möglichst sauberer und sortenreiner Sammlung auf den Baustellen gibt folgende Tabelle 7-1:

Tabelle 7-1: Zusammenfassung der Hemmnisse und Lösungen auf der Baustelle

Hemmnis	Lösung
Größerer Aufwand und Zeitbedarf, insbesondere bei Platzmangel (innerstädtisch)	Anreize; muss sich finanzieren oder finanziert werden; Entsorgung sortenreiner Fraktionen muss deutlich billiger werden; Geld muss bei den Baustellenakteuren ankommen
Materialvielfalt und Verwechslungsgefahr	Kennzeichnung
Platzmangel auf Baustelle	<ul style="list-style-type: none"> ● Bauteilweises Vorgehen und Just-In-Time Aufstellung von Containern passender Größe für jeweils zu erwartende Materialmenge bei selektivem, nacheinander erfolgreichem Rückbau; schnelle Befüllung über Big Bags ● Planung zwei Tage im Voraus nötig ● Sortenreine Sammlung in Big Bags, die an den Schlaufen transportiert, gestapelt, unter/an Gerüsten sowie auf beliebigen Containern gelagert und dann bspw. auf dem Hof gesammelt werden können. Evtl. Rollcontainer zur Sammlung in Gebäuden ● Öffnung der kommunalen Wertstoffhöfe für Handwerksbetriebe mit wenig Platz zur Sammlung bei geringen Gebühren → eher unrealistisch, auch aus Platzgründen und satzungsrechtlich schwierig; stattdessen Recyclingplätze großer Unternehmen nutzen (teuer) oder direkt zum Entsorger bzw. über gute Interaktion mit Containerdiensten Zwischenlagerung auf wenige Containerstellplätze optimieren ● Große Baustellen: Mobile Zerkleinerer vor Ort ● Verdichtung schon im Müllsack
Verbunde: <ul style="list-style-type: none"> ● WDVS-Verbund, nicht sauber trennbar ● Bitumenverbackene Dämmstoffen u.a. aus dem Flachdach ● Weitere Verbunde 	<ul style="list-style-type: none"> ● Händisch: Vor der Entfernung von der Wand die obere Putzschicht mit Armierungsgewebe bspw. alle 50 cm einschneiden, in Bahnen abziehen und getrennt vom Dämmstoff entsorgen, Dämmstoff dann von der Wand stoßen, Verdübelung abzwacken ● Sortiergreifer (Platzbedarf): Fallweise Abzug Putz- und Armierungsschicht oder ganzer Verbund mit anschließendem händischem Trennen am Boden ● Anschließend bspw. Abhobeln/-fräsen maschinell in Aufbereitungsanlage bspw. beim Sortierer ● Mechanische Aufbereitung des gesamten WDVS-Systems mit anschließender Trennung (noch im Labormaßstab) ● Mit Dämmstoff gefüllte Mauersteine sind auf Baustelle schlecht trennbar; bei Kraftschlussverbindung

	mögliche Auftrennung beim Bauschuttrecycler, bei schonender Zerkleinerung mit Backenbrecher oder Langsamläufer
--	--

7.2 Containerdienste

Die **Containerdienste** sind das Bindeglied zwischen den Baustellen/Bauhandwerkern und den Sortierern/Entsorgern. Durch die flexible Bereitstellung von Containern verschiedener Größe bei einer Vorlaufzeit von zwei Tagen ermöglichen sie die getrennte Bereitstellung verschiedener Dämmstofftypen beim Sortierer. Sie können sich zeitlich auf die Bedürfnisse der Baustelle/Bauhandwerker abstimmen und einen mengenmäßig optimierten Transport mit verschiedenen Fahrzeuggrößenklassen ermöglichen. Es gibt Absetzcontainer in Größen von 2 m³ bis hin zu Abrollcontainern mit 40 m³. Damit kann auch den unterschiedlichen Platzverhältnissen auf Baustellen bzw. bei Bauhandwerkern sowie der je nach Baustelle schwankenden Entfernung zum nächsten Sortierer/Entsorger Rechnung getragen werden. Die Wege sind teilweise weit. Eine Optimierung der Transportketten muss diese Randbedingungen berücksichtigen. Containerdienste, die über entsprechend viel Platz verfügen, könnten auch kleinere Mengen von Bauhandwerkern mit kleinen Fahrzeugtypen bei sich sammeln, bis entsprechende Volumina erreicht sind. Gebündelt können diese dann effizienter zum Sortierer / Entsorger transportiert werden. In diesem Falle käme dem Containerdienst zusätzlich die Rolle einer ersten Senkenfunktion zu. Bei größeren Baustellen sind täglich Fahrzeuge im Einsatz, bei kleineren Baustellen ist etwas Vorlauf nötig (SORT 2021).

Die sortenreine Abholung durch Containerdienste auf Baustellen ist recht problemlos, wenn die Dämmstoffe dort direkt in Big Bags gepackt werden und bspw. anschließend in Containern transportiert werden. Oft fällt zudem nur eine Dämmstoffart an. Die Zusammenarbeit mit den Baustellen funktioniert oft gut, die Rückbaufirmen kennen die Thematik (SORT 2021).

Für den Transport [gefährlicher Abfälle] von der Baustelle zum Containerdienst ist bei Mengen >20 t ein Einzelentsorgungsnachweis und sonst ein Sammelentsorgungsnachweis erforderlich (SORT 2021).

Abbruchunternehmen übernehmen i.d.R. auch die Funktion des Containerdienstes und fahren die sortenreinen Fraktionen von der Baustelle direkt weiter zu den Entsorgungsanlagen. Eine Zwischenlagerung erfolgt dann nur im Falle von Kleinstbaustellen. Die Transportwege belaufen sich auf ca. 50 km (ABB 2021).

7.3 Sortierer/Entsorger

Den **Sortierern** kommt eine Senkenfunktion zu. Hier muss für eine stoffliche Verwertung vorab eine separate Bündelung der jeweiligen Dämmstofftypen erfolgt sein, wozu eine entsprechend getrennte Erfassung und Lagerung der separat angelieferten Dämmstoffe nötig ist. Im Normalfall ist dafür ausreichend Platz vorhanden. Die Unterbringung der Big Bags erfolgt bspw. in 40 m³ Containern oder durch direkte Stapelung (SORT 2021). Von dort kann der Transport in großen Einheiten zu Verwertern/Sekundärrohstoffherstellern erfolgen. Eine vorherige Vorbehandlung ist möglich, um die Dämmstoffe zur Erhöhung der Transportauslastung zu verdichten, falls der Verwertungsweg dies zulässt. Die gepressten Dämmstoffe können dann sortenrein zum Recycler oder Hersteller gefahren werden. Eine Pufferung/Zwischenlagerung erfolgt mit dem Ziel, die Lkws für den Ferntransport auslasten zu können (SORT 2021).

Den Sortierern kommt weiterhin die Aufgabe der industriellen Aufbereitung und Nachsortierung zu. Ein gewisser Grad an Verunreinigung lässt sich auf den Baustellen nicht ausschließen. Daher muss eine Nachbehandlung bei den Sortierern vorgesehen werden. Zusätzlich müsste hier zukünftig evtl. eine maschinelle Trennung von Verbunden wie bspw. WDVS stattfinden (Bauwirtschaft 2021).

Für den Antransport [gefährlicher Abfälle] ab Containerdienst bzw. Lieferant oder Abfallerzeuger sowie den Weitertransport ab Entsorger/Sortierer ist für Mengen >20 t ein Einzel- und sonst ein Sammelentsorgungsnachweis nötig (SORT 2021).

Soll eine stoffliche Verwertung der Dämmstoffe erfolgen, ist für EPS / XPS sowie Mineralwollen eine Analyse durch den Lieferanten vorzulegen, um eine Belastung durch Flammenschutzmittel bzw. Kanzerogenität und damit Einstufung als überwachungsbedürftiger bzw. gefährlicher Abfall ausschließen zu können. Ist dies jedoch nicht möglich, erfolgt automatisch diese Einstufung. Noch wird eine stoffliche Verwertung eher selten praktiziert. Die Absatzwege zur stofflichen Verwertung müssen kommuniziert und den Sortierern / Entsorgern bekannt gemacht werden.

7.4 Sekundärrohstoffhersteller

Hier werden die alten Dämmstoffe schließlich für die stoffliche Verwertung vorbereitet oder direkt in eigene Produkte überführt, wofür diese jeweils sauber und sortenrein angeliefert werden müssen. Die Dämmstoffe gehen dabei auch in andere, auch teilweise im Zuge der Verwertung neu kreierte Produkte und Anwendungen außerhalb der Dämmstoffindustrie (SEK 2021). Auch diese Art der stofflichen Verwertung ist sinnvoll, wenn die entsprechenden Produkte und Anwendungen einen Nutzen erzielen und Primärmaterialien ersetzen. Es wird versucht, damit das Aufwand- zu Nutzenverhältnis des Recyclings zu minimieren.

8 Allgemeine Rahmenbedingungen

8.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

8.1.1 Gewerbeabfallverordnung und Vergaberecht

Ziel:

Getrennte Erfassung nach einzelnen Dämmstofftypen bereits ab Baustelle forcieren. Die Dämmstoffe müssen für eine stoffliche Verwertbarkeit sauber und sortenrein vorliegen und dies schon ab Baustelle. Wenn das nicht der Fall ist, bleiben derzeit nur eine Beseitigung bzw. eine energetische Verwertung.

Lösung:

Die Gewerbeabfallverordnung schreibt eine getrennte Sammlung von Dämmstoffabfällen vor. Ein strenger und konsequenter Vollzug dieser Verordnung kann die getrennte Sammlung verbessern. Eine gemischte Sammlung verschiedener Dämmstoffarten ist gemäß der Gewerbeabfallverordnung erlaubt, reicht allerdings nicht aus, um die für eine stoffliche Verwertung nötige Sortenreinheit zu erreichen. Um eine nach Dämmstofftypen getrennte Sammlung vorzugeben, müssten zunächst die Abfallschlüssel für Dämmstoffabfälle erweitert werden. Momentan ist nur eine Unterscheidung von Dämmmaterial mit Asbest (170601*), Dämmmaterial aus gefährlichen Stoffen (170603*) und anderem Dämmmaterial (170604) und somit keine Unterscheidung verschiedener Dämmstofftypen möglich. Die Gewerbeabfallverordnung müsste dann im zweiten Schritt an dieser Stelle angepasst werden.

Weiterhin könnten die Deponierung oder energetische Verwertung als Standardentsorgung durch eine konsequente Umsetzung der Gewerbeabfallverordnung verhindert werden. In Verbindung mit einer entsprechenden Überwachung der Baustellen bzw. der verschiedenen Akteure lässt sich so sicherstellen, dass diese Abfallmassen vorrangig einem Recycling bzw. einer entsprechenden Vorbehandlungsanlage zugeführt werden, die Sortier- und Recyclingquoten nachweisen muss. Eine energetische Verwertung oder Beseitigung ist dann nur möglich, wenn sich andere Optionen im Einzelfall technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar erweisen.

Gleichzeitig müssten in der Vergabepaxis für Sanierungen und Rückbau Standards zur Selektivität und Getrennthaltung festgeschrieben werden, die in der Ausschreibung präzise benannt werden und die in der Ausführung nachzuweisen sind. Dafür sind klare überwachte gesetzliche und untergesetzliche Regelungen nötig und damit eine Änderung der Bauordnung.

8.1.2 Erweiterte Herstellerverantwortung

Ziel:

Die Hersteller sollen das Lebensende ihrer Produkte mitdenken und Vorkehrungen für deren stoffliche Verwertung treffen.

Lösung:

Eine erweiterte Herstellerverantwortung, wie sie in Deutschland bereits z.B. für Batterien vorgeschrieben ist, verpflichtet die Hersteller den Transport und die Entsorgung zu gewährleisten. Die Entsorgungskosten werden mit dem Kaufpreis des Produktes abgedeckt, die Abgabe der Batterien ist für den Kunden somit mit keinen weiteren Kosten verbunden.

Frankreich führt eine solche erweiterte Herstellerverantwortung ab dem 01.01.2022 auch für Baustoffe ein und schließt dabei auch Dämmstoffe ein. Die Pflicht zur Rücknahme tritt nur dann in Kraft, wenn der Dämmstoff frei von Anhaftungen ist, da die Hersteller nicht in der Verantwortung stehen, „fremde“ Baustoffe mit zu entsorgen. Die entsprechende Möglichkeit zur kostenfreien Anlieferung des sortenreinen Abfalls könnte die Bauherren dazu bewegen, einen getrennten Rückbau der Dämmstoffe anzustreben. Ob sich der Aufwand des hoch selektiven Rückbaus lohnt, hängt nicht zuletzt auch von den dazu alternativen Entsorgungswegen ab.

Eine erweiterte Herstellerverantwortung kann auch dazu führen, dass die Hersteller Entsorgungsstrukturen aufbauen und intensiver in neue Technologien und Produkte mit höheren Recyclinganteilen investieren. Baustoffe sind allerdings sehr langlebige Produkte, die erweiterte Herstellerverantwortung greift erst für diejenigen Dämmstoffe, die nach dem Zeitpunkt der geltenden Herstellerverantwortung verkauft werden. Nichtsdestotrotz wäre der Beschluss einer solchen Verordnung auch in Deutschland ein klares Zeichen an die Branche, den gesamten Lebenszyklus auch beim Design neuer Produkte mitzudenken.

Als stoffliche Verwertung gilt dabei auch die Nutzung für andere Anwendungen außerhalb der Dämmstoffindustrie.

8.1.3 Einführung von Recyclingquoten

Ziel:

Erhöhung des Rezyklateinsatzes bei den Herstellern.

Lösung:

Die Vorgabe einer bestimmten RC-Quote ist bei den langlebigen Dämmstoffen im Gegensatz zu kurzlebigen Verpackungen aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von Post Consumer-Abfällen noch mit großen Herausforderungen verbunden. Vor allem Dämmstoffe für Spezialanwendungen weisen einen vergleichsweise sehr geringen Marktanteil auf. Folglich kommt bislang nicht genug Dämmstoffabfall zurück, separate Sortierfraktionen und anschließend Recyclingquoten einhalten zu können. Gerade auch erst seit Kurzem auf dem Markt befindliche Dämmstoffe, wie diejenigen aus nachwachsenden Rohstoffen, haben aktuell einen nicht ausreichend hohen Rücklauf, um entsprechende Systeme aufbauen und ambitionierte Recyclingquoten erfüllen zu können.

Auch muss eine passende Definition von „Recyclingmaterial“ gefunden werden, wie das Beispiel Italien zeigt: Dort werden für eine Zertifizierung auch Produktionsverschnittreste anerkannt. Ob dies den Recyclinggedanken für Post-Consumer-Abfälle unterstützt, ist fragwürdig. Aus ökonomischen Gründen ist eine Rückführung / Verwertung von Produktionsverschnitten bereits heute bei allen Herstellern Stand der Technik.

8.1.4 Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht

Ziel

Hersteller müssen gleichartige Dämmstoffabfälle anderer Hersteller zurücknehmen, damit eine dezentrale stoffliche Verwertung stattfinden kann, die logistisch zu bewerkstelligen ist.

Hemmnis & Lösung

Für die Behandlung von Abfällen bedarf es grundsätzlich einer Genehmigung. Es gibt Hersteller, die sich diesem langwierigen Prozess unterzogen haben. Das Beispiel eines Mineralwolleherstellers zeigt, dass auch eine Genehmigung zur Verwertung von gefährlichen Abfällen in der Dämmstoffbranche lohnenswert ist.

Für nicht gefährliche Abfälle gibt es diesbezüglich die Möglichkeit einer vereinfachten Anzeigepflicht, wenn der Abfall eines Produktes, das auch selbst hergestellt wird, gesammelt wird. Dabei spielt es keine Rolle, von welchem Hersteller das ursprüngliche Produkt stammt. Der Transport des Abfalls kann ohne A-Schild erfolgen. Im Rahmen der Herstellergespräche hat sich gezeigt, dass diese Auslegung des Abfallrechts unterschiedlich interpretiert wird und die betreffenden Genehmigungsbehörden keine einheitliche Meinung vertreten. Hier gilt es eine sichere Rechtsgrundlage zu schaffen, um die Risikobewertung mit Hinblick auf Investitionsentscheidungen zu verbessern.

Containerdienste dürfen die Abfälle über Entsorgungsnachweise zu Sortierern/Entsorgern transportieren, wo diese dann angenommen und ggf. behandelt werden können. Für den Weitertransport stellt der Sortierer/Entsorger ebenso Entsorgungsnachweise aus.

Sekundärrohstoffhersteller verfügen über die Berechtigung, Abfälle zu transportieren und anzunehmen. Sie stellen daraus eigene Produkte wie bspw. Dämmschüttungen her, die die Abfalleigenschaft verloren haben.

Sammelhubs, die bspw. von Herstellern betrieben werden, können nach Meldung bei Genehmigungsbehörden im Namen von Sortierern/Entsorgern agieren und ebenso Abfälle annehmen und ggf. behandeln.

8.2 Finanzielle Rahmenbedingungen und Anreize

8.2.1 Sortenreiner Rückbau

Ziel:

Der selektive Rückbau ist Bedingung für eine stoffliche Verwertbarkeit, weil saubere und sortenreine Dämmstoffabfälle hierfür Voraussetzung sind. Er ist in Abhängigkeit von der Bauweise mit Mehraufwand auf der Baustelle verbunden und daher teurer als der konventionelle Rückbau. Für die Baustelle ist es einfacher und ggf. auch kostengünstiger, keinen sortenreinen Rückbau der Dämmstoffe und damit keine stoffliche Verwertung anzustreben. Auch hier könnte angesetzt werden, um den sortenreinen Rückbau zusätzlich zu gesetzlichen Vorgaben (Kap. 8.1.1) zu fördern.

Lösung:

Wenn die Beseitigungsmöglichkeiten verteuert würden, lohnt sich der Mehraufwand, um in die dann günstigeren stofflichen Entsorgungswege gehen zu können. Umgekehrt könnten auch Produkte mit Sekundärrohstoffanteilen subventioniert werden, so dass die Entsorgung Richtung stoffliche Verwertung günstiger wird. Dies ist nicht der Fall, wenn die Sekundärrohstoffe bspw. teurer als die Primärprodukte sind (s. Kap. 8.2.2).

Mit klaren Vorgaben in der Vergabe zum selektiven Rückbau (Kap. 8.1.1) wird weiterhin verhindert, dass Baustellenakteure den selektiven Rückbau unterlaufen können und damit einen Preiskampf auf dessen Kosten führen. Allen Baustellenakteuren würde der Mehraufwand entsprechend gezahlt werden.

Weiterhin könnten Bauweisen gefördert werden, die leicht rückbaubar sind, so dass später kaum Mehraufwand für einen selektiven Rückbau gegeben ist (Kap. 8.3.)

8.2.2 Subventionen Sekundärer Rohstoffe

Ziel:

Einsatz von Sekundären Rohstoffen aus ökonomischer Sicht attraktiver machen. Recycling kostet Geld. Neben der sauberen und sortenreinen Bereitstellung und der Sammlung muss eine Einarbeitung und Behandlung erfolgen. Die Sekundärrohstoffe können daher teurer sein als Primärrohstoffe. Aus Umwelt- und Ressourcensicht sollten die Sekundärrohstoffe aber vorrangig eingesetzt werden. Es ist bislang einfacher und ggf. auch kostengünstiger, keine stoffliche Verwertung anzustreben bzw. bei der Produktion auf primäre Rohstoffe zurückzugreifen.

Hemmnis & Lösung

Rohstoffhersteller und Recycler/Sekundärrohstoffhersteller müssen für das Recycling Investitionen in Anlagen und Technik tätigen, die sich refinanzieren müssen. Dafür benötigen sie Sicherheit. Zusätzlich muss ggf. mit höheren Betriebskosten gerechnet werden.

Eine Subventionierung des Recyclings könnte die Hürden verkleinern. Dabei würde ein länder einheitliches Vorgehen den Akteuren die Anpassung erleichtern. In u.a. Schweden wird

das Recycling indirekt vom Staat gefördert, indem auf Primärrohstoffe höhere Steuerlasten liegen als auf Sekundärrohstoffe (Baronick et al. 2019). Die Kosten des Recyclings müssen schlussendlich von der gesamten Akteurskette getragen werden. Die teureren Sekundärrohstoffe müssen von den Herstellern bezahlt werden, so auch der Mehraufwand der Baustellenakteure. Die Rohstoffhersteller und Recycler sollten nicht alleine den Zusatzaufwand tragen müssen und ihre Produkte dennoch nur zum gleichen Preis wie Produkte aus Primärrohstoffen anbieten können.

8.3 Bauliche Rahmenbedingungen

8.3.1 Rückbaugerechte Verbauung von Dämmstoffen

Ziel:

Der Reinheitsgrad der rückgebauten Dämmstoffe soll durch rückbaugerechte Verbauung verbessert werden. Die Baukonstruktion und die Art der Verbauweise der Dämmstoffe, die durch die Baukonstruktion eingeschränkt wird, bestimmt, wie gut Dämmstoffe auf der Baustelle sortenrein rückbau- und damit stofflich verwertbar sind.

Lösung

Schon beim Bau des Gebäudes muss an den zukünftigen Rückbau gedacht werden. Das bedingt, dass Architekten die Konstruktion so planen, dass möglichst auf stoffschlüssige Verbunde verzichtet werden kann. Dämmstoffe sollten lose verbaut werden können, so dass sie später sauber und sortenrein rückbaubar sind. Sie sollten möglichst nur mechanisch befestigt und nicht verklebt werden, um den Eintrag von Stör- und Fremdstoffen in die Dämmstoffverwertung und Dämmstoffverluste Richtung Entsorgung beim Rückbau zu vermeiden. Optimal wäre, wenn die Dämmstoffe so zerstörungsfrei rückgebaut werden können, dass eine Wiederverwendung möglich ist.

Die Konstruktion bestimmt, welche Dämmstoffe zum Einsatz kommen können. Wie die Ergebnisse aus (Reinhardt et al. 2019) gezeigt haben, sind Einblasdämmstoffe und Dämmstoffmatten mit geringeren Produktionslasten verbunden als Platten, können aber nur bei entsprechender Konstruktion auch an der Außenfassade verbaut werden.

Die oft an Außenfassaden verbauten Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) auf Dämmstoffplattenbasis sind sehr aufwändig im Rückbau und selbst bei hoch selektivem Rückbau verbleibt in den meisten Fällen Kleber auf den Dämmstoffen. Durch eine andere Konstruktion können WDVS ggf. vermieden werden. Die Hersteller arbeiten mittlerweile an neuen WDVS-Systemen, die sich sauber trennen lassen. Sollte sich hier ein Durchbruch ergeben, könnten entsprechende WDVS-Systeme ohne Nachteile für den späteren Rückbau eingesetzt werden.

8.3.2 Materialmix und Verbundbaustoffe

Ziel:

Die sortenreine Rückbaubarkeit und stoffliche Verwertbarkeit muss trotz Materialvielfalt auf Baustellen und den Einsatz von Verbundbaustoffen gegeben sein.

Lösung:

Auf den Baustellen muss mit einem sehr großen Materialmix umgegangen werden, der zusätzlich durch verschiedene Verklebe- und Verfugetechniken befeuert wird. Der Entsorger hat keine genaue Kenntnis über den speziellen Abfall. Um auf den Baustellen dennoch eine spätere Identifizierung und damit auch Verwertung zu ermöglichen, sollten Baustoffe z.B. anhand eines Aufdrucks Informationen zum Material enthalten, wodurch die mögliche Entsorgungskette abgeleitet werden kann. Das sollte bereits beim Bau mitgedacht werden. Die Hersteller liefern die Entsorgungsschlüssel mit. Wichtig ist es, auf sortenreine Rückbaufähigkeit und Recyclingfähigkeit zu achten, wie es u.a. die DGNB und der Green Deal fordern. Daher sollten Gebäude- und damit auch Dämmstoffkonstruktionen vermieden werden, die zu einer Vergrößerung des Materialmixes und zu einer schlechten Rückbaubarkeit führen. Es sollten möglichst wenige Verbundbaustoffe eingesetzt und die Materialvielfalt soweit wie möglich reduziert werden. Ein Problem ist, dass es immer mehr Hightech-Verbundbaustoffe gibt.

Die Dämmstoffe werden ggf. kaschiert. Auch Ausschäumung mit PU kann dazu führen, dass keine sortenreine Trennung mehr möglich ist. Falls möglich, sollte beides vermieden werden. Besonders kritisch ist auch das Vergießen oder Aufschweißen von Bitumenbahnen.

Verbunde aus Mauersteinen und Dämmstoffen können auf der Baustelle nur schwer getrennt werden. Beim Bauschuttrecycler ist eine Trennung von solchen kraftformschlüssigen, also nicht verklebten, Verbunden möglich, wenn ein Aggregat zur schonenden Zerkleinerung vorhanden ist (Backenbrecher, Langsamläufer). Im Sinne einer guten Entsorgbarkeit sollte ansonsten eher auf schichtenweises Anbringen von Baustoffen und Dämmstoffen gesetzt werden.

8.4 Technik

Die Sammler/Entsorger müssen als industrielle Aufbereiter, die den Dämmstoff aus dem WDVS bspw. maschinell sauberfräsen, mit eingebunden werden, weil auf der Baustelle keine weitere maschinelle Aufbereitung des WDVS möglich ist. Hierzu müssen entsprechende maschinelle Aufbereitungsverfahren getestet und etabliert werden.

Es wird an Verwertungsverfahren gearbeitet, die eine stoffliche Verwertung eines gesamten, nicht in seine verschiedenen Bestandteile getrennten WDVS ermöglichen, bspw. die Pyrolyse. Hierzu hat die Forschung aber erst begonnen.

8.5 Akzeptanz und Nachfrage

Die Nachfrage nach Produkten, die auf Sekundärrohstoffe zurückgreifen, muss gegeben sein, damit sich Systeme und Strukturen für ein entsprechendes Recycling entwickeln können. Wenn Produkte, die altes Dämmmaterial enthalten, angenommen werden, werden sich die Sekundärrohstoff- und Dämmstoffhersteller darauf einstellen. Am entscheidenden Hebel sitzen hier die Planer/Architekten und die Bauherren.

Die Produkte aus recyceltem Dämmstoffmaterial kosten ggf. mehr. Durch das steigende Umweltbewusstsein in der Bevölkerung könnten sich solche umwelt- und ressourcenschonenden Produkte aber trotzdem erfolgreich auf dem Markt platzieren und entsprechend beworben werden. Ein analoges Beispiel dazu sind Bio-Lebensmittel. Förderlich dabei ist, dass Zertifizierungssystemen zum nachhaltigen Bauen (BNB, DGNB) den Einsatz von Baustoffen aus Sekundärrohstoffen fordern. Eine solche Zertifizierung kann sich wiederum wertsteigernd auf das Bauobjekt auswirken, da Banken bei der Bewertung von Gebäuden eine vorliegende Zertifizierung als wertsteigernd erachten (Anders und Schlun 2019).

Nicht immer erreichen Produkte mit Sekundärrohstoffanteil die gleichen maximalen Eigenschaftswerte wie Primärprodukte. Für viele Anwendungsbereiche spielt das aber oft keine Rolle, so dass in der Praxis dadurch kein technischer Vorteil für Primärprodukte gegeben ist. Das muss klar kommuniziert werden. Wenn eine Nutzengleichheit mit Produkten die Sekundärrohstoffe enthalten trotzdem nicht gegeben sein sollte, müssen die möglichen Einschränkungen deutlich benannt werden.

8.6 Logistik

Der Transport von Dämmstoffen gestaltet sich aufgrund der geringen Dichte der Dämmstoffe mit entsprechend schlechter Auslastung der LKWs problematisch. Bei schlechter Auslastung muss häufiger gefahren werden, bei nahezu unveränderten Kosten pro Strecke. Folgende Optimierungsmöglichkeiten sind denkbar:

- Komprimierung mit mobilen Anlagen auf großen Baustellen (erst ab einer gewissen Entfernung ökonomisch rentabel) (Vogdt et al. 2019)
 - Schneckenverdichter EPS, XPS (FCKW frei), PU,
 - Pressung und Zerkleinerung: Mineralwolle (ungefährliche)
- Sammel- und Umschlagplatz zwischen Baustelle und Verwerter (erst ab einer gewissen Menge ökonomisch rentabel) (Vogdt et al. 2019); Einbindung der Entsorger als Sammler; Sammelhubs für Dämmstoffe ggf. auch bei bestehenden Sammlern mit ansiedeln
- Mehr Aufbereitungsanlagen

Die meisten Dämmstoffe lassen sich komprimieren. Falls nicht gefährlich, ist dies bereits auf der Baustelle möglich. Ggf. sind bei entsprechenden Entsorgungskosten auch sehr weite Transportwege für kompaktierte Dämmstoffe wirtschaftlich.

Eine gute Vernetzung von Entsorgern oder große Flotten von Herstellern ermöglichen die Sammlung bei Rückfahrten, so dass Leerfahrten und zusätzliche Fahrten dieses voluminösen Materials vermieden werden.

Wenn auf regionale Dämmstoffe zurückgegriffen wird, lassen sich die Strecken verringern und damit die Logistik vereinfachen. Damit fiele zum einen der Antransport der neuen Baustoffe zur Baustelle kürzer aus, zum anderen könnten die rückgebauten Baustoffe dann fast vor Ort von Herstellern stofflich verwertet werden.

9 Ökobilanzieller Vergleich der Entsorgungswege von Post-Consumer-Dämmstoffabfällen Status Quo vs. Stofflich

In diesem Kapitel werden die jetzt schon möglichen Entsorgungswege für die Hauptdämmstoffe jeweils aus ökologischer Sicht bewertet. Der Fokus liegt auf den Hauptvertretern der Dämmstoffgruppen mineralisch, synthetisch und erneuerbar. **Die hier dargestellte ökologische Bewertung der Entsorgungswege lässt keinen Vergleich verschiedener Dämmstoffe zu, sondern zeigt nur für jeden Dämmstoff auf, wie gut die jeweils verschiedenen möglichen Entsorgungswege aus ökologischer Sicht im Vergleich zueinander sind.** Daraus sollen die besten, jetzt schon möglichen Entsorgungswege für jeden Dämmstoff ermittelt werden.

Die verschiedenen Entsorgungswege sind unterschiedlich ambitioniert. Mit größerem Aufwand werden ggf. mehr Ressourcen verbraucht und es entstehen mehr Emissionen, welche in der Ökobilanz zu Indikatoren und Wirkungskategorien aggregiert werden. Dadurch werden Sekundärprodukte erzeugt (Abbildung 9-1). Im Falle einer thermischen Entsorgung (Verbrennung) entsteht als Produkt bspw. Strom und Wärme, im Falle der stofflichen Verwertung bspw. ein Sekundärrohstoff. Diese Sekundärprodukte können konventionell produzierte Primärprodukte ersetzen/substituieren. Um eine Nutzengleichheit der verschiedenen Entsorgungswege in der ökologischen Bewertung zu erreichen, werden deshalb die mit deren konventioneller Herstellung verbundenen Umweltlasten als Einsparung den Lasten der jeweiligen Entsorgungswege gegengerechnet. Das Netto-Ergebnis zeigt dann an, wie gut der Entsorgungsweg im betrachteten Indikator/Wirkungskategorie abschneidet.

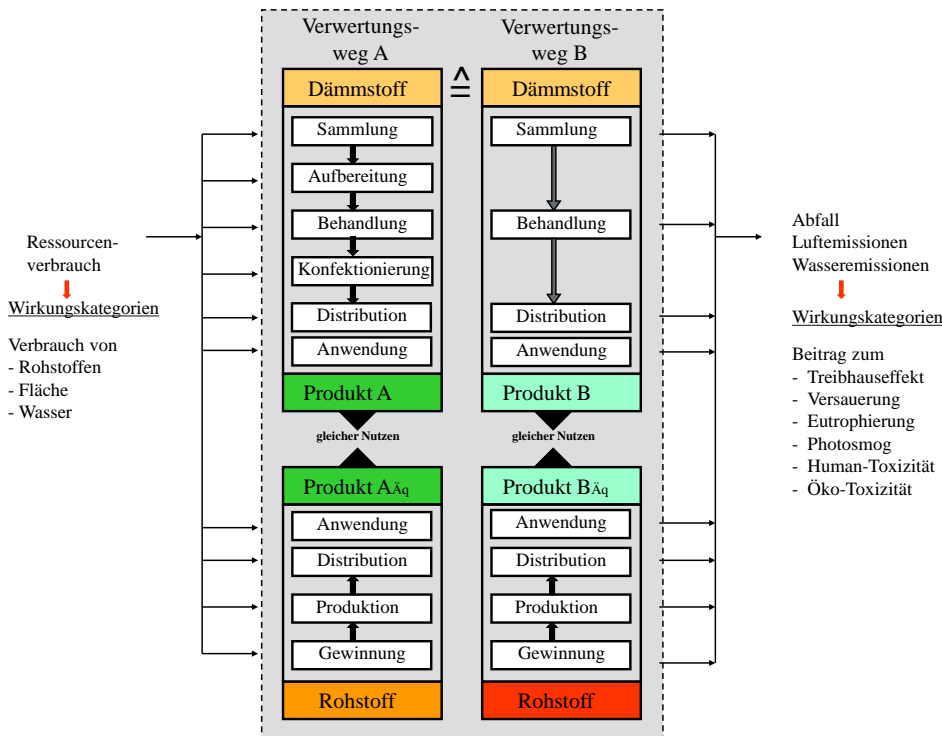


Abbildung 9-1: Bilanzrahmen für den ökologischen Vergleich von Entsorgungsvarianten

In den nachfolgenden Kapiteln werden jeweils die Ergebnisse für den Treibhauseffekt (v.a. Kohlendioxid, Methan, Lachgas) und das Versauerungspotenzial (v.a. Schwefel-, Stickoxide, Ammoniak) mit den Lasten der Entsorgung positiv über der x-Achse und den Einsparungen durch die erzeugten Sekundärprodukte negativ unter der x-Achse gezeigt. Sowohl Lasten als auch Einsparungen sind sektoral untergliedert nach verschiedenen Prozessschritten bzw. Produkten; „GS“ steht dabei für Gutschrift/Einsparung. Neben den sektoralen Lasten und Einsparungen ist als grauer Balken das Netto-Ergebnis aus beiden dargestellt. Je mehr der Netto-Balken nach oben zeigt, desto schlechter ist das Ergebnis bzw. je weiter nach unten, desto besser. Positive Netto-Werte stellen Umweltlasten, negative Umweltentlastungen dar. Bezug ist immer die Entsorgung des jeweiligen Dämmstoffes aus 1 m² Flachdachdämmung auf einen U-Wert von 0,16 W/(m²*K). Treibhauseffekt und Versauerungspotenzial decken das Spektrum aus den betrachteten Wirkungskategorien gut ab, so dass die Diskussion detaillierter sektoraler Grafiken auf diese beschränkt werden kann.

Zusätzlich werden die Netto-Ergebnisse der verschiedenen Wirkungskategorien/Indikatoren auf die jeweiligen pro-Kopf-Lasten eines Einwohners in Deutschland normiert. Das Ergebnis sind dann Einwohnerdurchschnittswerte (EDW), die vergleichend über die verschiedenen Wirkungskategorien/Indikatoren nebeneinandergestellt werden können. Hier sind auch die Ergebnisse des Indikators fossiler kumulierter Energieaufwand (KEA fossil) sowie der Wirkungskategorien terrestrisches Eutrophierungspotenzial und Feinstaubpotenzial (PM 2,5) mit angegeben.

In einer weiteren Grafik wird darauf eingegangen, wie eine Wiederverwendung des Dämmstoffs im Vergleich zur Entsorgung nach den betrachteten Wegen abschneiden würde.

9.1 Entsorgungswege Mineralische Dämmstoffe

In Abbildung 9-2 sind die Ergebnisse für die Entsorgungswege von Dämmplatten aus Steinwolle dargestellt, wie im Überkapitel beschrieben.

Die Deponierung ist mit keinen großen Lasten, aber auch keinem Nutzen verbunden. Im Zuge der Rückführung in die Produktion wird das Bindemittel verbrannt. Dies zeigt sich im Sektor „Verwertung stofflich“ und dies relativ stärker im Treibhauseffekt, weil das Bindemittel auf Chemikalien aus Erdöl basiert. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Zementmenge für die Formsteine wegen der Rückführung um 2 % erhöht werden muss. Der Effekt dadurch ist aber klein und auch im Treibhauseffekt trotz der hohen Treibhausgaslast von Zement nicht im Sektor „Verwertung stofflich“ erkennbar.

Durch die Rückführung in die Produktion werden Rohstoffe mit ihren Bereitstellungslasten eingespart. Hinzu kommt noch die Einsparung von Prozesswärme mit ihren Lasten, weil einerseits das Aufschmelzen des Altmaterials weniger Energie benötigt als das von Primärrohstoffen und andererseits durch die Verbrennung des Bindemittels Wärme erzeugt wird. Das wird zusammen im Sektor „GS Sekundärmaterial“ ausgewiesen.

Die Rückführung in die Produktion erzielt netto über alle betrachteten Kategorien/Wirkungsindikatoren Umweltentlastungen und schneidet besser ab als die Deponierung. Nach Normierung zeigt sich, dass die quantitative Bedeutung der Lasten und Entlastungen in den verschiedenen Kategorien/Wirkungskategorien in derselben Größenordnung liegt und daher keinem Indikator eine übergeordnete quantitative Bedeutung zukommt.

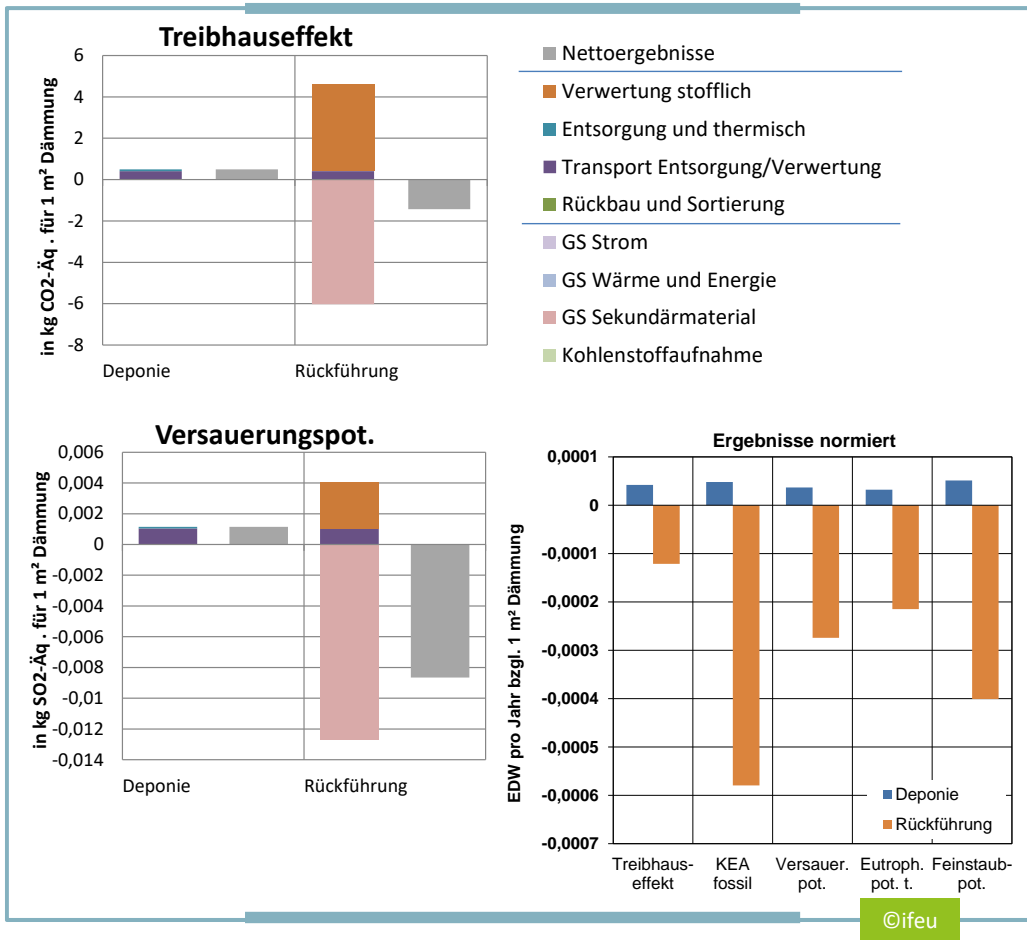


Abbildung 9-2: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von Steinwolleplatten nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten Nettoergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren

Der Netto-Einsparung durch die Rückführung in die Produktion sind Grenzen gesetzt, weil der alte Dämmstoff zu Beginn in die Dämmstoffproduktionskette eingeführt wird. Daher können neben Rohstoffen und etwas Prozesswärme keine weiteren Prozessschritte in der Dämmstoffproduktion mit deren Lasten eingespart werden. Bei einer Wiederverwendung kann hingegen die volle Last der Dämmstoffproduktion eingespart werden. In Abbildung 9-3 werden die Netto-Ergebnisse im Treibhauseffekt für die Deponierung, die Rückführung in die Produktion und die Wiederverwendung dargestellt. **Es zeigt sich deutlich, dass die größte Entlastung im Treibhauseffekt durch die Weiternutzung der Steinwolleplatten erzielt wird.**

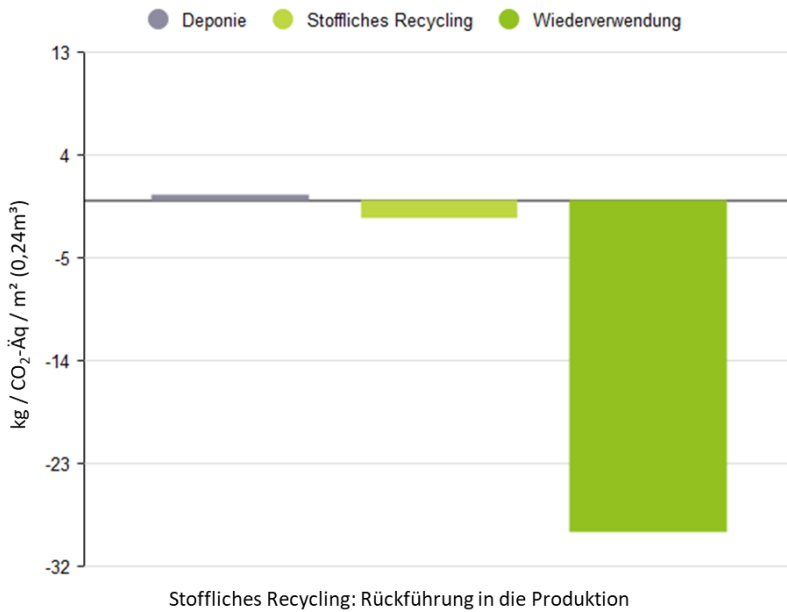


Abbildung 9-3: Nettoergebnisse im Treibhauseffekt für die Entsorgungswege vs. Wiederverwendung der Steinwolleplatten

In Abbildung 9-4 sind die Ergebnisse für die Entsorgungswege von Dämmmatten aus Steinwolle dargestellt, wie im Überkapitel beschrieben.

Wie bei Dämmplatten aus Steinwolle ist die Deponierung weder mit großen Lasten noch einem Nutzen verbunden. Im Falle der direkten Rückführung in die Produktion ist analog die Verbrennung des Bindemittels für die Lasten im Sektor „Verwertung stofflich“ verantwortlich, die im Treibhauseffekt größer ausfallen, weil das Bindemittel auf Erdöl basiert. Bei der Rückführung in die Produktion über Glasfritten zeigen sich in diesem Sektor darüber hinaus die Lasten aus der zusätzlichen Schmelzenergiebereitstellung für die Frittenproduktion aus der alten Glaswolle. Als Bedarf dafür sind 80 % der Prozesswärme der konventionellen Glaswolleproduktion angesetzt.

Analog wie bei Steinwolle werden durch die Rückführung in die Produktion die Lasten für die Bereitstellung der primären Rohstoffe sowie Prozesswärme eingespart (Sektor „GS Sekundärmaterial“). Die Prozesswärmeeinsparung setzt sich aus der für das alternative Aufschmelzen von Primärrohstoffen zusätzlich benötigte Wärme und der durch die Verbrennung des Bindemittels frei gesetzte Wärme zusammen. Die Brutto-Einsparung fällt gleich groß aus, unabhängig davon, ob Glasfritten rückgeführt werden oder eine direkte Rückführung erfolgt. Im Versauerungspotenzial fällt die Einsparung relativ zu den Lasten größer aus als im Treibhauseffekt, weil den eingesparten Primärrohstofflasten diesbezüglich eine größere Bedeutung zukommt.

Netto ist die direkte Rückführung in die Produktion in allen betrachteten Kategorien/Wirkungsindikatoren mit Umweltentlastungen verbunden und damit besser als die Deponierung. Dahingegen reichen bei der Rückführung in die Produktion als Glasfritten die Einsparungen beim Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand nicht aus, um die Lasten für das Einschmelzen zu Glasfritten auszugleichen. Es verbleiben netto Lasten, die auch etwas höher sind als die der Deponierung. In den anderen betrachteten Wirkungskategorien werden netto aber trotzdem Entlastungen und ein entsprechender Vorteil gegenüber einer Deponierung erzielt. Mit der Normierung zeigt sich anhand der vergleichsweise

ähnlichen Höhe der Lasten bzw. Entlastungen, dass keinem Indikator/Wirkungskategorie eine übergeordnete quantitative Bedeutung zukommt.

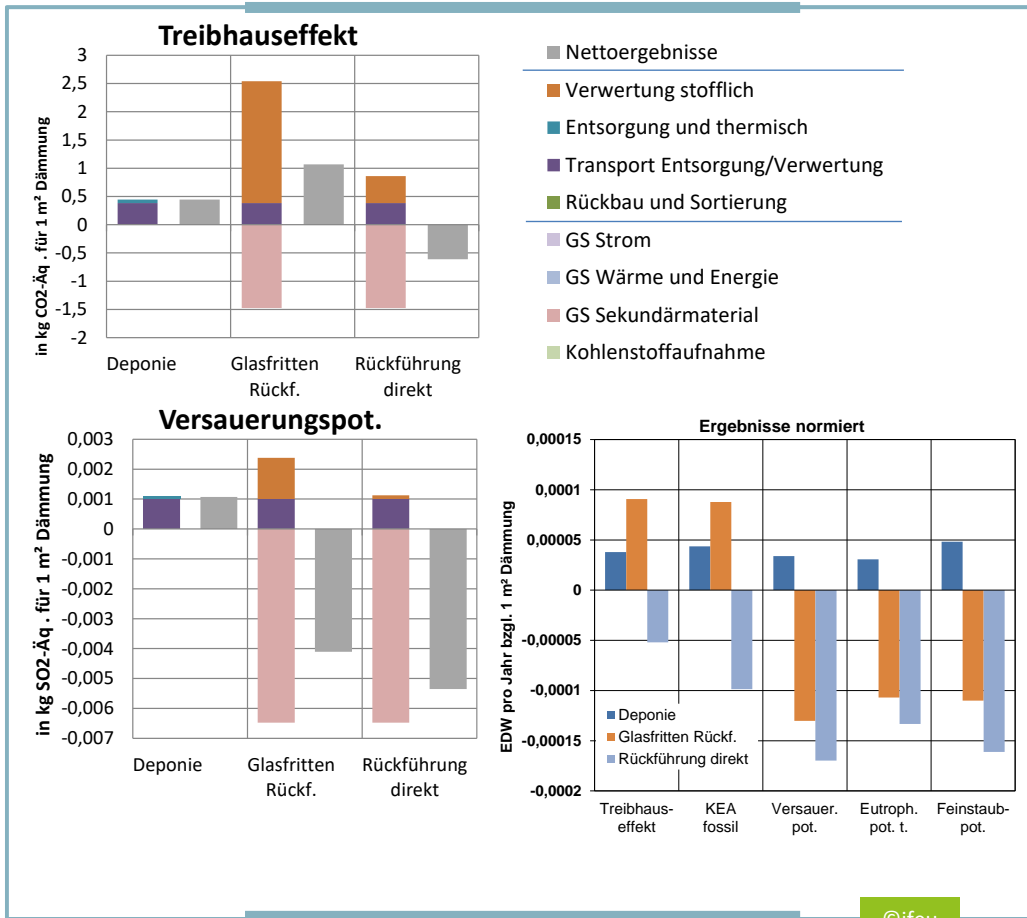


Abbildung 9-4: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von Glaswolle nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten Nettoergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren

Analog wie bei Steinwolle sind der Netto-Einsparung durch die Rückführung in die Produktion Grenzen gesetzt, weil der alte Dämmstoff zu Beginn in die Dämmstoffproduktionskette eingeführt wird. Daher können neben Rohstoffen und etwas Prozesswärme keine weiteren Prozessschritte in der Dämmstoffproduktion mit deren Lasten eingespart werden, wohingegen durch eine Wiederverwendung die gesamte Produktionslast eingespart wird. Aus Abbildung 9-5 zeigt sich deutlich, dass im Vergleich zur Deponierung und Rückführung (stoffliche Verwertung) die größte Entlastung im Treibhauseffekt durch die Wiederverwendung der Glaswolle erzielt werden kann.

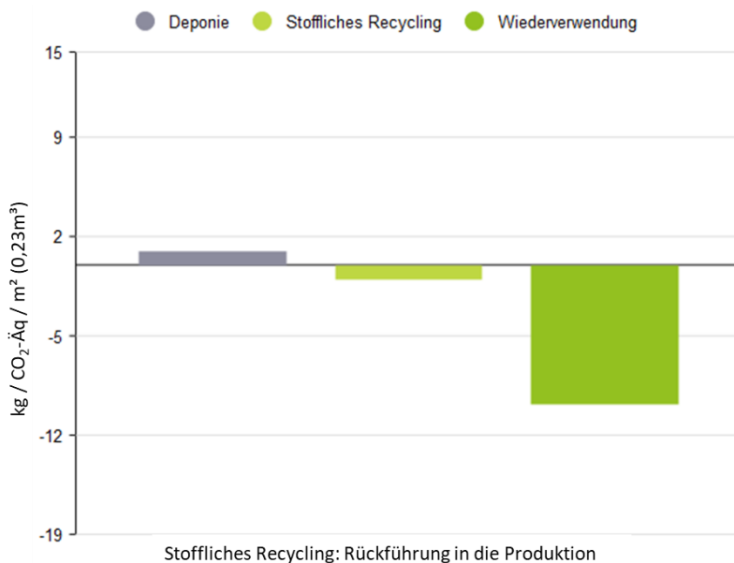


Abbildung 9-5: Nettoergebnisse im Treibhauseffekt für die Entsorgungswege vs. Wiederverwendung der Glaswolleplatten

9.2 Entsorgungswege Synthetische Dämmstoffe

In Abbildung 9-6 sind die Ergebnisse für Dämmplatten aus EPS dargestellt, wie im Überkapitel beschrieben.

Die thermische Behandlung in der Müllverbrennungsanlage (MVA) oder im Zementwerk führt aufgrund der Freisetzung des Kohlenstoffs im EPS als Kohlendioxid zu entsprechenden Treibhausgaslasten im Sektor „Entsorgung und thermisch“. EPS wird aus Erdöl hergestellt, so dass es sich darin um fossilen Kohlenstoff handelt, der nicht in die Atmosphäre freigesetzt werden sollte. Im Versauerungspotenzial zeigt sich, dass der Verbrennungsprozess Emissionen an u.a. NO_x verursacht. Aufgrund der besseren Abgasreinigung fallen die diesbezüglichen Lasten der MVA geringer aus als die des Zementwerks. Die werkstoffliche Verwertung über PS-Loop führt zu Lasten im Sektor „Verwertung stofflich“, die sich aus der Bereitstellung von insbesondere Strom und Prozesswärme für das PS-Loop-Verfahren (Solvolyse) ergeben.

Die thermische Beseitigung in der MVA schafft auf der anderen Seite eine Entlastung durch die dabei erzeugte Energie in Form von Strom und Wärme, die dieselbe Menge deutschen Netzstrommixes bzw. Wärme aus Gaskesseln in Hausheizungen mit deren Lasten substituieren. Die Entlastungen fallen aufgrund der relativ geringen energetischen Wirkungsgrade der MVA gemäßigt aus. Im Zementwerk wird durch die Verbrennung des heizwertreichen EPS Prozesswärme erzeugt, die derzeit noch solche aus dem dort sonst eingesetzten Regelbrennstoff Steinkohle substituiert. Die Folge sind derzeit entsprechend hohe Entlastungen. Durch die werkstoffliche Verwertung wird Polystyrol zurückgewonnen, das primäres Polystyrol ersetzen kann, dessen Herstellung mit relativ großen Lasten verbunden ist.

Netto ergibt sich über alle betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren ein deutlicher Vorteil für die werkstoffliche Verwertung über PS-Loop. Die Beseitigung in der MVA ist mit einer Last im Treibhauseffekt verbunden, weil die fossilen Kohlendioxidemissionen nicht durch die über die erzeugte Energie erzielten Entlastungen ausgeglichen werden kann. Die Normierung zeigt, dass die Entlastungen im terrestrischen Eutrophierungspotenzial am

geringsten ausfallen und sonst relativ ähnlich im Vergleich der weiteren Wirkungskategorien sind. Ein deutlicher Unterschied in der quantitativen Bedeutung lässt sich daraus nicht ableiten. **Es zeigt sich, dass eine stoffliche Bewertung von synthetischen Dämmstoffen aus ökologischer Sicht besonders dringlich geboten ist.**

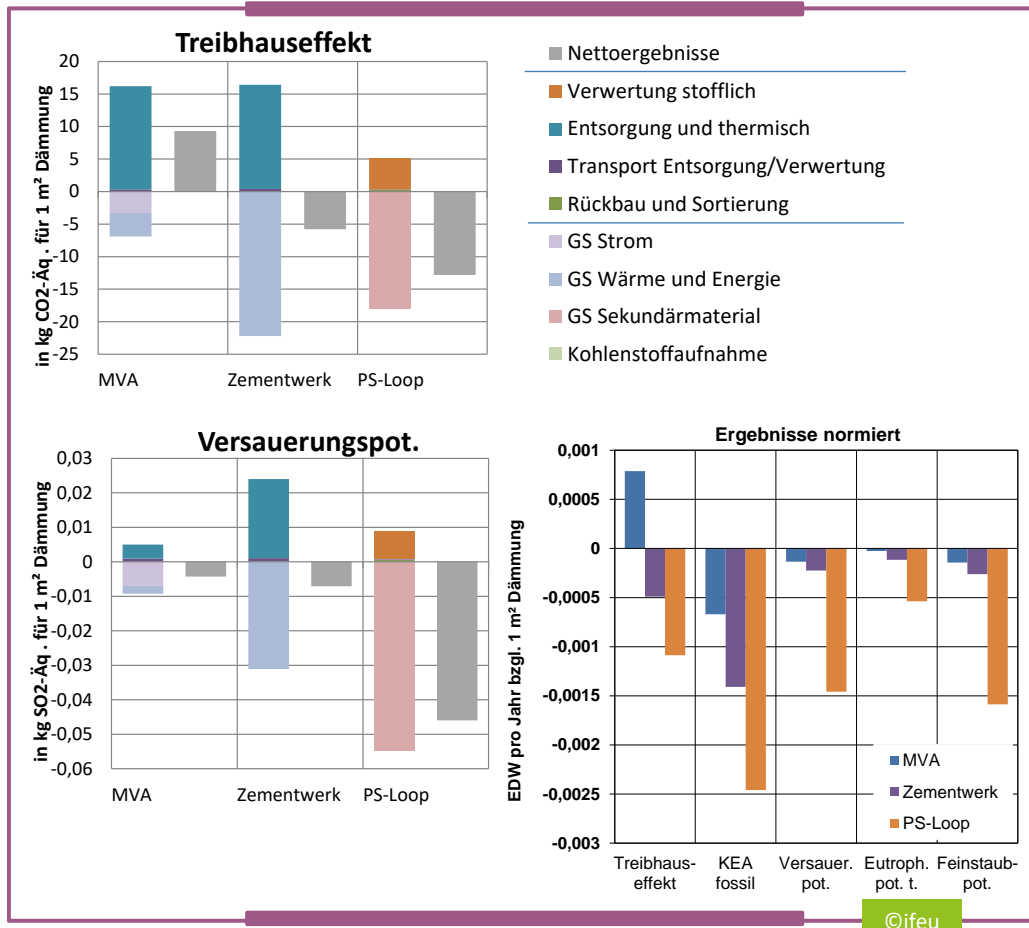


Abbildung 9-6: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von EPS-Dämmplatten nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten Nettoergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren

In Abbildung 9-7 sind die Entlastungen im Treibhauseffekt durch eine Wiederverwendung der EPS-Platten neben die Entsorgung in der MVA und die werkstoffliche Verwertung über PS-Loop gestellt. **Durch die Wiederverwendung wird noch mehr Entlastung erzielt als durch die stoffliche Verwertung.** Da die Produktion von Polystyrol, die durch die stoffliche Verwertung substituiert werden kann, aber schon einen bedeutenden Anteil an den Lasten der EPS-Dämmplattenproduktion trägt, ist die zusätzliche Entlastung nicht so groß wie bei den mineralischen Dämmstoffen oder den Dämmstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen. Bei Letzteren werden durch die Rückführung in die Produktion als stofflichen Verwertungsweg wie dort beschrieben nur kleine Anteile der Produktionslasten der jeweiligen Dämmstoffe eingespart.

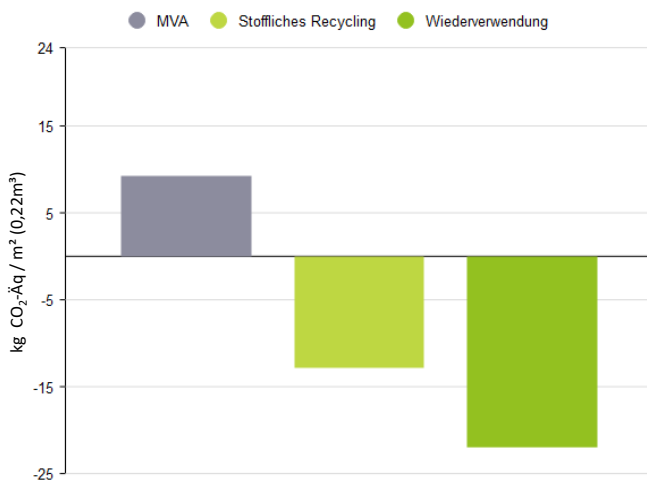


Abbildung 9-7: Nettoergebnisse im Treibhauseffekt für die Entsorgungswege vs. Wiederverwendung der EPS-Dämmplatten

Für XPS zeichnet sich ein sehr ähnliches Muster wie für EPS ab. Es bieten sich die gleichen Entsorgungswege an. Heizwert und Zusammensetzung von XPS unterscheidet sich dabei nur wenig von EPS. Die pro 1 m² verbaute Dämmstoffmenge XPS ist insbesondere aufgrund der größeren Dichte zwar größer, weshalb die absoluten Zahlen für Lasten und Entlastungen entsprechend anders sind. Aber das ändert nichts am Muster, das ausschlaggebend für die Bewertung der Entsorgungswege ist. Daher sei an dieser Stelle auf die Ausführungen bei EPS verwiesen.

Für PU-Dämmstoffe (Abbildung 9-8) gelten die Ausführungen zur thermischen Behandlung, die bei EPS gemacht wurden, analog. Als stoffliche Verwertung derzeit schon möglich ist die Nutzung des Dämmstoffes in Klebpressplatten mit dämmwirkenden Eigenschaften. Die dadurch erzielbaren Entlastungen sind sehr unsicher, weil unklar ist, welches Produkt in den entsprechenden Anwendungsfällen zum Einsatz käme, wenn es die Klebpressplatten nicht gäbe. Entweder würden dann diese Klebpressplatten aus primärem PU hergestellt werden oder es kämen Holzbaustoffe mit dämmwirkenden Eigenschaften zum Einsatz, für die es aber Restriktionen in feuchten Bereichen geben dürfte. Für die ökologische Bewertung der Entsorgungswege ist hier angesetzt, dass Klebpressplatten eine Entlastung in Höhe von 80 % der Lasten der PU-Dämmstoffproduktion erzielen. Damit ist die Entsorgung der PU-Dämmstoffe in Klebpressplatten in allen betrachteten Wirkungsindikatoren/Kategorien deutlich vorteilhaft. Die Wiederverwendung wäre entsprechend noch etwas besser als die Nutzung in Klebpressplatten.

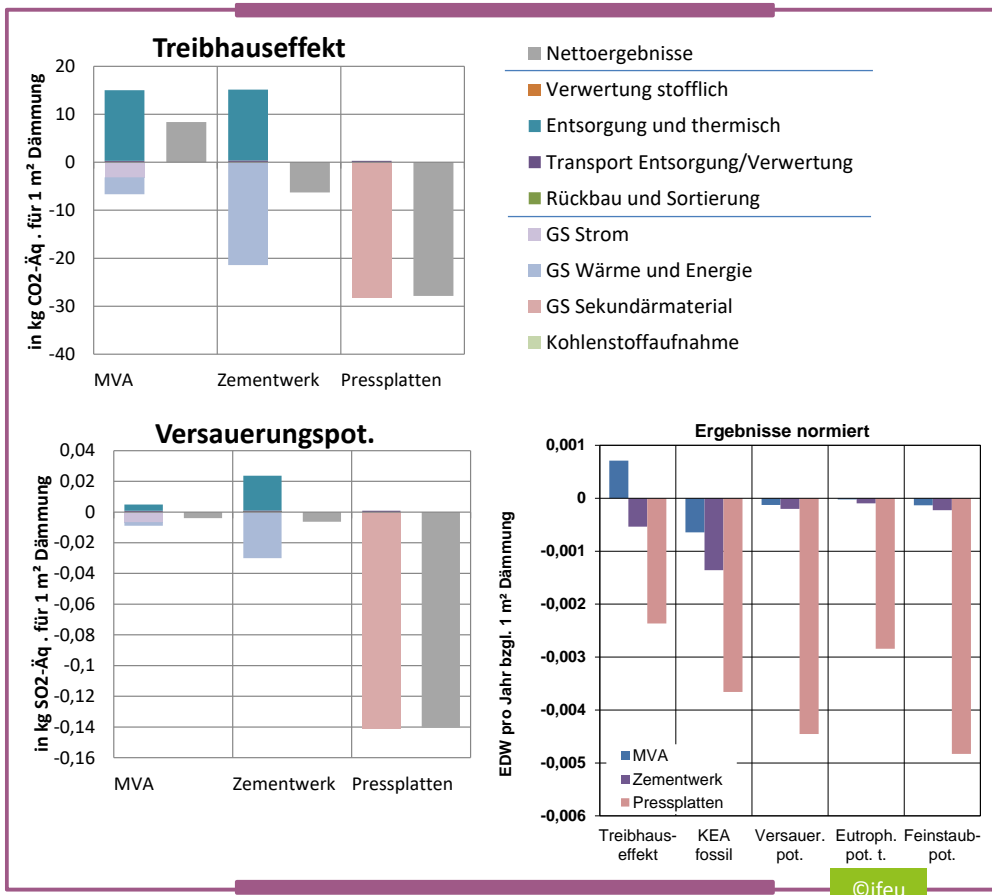


Abbildung 9-8: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von PU-Dämmplatten nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten Nettoergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren

9.3 Entsorgungswege Dämmstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen

In Abbildung 9-9 sind die Ergebnisse für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten dargestellt, wie im Überkapitel beschrieben.

Die thermische Behandlung in der Müllverbrennungsanlage (MVA), im Zementwerk oder Biomasse-Heizkraftwerk (HKW) führt aufgrund der Freisetzung des Kohlenstoffs aus dem Holz als Kohlendioxid zu entsprechenden Treibhausgaslasten im Sektor „Entsorgung und thermisch“. Da es sich bei Holz aber um ein erneuerbares Material handelt, wurde der darin enthaltene Kohlenstoff zuvor in Form von Kohlendioxid der Atmosphäre entzogen, was als Entlastung im Sektor „Kohlenstoffaufnahme“ berücksichtigt ist. Netto verbleibt nach Verrechnung keine diesbezügliche Last. Auch die Rückführung in die Produktion ist mit keiner Last verbunden. Im Versauerungspotenzial zeigt sich, dass der Verbrennungsprozess Emissionen an u.a. NO_x verursacht. Aufgrund der besseren Abgasreinigung fallen die diesbezüglichen Lasten der MVA geringer aus als die des Biomase-HKW und die wiederum geringer als die des Zementwerks.

Als Entlastung wird in der MVA und im Biomasse-HKW Strom und Wärme erzeugt, die die Lasten derselben Menge deutschen Netzstrommixes bzw. Wärme aus Gaskesseln in der Hausheizung ersetzen. Die höheren Wirkungsgrade des Biomasse-HKW bedingen die höheren Entlastungen. Im Zementwerk wird durch die Verbrennung der Holzdämmstoffe Prozesswärme erzeugt, die derzeit noch solche aus dem dort sonst eingesetzten Regelbrennstoff Steinkohle substituiert. Die Folge sind derzeit entsprechend hohe Entlastungen. Durch die Rückführung in die Produktion werden Holzfasern und damit der Rohstoff Holz eingespart, der jedoch mit keinen großen Lasten verbunden ist. Hinzu kommt noch die Einsparung von Strom und Prozesswärme für die Zerfaserung des Holzes. Weitere Prozessschritte mit größerem Aufwand können nicht eingespart werden.

Netto sind im Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand auch noch mit einer Beseitigung in der MVA etwas höhere Entlastungen zu erzielen als mit der Rückführung in die Produktion, mit einer Verwertung im Biomasse-HKW und insbesondere im Zementwerk derzeit deutlich größere. In den anderen Wirkungskategorien sind hingegen mit der Rückführung in die Produktion etwas größere Einsparungen zu erreichen, wohingegen im terrestrischen Eutrophierungspotenzial mit dem Biomasse-HKW netto leichte Lasten resultieren. Die normierten Ergebnisse zeigen, dass die Einsparungen im Treibhauseffekt und fossilen kumulierten Energieaufwand quantitativ am bedeutsamsten sind. **Daher ist derzeit aus ökologischer Sicht noch kein Vorteil für eine stoffliche Verwertung gegenüber einer thermischen Behandlung mit Energiegewinnung gegeben. Dies wird sich zukünftig aber mit einer Umstellung der Energiebereitstellung auf erneuerbare Energiequellen ändern** (vgl. auch Abbildung 9-12).

Zusätzlich gilt es zu bedenken, dass der Rückführung in die Produktion keine Kohlenstoffsenke für das im rückgeführten Holz weiterhin gebundene Kohlendioxid aus der Atmosphäre angerechnet wurde. Damit würde sich eine zusätzliche Entlastung im Treibhauseffekt von 49 kg CO₂-Äq. für 1 m² Dämmung ergeben, so dass dann das Netto-Ergebnis im Treibhauseffekt für die Rückführung in die Produktion im Bereich des Biomasse-HKWs läge, wie im schraffierten Bereich in Abbildung 9-10 gezeigt. Die Anrechnung einer Kohlenstoffsenke ist aber umstritten.

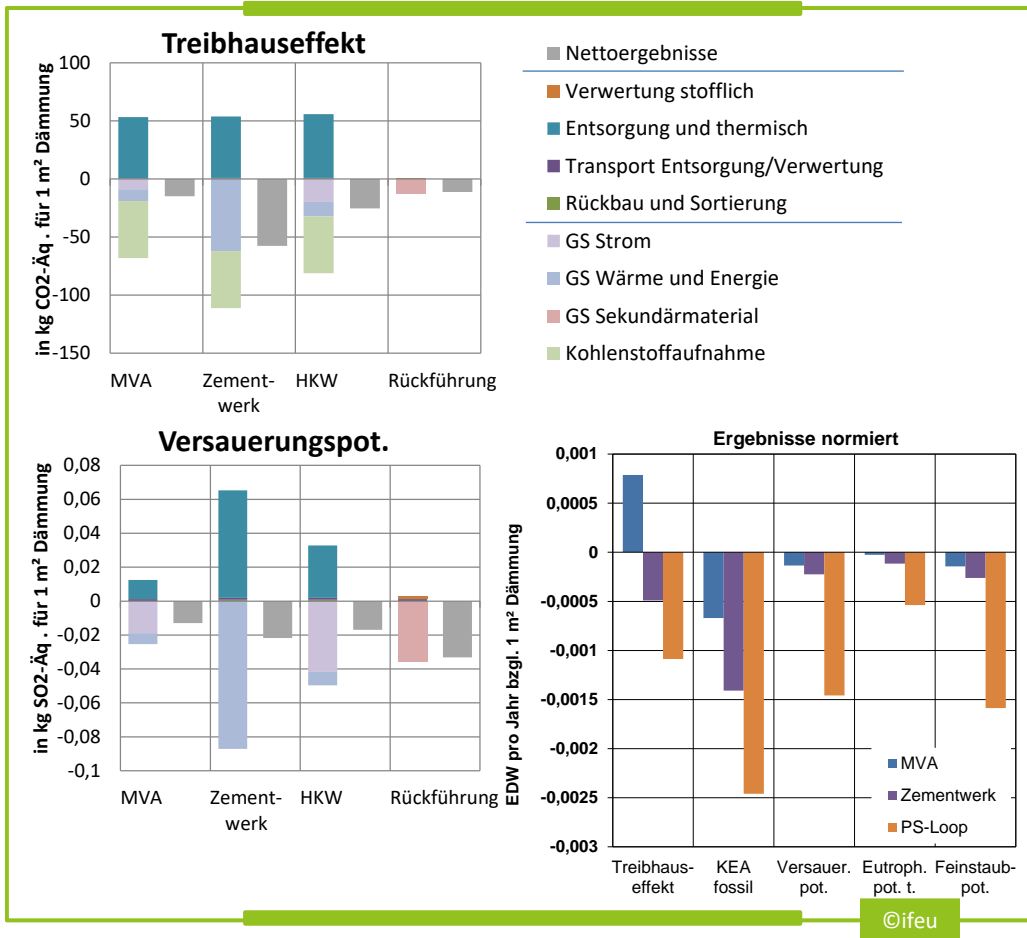


Abbildung 9-9: Ökologische Bewertung der jetzt schon möglichen Entsorgungswege von trocken produzierten Holzfaserdämmplatten nach dem Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial und den auf Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) normierten Nettoergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren

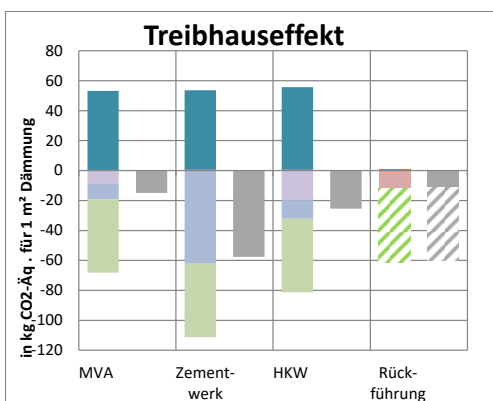


Abbildung 9-10: Treibhauseffekt für die jetzt schon möglichen Entsorgungswege von trocken produzierten Holzfaserdämmplatten bei Anrechnung einer Kohlenstoffsenke für die Rückführung in die Produktion (schraffierte Balkensektoren)

In Abbildung 9-11 sind die Entlastungen im Treibhauseffekt durch eine Wiederverwendung der trocken produzierten Holzfaserdämmplatte zusätzlich zu denen durch eine Beseitigung in der MVA und Rückführung in die Produktion dargestellt. **Daraus wird deutlich, dass die Wiedernutzung mit deutlich größeren Einsparungen verbunden ist.** Durch die Rückführung

in die Produktion lassen sich wie bei Steinwolle und Glaswolle nur kleinere Anteile der Dämmstoffproduktionslasten einsparen, weil diese eher zu Beginn des Produktionsprozesses erfolgt und die Bereitstellung des Rohstoffes Holz mit keinen großen Lasten verbunden ist. Der etwas größere Teil der Entlastung beruht dabei noch auf der Einsparung der Energie für die Zerfaserung. **Daher sollte eine Wiederverwendung der Holzfaserdämmplatten angestrebt werden.** Die Anrechnung einer Kohlenstoffsenke im verwerteten oder wiedergenutzten Holz würde die Entlastung gegenüber der thermischen Behandlung wiederum mit 49 kg CO₂-Äq. für 1 m² Dämmung nochmals deutlich erhöhen.

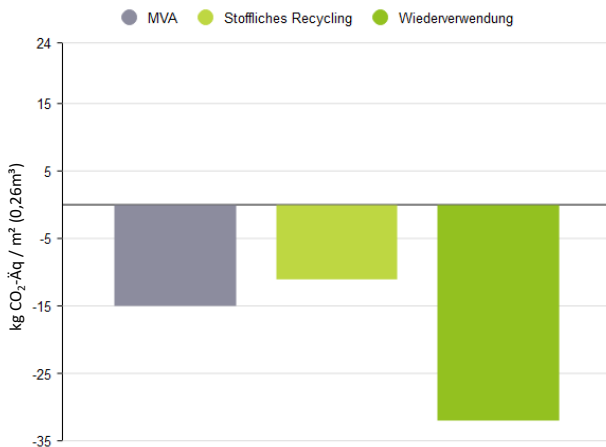


Abbildung 9-11: Nettoergebnisse im Treibhauseffekt für die Entsorgungswege vs. Wiederverwendung der trocken produzierten Holzfaserdämmplatten

Weiterhin ist in Abbildung 9-12 dargestellt, wie die Entlastungen im Treibhauseffekt sich verändern, wenn für die durch die Entsorgung erzielbaren Entlastungen die Energiebereitstellung in der Zukunft zugrunde gelegt wird, die zum Zeitpunkt der Entsorgung dann ggf. schon gegeben ist: Es wird entsprechend (Burger et al. 2012) davon ausgegangen, dass der Strom dann zu gut 60 % aus Windenergie, zu knapp 20 % über Photovoltaik, zu gut 10 % aus Biomasse und zu gut 5 % über Wasserkraft erzeugt wird (erneuerbarer Strommix für Deutschland 2050). Für diesen Strommix ergibt sich ein Faktor für den Treibhauseffekt von 27 g CO₂-Äq./kWh. Für die durch die Wärmeenergie aus der MVA und dem Biomasse-HKW substituierte Hauswärme wird eine Wärmepumpe angesetzt, die mit dem erneuerbaren Strommix betrieben wird und ca. 25 % der durch sie bereitgestellten Wärmeenergie als Strom verbraucht. Für eingesparte Prozesswärme wird eine äquivalente Menge Strom nach dem erneuerbaren Strommix angesetzt. Damit zeigt sich, dass zukünftig weder mit der Beseitigung der trockenen Holzfaserdämmplatte in der MVA noch der energetischen Verwertung im Biomasse-HKW oder Zementwerk eine Entlastung im Treibhauseffekt erzielt werden kann. Damit entfällt dann der diesbezügliche Vorteil gegenüber der Rückführung in die Produktion und im Gegenteil ist die Rückführung in die Produktion dann auch im Treibhauseffekt im Vorteil. Noch deutlicher gilt das für eine Wiederverwendung. Zusammen mit den weiteren Wirkungskategorien ergibt sich dann **zukünftig ein eindeutiger Vorteil auch für die stoffliche Verwertung der Holzfaserdämmplatten** durch bspw. Rückführung in die Produktion, selbst ohne Anrechnung einer Kohlenstoffsenke.

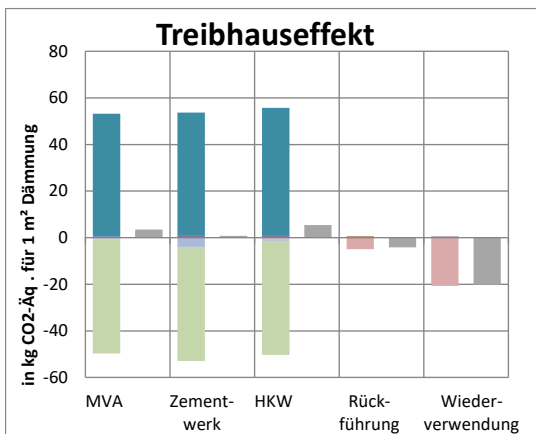


Abbildung 9-12: Treibhauseffekt für die jetzt schon möglichen Entsorgungswege von trocken produzierten Holzfaserdämmplatten im Falle einer zukünftigen Energieversorgung mit Energie aus erneuerbaren Quellen

Für nass produzierte Holzfaserdämmplatten und auch Holzmatten und Holzfasereinblasdämmung zeichnet sich ein sehr ähnliches Muster wie für trocken produzierte Holzfaserdämmplatten ab. Die Verwertungswege sind für alle Holzdämmstoffe gleich. Heizwerte und Zusammensetzung unterscheiden sich etwas, weil in Holzfaserdämmplatten Leime, in Holzmatten Stützfasern und Flammschutzmittel und in Holzfasereinblasdämmung Flammschutzmittel enthalten sind. Aber der dadurch verursachte Unterschied in der thermischen Behandlung ist gering, führt aber bei Holzmatten dazu, dass die Rückführung in die Produktion auch im Treibhauseffekt leicht besser abschneidet als die Beseitigung in der MVA. Für die Rückführung in die Produktion wird für das Dämmstoffmaterial ohne Flammschutzmittel jeweils dieselbe massespezifische Energieeinsparung für die dadurch entfallende Zerfaserung von Holz angesetzt. Die pro 1 m² verbaute Dämmstoffmenge unterscheidet sich insbesondere mit der Dichte, die am größten für nass produzierte Holzfaserdämmplatten und am kleinsten für die Holzfasereinblasdämmung ist, weshalb sich auch die absoluten Zahlen für Lasten und Entlastungen entsprechend unterscheiden. Aber das ändert nichts am Muster, das ausschlaggebend für die Bewertung der Entsorgungswege ist. Daher werden hier nur die Ergebnisse für die trocken produzierten Holzfaserdämmplatten dargestellt.

Die Wiederverwendung bringt bei der Holzfasereinblasdämmung gegenüber der Rückführung in die Produktion nicht ganz so viel Mehrentlastung im Treibhauseffekt, weil die Produktion der Holzfasereinblasdämmung geringere diesbezügliche Lasten verursacht. Aber trotzdem ist auch die Weiternutzung der Holzfasereinblasdämmung aus ökologischer Sicht besser als die Rückführung in die Produktion.

10 Ökologische Amortisationszeiten der Dämmung

In diesem Kapitel werden die Lasten des gesamten Lebensweges von Dämmstoffen den Entlastungen durch die dadurch eingesparte Heizenergie gegenübergestellt. Betrachtet wird dafür die Dämmung eines ungedämmten Gebäudes, so dass der KfW-Effizienzhausstandard 55 erreicht wird. Wenn die jeweilige Umweltwirkung der Dämmstoffmassen durch die jeweilige Umweltwirkung der eingesparten Energie dividiert wird, ergibt sich die Amortisationszeit des Dämmstoffes in Jahren.

10.1 Vorgehensweise und Methodik

Die dafür benötigte Dämmstoffdicke (für jeweils Keller, Außenwand, Dach) eines Dämmstoffes mit einer Wärmeleitfähigkeit wie EPS- oder Steinwolleplatten wurde in (Reinhardt et al. 2019) für ein Referenzgebäude, ein Einfamilienhaus, zusammen mit den zugehörigen Bauteilflächen und zusammen mit der dadurch eingesparten Heizenergie ermittelt. Als Heizsysteme betrachtet wurden ein Gas-Brennwertkessel und eine Sole-/Wasser-Wärmepumpe, die mit deutschem Strommix 2018 betrieben wird. Es wurde eine entsprechende Menge Dämmstoffvolumina, die sich in Abhängigkeit der jeweiligen Dämmstoffdichte in eine Dämmstoffmasse umrechnen ließ, angesetzt. Die Ergebnisse finden sich zusammengefasst in Tabelle 10-2.

Tabelle 10-1: Dämmstoffdicken und –volumina sowie dadurch eingesparte Heizenergie in einem Einfamilienhaus, das vom ungedämmten Zustand auf den KfW-Effizienzhausstandard 55 gedämmt wird (Reinhardt et al. 2019)

Dämmstoff	Dämmstärke	Dämmvolumen	Dämmstärke	Dämmmasse
	EPS / MW [cm]	EPS / MW [m ³]	EPS [kg]	MW [kg]
Oberste Geschossdecke	18	6,5	149	642
Dach	19	13,7	316	1.361
Außenwand	14	26,9	620	2.667
Kellerdecke	11	4,0	91	392
Summe		51,1	1.176	5.062
Eingesparte Endenergie Gas-BW-Kessel (ohne Hilfsenergie) [kWh/a]		26.356 kWh/a		
Eingesparter Strom SW-WP (ohne Hilfsenergie) [kWh/a]		6.461 kWh/a		

In dieser Studie werden einerseits die Lasten des gesamten Lebensweges der Dämmstoffe unter Berücksichtigung der jetzt schon möglichen stofflichen Verwertungswege aktualisiert. Grundlage dafür sind die massespezifischen Ergebnisse nach dem 50:50-Allokationsansatz, der die Entlastungen, die durch die stoffliche Verwertung in einem nächsten Lebensweg erzielt werden, mit berücksichtigt: Die Lasten für die Produktion von Primärmaterial, das in einem dem Dämmstoff vor- oder nachgelagerten System genutzt wird, wird dabei hälftig zwischen dem Dämmstoff und dem weiteren Produkt aufgeteilt (50:50-Allokation auf Systemebnen, s. hierzu (Reinhardt et al. 2019)). Andererseits sollen die Berechnungen der Amortisationszeit zusätzlich zum Referenz-Einzelfamilienhaus auch für Mehrfamilienhäuser und verschiedene Nichtwohngebäudetypen durchgeführt werden.

Zunächst müssen die Dämmstoffmengen für die Dämmung der weiteren Gebäudetypen ermittelt werden: Die in Tabelle 10-2 genannten Dämmstoffdicken wurden dazu für alle Gebäudetypen gleich angenommen und mit den jeweiligen Flächen der Bauteile multipliziert, die den (IÖR 2021) entnommen wurden. Die Kellerfläche wurde dabei gleich der Gründungsfläche gesetzt. Die oberste Geschossdeckenfläche wurde zu 50 % der Gründungsfläche angesetzt. Die zu dämmende Dachfläche wurde ebenso zu 50 % angenommen. Die betrachteten Gebäudetypen mussten davon abweichend wie folgt den IÖR-Gebäudesteckbriefen zugeordnet werden:

Gewerbe/Industrie → Produktionshallen; Handel/Dienstleistung/Praxisgebäude → Lagerhallen; Beherbergung/Gastronomie/Kliniken → Hotels und Gaststätten

Weiterhin müssen die durch die Dämmung in den verschiedenen Gebäudetypen erreichbaren Energieeinsparungen abgeschätzt werden. Dazu wurde auf Angaben zum Endenergiebedarf an Brennstoff für Gaskessel+Solar im unsanierten und vollsanierten Zustand für Wohngebäude ab 1995 und Nichtwohngebäude ab 1984 pro m² Nutzfläche in (Bürger et al. 2017) zurückgegriffen. Das stellt die jeweils dort aktuellste verfügbare Baualtersklasse dar. Der vollsanierte Zustand entspricht noch nicht dem KfW-Effizienzhausstandard 55, auf den sich die Dämmstoffmengen beziehen. Deshalb wurde der Endenergiebedarf im vollsanierten Zustand mit einem einheitlich für alle Gebäude angesetzten Korrekturfaktor nach unten korrigiert. Dieser Korrekturfaktor wurde aus dem in (Reinhardt et al. 2019) für das im KfW-Effizienzhausstandard 55 ausgeführte Referenz-Einzelfamilienhaus ermittelten Endenergiebedarf und dem in (Bürger et al. 2017) für das vollsanierte Einfamilienhaus ab 1995 angegebenen Endenergiebedarf gebildet. Die jeweilige Differenz aus dem Endenergiebedarf für unsanierte und korrigierte vollsanierte Gebäude ergibt dann die Einsparung, die über die Nutzfläche aus den (IÖR 2021) in die gebäudeweite Energieeinsparung umgerechnet wird.

Zusätzlich muss der durch die Dämmung eingesparte Strom einer alternativ zum Gas-Brennwertkessel eingesetzten Sole-/Wasser-Wärmepumpe abgeschätzt werden. Für die Umrechnung des eingesparten Endenergiebedarfs in Form von Gas in die eingesparte Strommenge einer Sole-/Wasser-Wärmepumpe wird das entsprechende Verhältnis aus beiden für das Referenz-Einzelfamilienhauses in (Reinhardt et al. 2019) im unsanierten bzw. KfW-Effizienzhausstandard 55 herangezogen. Dieses wird auf den oben abgeschätzten Gas-Endenergiebedarf für unsanierte bzw. korrigierte vollsanierte Gebäude aufgeschlagen. Die jeweilige Differenz aus unsanierten und korrigierten vollsanierten Gebäuden liefert dann die Stromeinsparung.

Es gilt zu beachten, dass es sich bei der oben skizzierten Vorgehensweise um eine grobe Vereinfachung handelt, weil die Dämmstoffdicken des Referenz-Einzelfamilienhauses auch für nichtwohnhähnliche Nichtwohngebäude angenommen werden. Die Endenergieangaben für den unsanierten Zustand werden weiterhin mit einem ungedämmten Status gleichgesetzt. Mit den o.g. Dämmstoffdicken werden dann angennommener Weise die bei den

verschiedenen Gebäudetypen vollsanierten Endenergiebedarfe erreicht, die jeweils noch um einen Faktor, der anhand des Referenz-Einzelfamilienhauses bestimmt wurde, näherungsweise auf den Effizienzhausstandard 55 umgerechnet werden. Die Abschätzung ist eher konservativ, weil neuere Gebäude für die Abschätzung der Energieeinsparung herangezogen wurden. Mit derselben Dämmung älterer Gebäude wären absolut höhere Energieeinsparungen zu erzielen. Oder es könnte durch die angesetzte Dämmung neuerer Gebäude, die auch im unsanierten Zustand schon eine gewisse Dämmung haben, ggf. ein höherer energetischer Standard als angenommen erreicht werden. Dies würde entsprechend ebenso eine etwas größere Energieeinsparung bedeuten als angesetzt.

Neben EPS und Steinwolleplatten mit ähnlichen Wärmeleitfähigkeiten werden auch trocken produzierte Holzfaserdämmplatten sowie Glaswolleplatten und Holzfaserinblasdämmung betrachtet. Für Letztere werden entsprechend andere Dicken und damit Volumina und, durch die Dichteunterschiede zusätzlich verstärkt, andere Massen benötigt. Dies ist in der Berechnung der Amortisationszeiten berücksichtigt. Angesetzt wurden hierfür die in Tabelle 10-2 aufgeführten Massenverhältnisse zwischen den Dämmstoffen, die aus den verschiedenen Dämmstoffeigenschaften resultieren. Die vollständige Dämmung eines Hauses mit Glaswolleplatten und Holzfaserinblasdämmung setzt eine besondere Konstruktion voraus wie bspw. eine Holzständerbauweise.

Tabelle 10-2: Eigenschaften und daraus resultierende Volumen- und Massenverhältnisse zwischen den weiteren betrachteten Dämmstoffen relativ zu EPS

Dämmstoff	λ [W/(m·K)]	Dichte [kg/m ³]	Dämmstoffvolumina relativ zu EPS	Dämmstoffmasse relativ zu EPS
EPS	0,036	23	1	1
Steinwolleplatten	0,036	99	1	4,30
Glaswolleplatten	0,035	20	0,97	0,85
Trocken prod. Holzfaserdämmplatten	0,048	131	1,14	6,49
Holzfaserinblasdämmung	0,040	32,5	1,11	1,57

Folgende Verwertungswege werden angesetzt:

- EPS-Platten: PS-Loop
- Steinwolleplatten, trocken produzierte Holzfaserdämmplatten, Glaswolleplatten, Holzfaserinblasdämmung: Rückführung in Produktion

10.2 Ergebnisse

Die resultierenden ökologischen Amortisationszeiten für die Dämmung von ungedämmten Gebäuden sind in Tabelle 10-3 bis Tabelle 10-5 sowie im Anhang in Kap. 11.2 in Tabelle 11-1 bis Tabelle 11-4 für die verschiedenen Gebäudetypen aufgeführt. Für die nichtwohnhähnlichen Nichtwohngebäude sind die Ergebnisse sehr unsicher (vgl. Kap. 10.1).

Es zeigt sich deutlich, dass die ökologischen Amortisationszeiten deutlich kleiner als die Standzeit der Dämmstoffe ausfallen. Sie liegen beim Treibhauseffekt und dem Energieaufwand im kleinen einstelligen Bereich, beim Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungs- und Feinstaubpotenzial etwas höher. Großteils haben sich die mit der Dämmung

verbundenen Lasten entsprechend schnell amortisiert. Die Werte sind tendenziell für Mehrfamilienhäuser, Büro- und Verwaltungsgebäude sowie Beherbergung/Gastronomie/Kliniken etwas größer. Noch etwas größer werden sie nach der Abschätzung für Gewerbe/Industrie und Handel/Dienstleistungen/Praxisgebäude berechnet. Erwartungsgemäß etwas kleiner fallen sie aus, wenn bei entsprechender Konstruktion statt Platten das Gebäude vollständig mit Matten und Einblasdämmung gedämmt werden kann.

Die klare Botschaft lautet: Dämmen lohnt sich aus ökologischer Sicht!

Tabelle 10-3: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Einfamilienhauses auf den KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe

Einfamilienhaus	Kumulierter Energieaufwand (a)	Treibhauseffekt (a)	Versauerungspot. (a)	Terr. Eutrophierungspot. (a)	Feinstaubpot. (PM 2,5) (a)
EPS Kessel	0,6	0,7	1,7	1,9	1,6
EPS Wärmepumpe	1,3	1,4	1,5	1,3	1,4
Steinwolleplatten Kessel	0,7	0,9	7,6	7,5	6,6
Steinwolleplatten Wärmepumpe	1,5	1,9	6,8	5,3	5,5
Holzfasерplatten trocken Kessel	2,0	0,7	4,5	8,0	4,8
Holzfasерplatten trocken Wärmepumpe	4,0	1,4	4,0	5,7	4,0
Glaswolleplatten Kessel	0,4	0,3	2,7	5,2	1,9
Glaswolleplatten Wärmepumpe	0,8	0,7	2,4	3,7	1,6
Holzfasereinblasdämmung Kessel	0,4	0,1	0,5	0,8	0,5
Holzfasereinblasdämmung Wärmepumpe	0,8	0,2	0,5	0,6	0,4

Tabelle 10-4: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Mehrfamilienhauses auf den KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe

Mehrfamilienhaus	Kumulierter Energieaufwand (a)	Treibhauseffekt (a)	Versauerungspot. (a)	Terr. Eutrophierungspot. (a)	Feinstaubpot. (PM 2,5) (a)
EPS Kessel	1,0	1,1	2,6	2,9	2,5
EPS Wärmepumpe	2,0	2,3	2,4	2,1	2,1
Steinwolleplatten Kessel	1,2	1,5	11,7	11,7	10,2
Steinwolleplatten Wärmepumpe	2,4	3,0	10,7	8,4	8,7
Holzfasерplatten trocken Kessel	3,1	1,1	7,0	12,4	7,5
Holzfasерplatten trocken Wärmepumpe	6,4	2,2	6,4	8,9	6,4
Glaswolleplatten Kessel	0,6	0,5	4,2	8,1	3,0

Glaswolleplatten Wärme- pumpe	1,3	1,0	3,9	5,8	2,5
Holzfasereinblasdäm- mung Kessel	0,6	0,1	0,8	1,2	0,8
Holzfasereinblasdäm- mung Wärmepumpe	1,2	0,3	0,7	0,9	0,7

Tabelle 10-5: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Büro- und Verwaltungsgebäudes in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe

Büro- und Verwal- tungsgebäude	Kumulierter Energieauf- wand (a)	Treibhausef- fekt (a)	Versauerungs- pot. (a)	Terr. Eutrophie- rungspot. (a)	Feinstaubpot. (PM 2,5) (a)
EPS Kessel	1,1	1,2	2,9	3,2	2,8
EPS Wärmepumpe	2,7	3,1	3,2	2,8	2,9
Steinwolleplatten Kessel	1,3	1,6	12,9	12,8	11,2
Steinwolleplatten Wär- mepumpe	3,2	4,1	14,5	11,3	11,8
Holzfaserplatten trocken Kessel	3,4	1,2	7,7	13,6	8,2
Holzfaserplatten trocken Wärmepumpe	8,6	3,0	8,6	12,1	8,6
Glaswolleplatten Kessel	0,7	0,6	4,6	8,9	3,3
Glaswolleplatten Wärme- pumpe	1,8	1,4	5,2	7,8	3,4
Holzfasereinblasdäm- mung Kessel	0,6	0,2	0,9	1,3	0,9
Holzfasereinblasdäm- mung Wärmepumpe	1,6	0,4	1,0	1,2	0,9

Literaturverzeichnis

4. BImSchV (2013): Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) - 4. BImSchV – Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen.
- ABB (2021): Gespräch mit Abbruchunternehmen.
- Anders, Dr. S.; Schlun, N. (2019): Mehrwert_zertifizierter Gebaeude; DGNB Report März. https://www.dgnb.de/de/verein/publikationen/bestellung/downloads/DGNB_Report_Mehrwert_zertifizierter_Gebaeude.pdf. (12.12.2021).
- AVV (2020): Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV).
- Baronick, M.; Burger, A.; Golde, M.; Keßler, H.; Unnerstall, H. (2019): Positionspapier zur Primärbaustoffsteuer. In: *Umweltbundesamt*. S. 20.
- Bauwirtschaft (2021): Gespräch mit verschiedenen Vertretern der Bauwirtschaft zum Belassen alter Dämmstoffe im und am Gebäude, zur Dämmstoffmarktverteilung und zur Getrennthaltung alter Dämmstoffe auf der Baustelle.
- BAV (2021): Gespräch mit Bundesverband der Altholzaufbereiter und -verwerter e.V. zu: Verwertungsoptionen von Dämmstoffen auf Basis von Holzfasern - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- BBSR (2011): Künstliche Mineralfaserdämmstoffe. BBSR-Berichte KOMPAKT Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/berichte-kompakt/2011/DL_1_2011.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (29.09.2021).
- BEI (2021): Beiratstreffen (3 Stk.) mit Vertretern aus Politik, Wirtschaft und Umweltorganisation zum Thema: Kreislaufführung von Dämmstoffen . Hemmnisse und Lösungsansätze.
- Bergs, L.; Dobers, K.; Feil, A.; Fricke, C.; Hülsmann, T.; Koller, M.; Kopka, J.-P.; Mohmeyer, S.; Netsch, N.; Ritthoff, M.; Sartorius, I.; Simons, M.; Stapf, D.; Walter, G.; Wendler, K. (2020): KUBA – Nachhaltige Kunststoffwertschöpfungskette: Pilotfall Kunststoffe in Bauwirtschaft und Gebäuden. Wuppertal-Institut, Fraunhofer IML, RWTH Aachen - ANTS, FH Münster - IWARU, VinylPlus Deutschland, DECHEMA, BASF SE, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - ITC, PlasticsEurope Deutschland. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). https://dechema.de/en/Research/Projekte/KUBA/_/BMBF_FKZ_033R214A-F_KUBA_Schlussbericht.pdf (12.12.2021).
- BMK (2020): EPS- und XPS-Dämmstoffabfälle ab der Baustelle - Leitfaden. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).
- Breitkopf, A. (2021): Entwicklung der Erzeugerpreise für Holz bis Oktober 2021 - Abrufcode: 61241-0006. Statista.
- Burger, A.; Lünenbürger, B.; Osiek, D. (2012): Nachhaltige Stromversorgung der Zukunft. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. S. 35. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4350.pdf> (20.12.2021).
- Bürger, D. V.; Hesse, D. T.; Palzer, D. A.; Köhler, B.; Herkel, S.; Engelmann, D. P.; Quack, D. D. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 - Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. CLIMATE CHANGE 26/2017 Öko-Institut Freiburg. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. S. 289.

- BVSE (2021): Gespräch mit Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (BVSE) zum Thema stoffliche Verwertung Suche öffnen.
- Dachdeckerverband (2021): Gespräch mit dem Landesinnungsverband des Dachdeckerhandwerks Baden-Württemberg.
- Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K.; Reichenbach, J. (2016): Materialströme im Hochbau - Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Zukunft Bauen Forschung für die Praxis | Band 06 Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung; INTECUS. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit., Dresden, Berlin. S. 88.
https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2017/band-06-dl.pdf;jsessionid=C1892C4451206BEAF317FE1C24F7CC4C.live11294?__blob=publication-File&v=1 (24.09.2021).
- Destatis (2021): Statistik zur Abfallentsorgung in Deutschland nach Jahren und Abfallarten aus der Datenbank des statistischen Bundesamtes (Destatis).
- van Dijk, J.; Reichenecker, A. (2020): Leitfaden für die Sammlung und Vorbehandlung von Polystyrol-Schäumen von Abbruch-Baustellen für PolyStyreneLoop.
- EPS (2021): Gespräch mit EPS Hersteller zu: Verwertungsoptionen von Expandiertem Polystyrol - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- EU (1994): Council Regulation (EC) No 3093/94 of 15 December 1994 on substances that deplete the ozone layer.
- EU (2000): Regulation (EC) No 2037/2000 of the European Parliament and of the Council of 29 June 2000 on substances that deplete the ozone layer.
- EU (2016): VERORDNUNG (EU) 2016/ 293 DER KOMMISSION - vom 1. März 2016 - zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 850/ 2004 des Europäischen Parlaments und des Rates über persistente organische Schadstoffe hinsichtlich des Anhangs I. S. 5.
- FMI (2021): Gespräch mit Fachverband Mineralwolleindustrie e. V. (FMI) zu: Verwertungsoptionen von Mineralwolle - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- FNR (2021): Grafiken zum Absatzvolumen von Dämmstoffen und zu den Anwendungsformen von NAWARO-Dämmstoffen in Deutschland 2019 in der Mediathek der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/biobasierte-produkte/holzprodukte-und-baustoffe.html>. (21.12.2021).
- FPX (2021): Gespräch mit Fachvereinigung Extruderschaumstoff zu: Verwertungsoptionen von Extrudiertem Polystyrol - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- Fulev, Dr. S.; Menkens, T. (2012): Reaktor zur Umwandlung von Weichschaum-Abfällen in ein Polyol zum Wiedereinsatz in der Blockweichschaumherstellung – 700 l Techniksreaktor -. Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
<https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-29395.pdf> (21.12.2021).
- GDI (2013): GDI-Statistik (Gesamtverband Dämmstoffindustrie) zu den nachgefragten Dämmstoffvolumina von 1988 bis 2013.
- GW (2021): Gespräch mit Glaswollehersteller zu Verwertungsoptionen von Glaswolle - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- HF (2021): Gespräch mit Holzfaserdämmstoffhersteller zu: Verwertungsoptionen von Dämmstoffen auf Basis von Holzfasern - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- Holzverband (2021): Gespräch mit dem Landesinnungsverband des Zimmerer- und Holzbaugewerbes Baden-Württemberg und seinen Akteuren.
- HUB (2021): Gespräch mit Sammelhubbetreiber von EPS zum Thema: Sammlung, Aufbereitung, Kompaktierung und Vermarktung von EPS aus dem Post-Consumer Bereich.
- IBU (2014): ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION Glass Mineral Wool 035 unfaced - Knauf Insulation.
- IBU (2016): UMWELTPRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804 - Unkaschierte Glaswolleplatten und Filze SaintGobain ISOVER G+H AG.

- IÖR (2021): Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung. In: *Bauwerksdatenbank*. <http://ioer-bdat.de/>. (20.12.2021).
- ISO (2018): ISOVER RECYCLING les déchets de laine de verre ont désormais une filière de recyclage.
- IVH (2021): Gespräch mit Industrieverband Hartschaum e.V. (IVH) zu: Verwertungsoptionen von Expandiertem Polystyrol - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- KR (2021): Gespräch mit Korn Recycling zum Thema: Aufkommen von Dämmstoffen im Abfallstrom, mögliche Verfahren zur Sortierung - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- Landeshauptstadt München, B. (Hrsg.) (2017): Leitfaden Dämmstoffe 3.0. S. 158.
- LfU (2018): Umweltwissen-Abfall: Künstliche Mineralfasern (S.5). In: *Bayerisches Landesamt für Umwelt*. S. 12.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R.; Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.) (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie: beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - „Typology approach for building stock energy assessment“, EPISCOPE - „Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks“. IWU, Darmstadt.
- Malerverband (2021): Gespräch mit dem Landesinnungsverband des Maler- und Lackierhandwerks Baden-Württemberg.
- Müller, A.; Leydolph, B.; Stanelle, K. (2009): Stoffliche Verwertung von Mineralwolleabfällen – Technologien für die Strukturumwandlung. In: *KERAMISCHE ZEITSCHRIFT 06/2009*. Vol. 06/2009, S. 10.
- PS Loop (2020): Circular Economy – Kreislaufwirtschaft in der Praxis -RÜCKGEWINNUNG VON POLYSTYROLSCHAUMSTOFF UND BROM IM GESCHLOSSENEN KREISLAUF. https://polystyreneloop.eu/wp-content/uploads/2020/03/brochure-psloop-digital_german.pdf. (20.12.2021).
- PU (2021): Gespräch mit PU Hersteller zu: Verwertungsoptionen von Polyurethan - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- Reinhardt, J.; Veith, C.; Lempik, J.; Knappe, F.; Mellwig, P.; Giegrich, J.; Muchow, N.; Schmitz, T.; Voß, I. (2019): Ganzheitliche Bewertung von verschiedenen Dämmstoffalternativen. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, natureplus. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Umweltministerium Baden-Württemberg. S. 201.
- RW (2019): Dämmung von Flachdächern, Rockwool. *Informationsbroschüre*, <https://p-cdn.rockwool.com/siteassets/rw-d/broschuren/flachdach/br-daemmung-von-flachdaechern-rockwool.pdf?f=20201025013253> (08.12.2021).
- Schlummer, M.; Fell, T.; Mäurer, A.; Altnau, G. (2020): Die Rolle der Chemie beim Recycling - Physikalisches und chemisches Kunststoffrecycling im Vergleich. *Kunststoffe* Carl Hanser Verlag, München.
- SEK (2021): Gespräch mit Sekundärrohstoffherstellern zur stofflichen Verwertung von Dämmstoffen.
- SORT (2021): Gespräch mit Sortierbetrieben/Entsorgern und Containerdiensten.
- Strunk, P. (2018): *Recovery, Recycling Technology Worldwide*. Vol. 3.
- Stuckateurverband (2021): Gespräch mit Fachverband der Stuckateure für Ausbau und Fassade Baden-Württemberg und seinen Akteuren.
- SW (2021): Gespräch mit Steinwollehersteller zu: Verwertungsoptionen von Steinwolle - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- vdnr (2021): Gespräch mit Verband Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen e.V. zu: Verwertungsoptionen von Dämmstoffen auf Basis von Holzfasern - Hemmnisse und Lösungsansätze.
- Vogdt, F. U.; Fischer, D.; Schaudienst, F.; Schober, M.; Fraunhofer IRB-Verlag (2019): Life-Cycle KMF Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen.

- WDVS (2021): Daten zum Absatzvolumen von Wärmedämmverbundsystemen von 2016 bis 2021 vom Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. (VDPM).
- WEB (2019): Das erste WDVS, das alles kann: weber.therm circle. Saint-Gobain Weber GmbH, Broschüre für Fachhandwerker.
- Wurbs, Dr. J.; Beer, I.; Bolland, T.; Debiak, Dr. M.; Dettling, F.; Koch-Jugl, Dr. J.; Tietjen, L. (2020): Hexabromcyclododecan (HBCD). In: *Umwelt Bundesamt*. No. Dezember, S. 15.
- XPS (2021): Gespräch mit XPS Hersteller zu: Verwertungsoptionen von Extrudiertem Polystyrol - Hemmnisse und Lösungsansätze.

11 Anhang

11.1 Diskussion Belassen von alten Dämmstoffen im und am Gebäude und Marktverteilung Dämmstoffe

11.1.1 Befragte Akteure

Es wurden telefonische Gespräche mit verschiedenen Verbänden aus dem Bauhandwerk geführt. Der Stuckateurverband hat eine Abfrage bei seinen Unternehmen gestartet. Vier Unternehmen haben daraufhin schriftliche Antworten beigetragen, die in folgenden Text mit eingeflossen sind. Über den Holzbauverband erfolgt im weiteren Verlauf noch ein Austausch mit Mitgliedsunternehmen im Rahmen einer Konferenz. Weiterhin wurden Gespräche mit vier Unternehmen der Bauwirtschaft geführt. In Summe sind im nachfolgenden Text die Gespräche bzw. Antworten folgender Akteure berücksichtigt

- Landesinnungsverband des Maler- und Lackiererhandwerks Baden-Württemberg
- Fachverband der Stuckateure für Ausbau und Fassade Baden-Württemberg
 - Vier Handwerksbetriebe, die im Fachverband vertreten sind
- Landesinnungsverband des Dachdeckerhandwerks Baden-Württemberg
- Holzbau Baden-Württemberg - Verband des Zimmerer- und Holzbaugewerbes
 - Verbandsvertreter
 - Gespräch mit Mitgliedsunternehmen im Rahmen eines Treffens
- Bauwirtschaft: Drei Baufirmen

11.1.2 Aktuelle Bedeutung des Belassens alter Dämmstoffe, Möglichkeiten und Probleme

Im Wandbereich bei Stuckateuren und Malern stellt sich diese Frage in der Praxis bislang noch eher selten. Ein bereits gedämmtes Haus wird bis dato nicht zusätzlich gedämmt. Alte Dämmstoffe können verbleiben (Stuckateurverband 2021). Es wird aufgedübelt. Ggf. muss die Zulassung diesbezüglich geändert werden und es besteht ein Haftungsrisiko, die Wand muss entsprechend tragfähig sein (Malerverband 2021). Die diesbezüglichen Normen der Hersteller müssen berücksichtigt werden (Bauwirtschaft 2021). Es gibt evtl. Probleme mit der Typenstatik, Tragwerksplanung und der Garantie der Standfestigkeit nach LBO und oft ist auch nicht bekannt, um was für einen Dämmstoff es sich handelt und wie er eingesackt ist (bauphysikalisch schwierig) (Dachdeckerverband 2021) und welche Qualität er aufweist (Bauwirtschaft 2021). Schwierigkeiten ergeben sich ggf. durch Anschlüsse wie Fensterbänke, Laibungen, Rolläden, Fallleitungen, Rohre und Dachrinnen, so dass der Rückbau in Abhängigkeit vom konkreten Bauobjekt geschickter ist (Malerverband 2021). Außerdem können auf der Außenwand geführte Kabel, Lüftungskanäle, Solarleitungen (Thermie und PV) dadurch beschädigt werden, weil sie hinter der ersten Dämmschicht nicht mehr sichtbar sind. Aufgrund der geringeren Leistungsfähigkeit der früher verbauten Dämmstoffe wird die Gesamtdicke der Dämmstoffschicht in Summe größer ausfallen, so dass evtl.

Baurestriktionen besonders in beengten Räumen zum Tragen kommen können. Es muss eine genaue Prüfung der alten Dämmsystems erfolgen. Ein Austausch der Dämmstoffe muss auch dann stattfinden, wenn Wasserschäden aufgetreten sind, die Dämmstoffe nicht sachgemäß verklebt wurden, eine Hinterströmung der Fassade gegeben ist, Risse im Putz oder Farbabplatzungen vorhanden sind, oder die Dämmstoffe beschädigt sind und ausgebessert werden müssen (Stuckateurverband 2021). Früher wurde der Dämmstoff oft nur mit Klebelecksen an der Wand befestigt, so dass eine Hinterlüftung der Fassade und Konvektionsströme zu befürchten sind (Dachdeckerverband 2021). Weiterhin hängt das Verhalten in der Praxis davon ab, ob der alte Dämmstoff vom Bauherren noch erwünscht ist und was andere Akteure raten (Stuckateurverband 2021). Neu gedämmt ist ggf. günstiger in der Bauausführung und den Folgekosten, aber teurer bezüglich der Entsorgungskosten (Malerverband 2021).

Im alten Holz-Fertighausbereich müssen Zimmerer schadstoffbelastete Bauteile entfernen, weil hier früher in Holzwerkstoffen und Imprägnierungen PCB und Holzschutzmittel enthalten waren. Bei Dämmung steigt die Schadstoffproblematik noch, weil dann ein luftdichter Abschluss nach außen erfolgt. Weiterhin werden Beplankungen und Schwellen, die (Feuchtigkeits)Schäden erlitten haben oder undicht geworden sind, ausgetauscht, so dass ein Zimmerer immer von außen her die Konstruktion abstrippt, bis er die innere Bekleidung sieht. Die ganze Konstruktion wird erneuert. Die alten Dämmstoffe werden daher im Rahmen von Zimmerarbeiten fast immer entfernt (Holzverband 2021). Es muss auch statisch passen.

Im Dachbereich stellt sich die Frage des Belassens alter Dämmstoffe aktuell schon mehr. Je nach Region wird in Steildächern nach unterschiedlichen Techniken verfahren. Die Zwischensparrendämmung kann belassen werden und durch neue Aufsparrendämmung oder zusätzlich auch ergänzende neue Zwischensparrendämmung verbessert werden. Dadurch kann aber ein Hohlraum zwischen alter und neuer Dämmung entstehen, so dass unerwünschte Konvektionsströme begünstigt werden (Dachdeckerverband 2021). Die Luftdichtheit und Querlüftung kann zum Problem werden. Auch kann es Probleme im Falle einer mangelhaft ausgeführten Dampfbremse geben (Holzverband 2021). Alte Dämmstoffe, die im Gefach verbleiben, sind oft mit Schadstoffen belastet, die dann, durch Aufdämmung nach außen luftdicht abgeriegelt, weiterhin verstärkt ins Gebäude abgegeben werden (Holzverband 2021). Zimmerer müssen im Gegensatz zu Dachdeckern den alten Dämmstoff i.d.R. entnehmen, weil sie von der Dachseite her an die Luftdichtigkeitsschicht herankommen müssen, nur Innenbekleidung und Sparren verbleiben. Ein anschließender Wiedereinbau von Hartschaum bspw. ist nicht möglich (Holzverband 2021). Beim Flachdach ist die Dichtigkeit essenziell, die Optik weniger wichtig (Malerverband 2021). Holzwolleleichtbauplatten (Heraklith), die von innen auf Sparren genagelt sind, sind quasi unbegrenzt haltbar und verbleiben meistens im Gebäude. Die Frage ist, wann ein Dämmstoff als wiedereinbaufähig betrachtet werden kann. Bei kleinerem Mangel oder Unsicherheiten bezüglich der Schadstoffe wird er auch aufgrund der fünfjährigen Gewährung, die gegeben wird, lieber entfernt; wenn der Aufbau relativ modern und zuverlässig bearbeitet ist, ist ein Belassen möglich (Holzverband 2021). Eine alte Konstruktion wird von Zimmerern ungern verwendet, weil diese ggf. über keinen Versicherungsschutz für durch die Planung verursachte Schäden verfügen.

Im Keller ist manchmal kaum Platz für ein Belassen vorhanden (Malerverband 2021). Grundsätzlich kann hier sonst aber belassen werden, wobei Leitungen dabei ggf. ausgespart werden müssen, so dass Wärmebrücken entstehen können, die aber nicht so problematisch sind (Bauwirtschaft 2021). Es gibt aber auch ein System, welches eine abgehängte Decke zusammen mit der Dämmung schafft, so dass die Rohre nicht separat gedämmt werden müssen (Bauwirtschaft 2021).

Bei einer Kellerperimeterdämmung müssen keine Anforderungen an die Optik gestellt werden.

Im Dachboden darf die Eintrittshöhe auch trotz Belassens nicht zu groß werden (Malerverband 2021) (Bauwirtschaft 2021). Weiterhin muss die Höhe ausreichend sein, wenn der Raum trotzdem nutzbar bleiben soll (Malerverband 2021). Aus bauphysikalischer Sicht unkritisch ist es bei einer Betondecke, bei einer Holzdecke mit Schwitzwasser ist es kritischer (Bauwirtschaft 2021).

In der Bauwirtschaft, die auch Sanierungsaufträge bearbeitet, stellt sich die Frage des Belassens teilweise ebenso schon.

11.1.3 Belassungsrate in Abhängigkeit der Bauteile und Akteure

An der Wand wird eine Aufdoppelung oft präferiert (Stuckateurverband 2021). Nur im Falle von Schäden und unsachgemäßer Verklebung (s. oben) wird davon abgesehen. Das führt nach Meinung der Akteure dazu, dass eine Aufdoppelung im Verhältnis von 50 % bis hin zu 95 % stattfinden wird. Nach anderen Meinungen wird das aufgrund der Planungshaftung eher selten erfolgen (Dachdeckerverband 2021). Die Einschätzungen der Bauwirtschaft liegen auch eher darunter: 25 % bis zukünftig maximal 40 % oder auch eher selten aufgrund von Gewährleistung, Haftung und Optik. Giebelflächen ohne Fenster sind ggf. ideal für Aufdoppelungen, weil dann die Anschlussproblematik entfällt. Bestehende Vorhang-/Vorbaufassaden, die nur mechanisch befestigt sind, werden eher nicht aufgedoppelt, auch bestehende Unterkonstruktionen nicht (Bauwirtschaft 2021).

Bei Wänden aus dem Holz-Fertighausbereich, die von Zimmerern bearbeitet werden, was zu 80 % der Fall ist (Holzverband 2021), ist wie oben beschrieben von eher keiner Aufdoppelung auszugehen.

Im Steildach findet bei Dachdeckern zu 20 % ein Belassen des alten Dämmstoffs statt, bei Zimmerern zumeist seltener (s. oben). Die Verteilung Zimmerer zu Dachdecker bei Dachsanierungen mit alter Dämmung beträgt ca. 60:40 (Holzverband 2021). Der Holzverband plädiert dafür, die alte Dämmung aufgrund der Schadstoffproblematik herauszunehmen.

Im Flachdach wird der alte Dämmstoff zu nahezu 95 % (Dachdeckerverband 2021) bis hin zu immer wieder herausgenommen (Bauwirtschaft 2021), sobald die Dachhaut bei der Sanierung berührt wird. Schaumglasplatten können als einziger Dämmstoff ggf. drinnen bleiben, weil diese als fester Untergrund eingegossen werden, wohingegen PIR/PUR/EPS bis auf den Beton demontiert wird (Dachdeckerverband 2021). Die Dampfsperre verbleibt hingegen (Bauwirtschaft 2021).

In Kellerdecken und Dachböden (zumindest bei Betondecken, s. oben) sowie Perimeterdämmung können die alten Dämmstoffe teilweise belassen werden (Bauwirtschaft 2021). In dieser Studie wird angenommen, dass dies genauso wahrscheinlich wie für die Außenwand ist.

Innendämmung wird nicht belassen (Stuckateurverband 2021) (Bauwirtschaft 2021), hier besteht auch die Taupunktgefahr (Bauwirtschaft 2021). EPS-Dämmplatten, die meist als Gipskarton-Verbundplatten ausgeführt sind, werden grundsätzlich entfernt und eine neue Dämmung als kapillaraktive Dämmung (Mineralschaumplatten, Dämmputz, silikatische Plattenwerkstoffe, bspw. Calciumsilikatplatten) angebracht (Stuckateurverband 2021).

Nach Angaben von (Holzverband 2021) wird alles, was älter als Baujahr 1985 ist, zu 99 % entfernt. Technisch ergibt sich eine Einschränkung durch schwarz verfärbte Dämmstoffe, Schadstoffbelastung und den Zustand der alten Dämmstoffe (Einsackung, Verluste etc.). Alles, was ab den 90ern bis in die 2000er-Jahre verbaut wurde, kann nach derzeitigem Stand verbleiben, weil der Gesamtaufbau standardisierter erfolgte.

In den Niederlanden wird die komplette Gebäudehülle (Dach und Fassade) vorgefertigt und über Häuser gestülpt, bislang v.a. über kleinere Gebäude wie Reihenhäuser. Es gibt erste Überlegungen auch für den Geschossbau (Energiesprung).

Das Belassen alter Dämmstoffe wird zukünftig eher zunehmen, weil bereits gedämmte Gebäude erst jetzt zur erneuten Sanierung anstehen und die Anforderungen an die Wärmedämmung mit der im Zuge der Energiewende umzusetzenden Wärmewende steigen werden. Nach Aussagen von Akteuren (Stuckateurverband 2021) ist aber der Wille oft gar nicht vorhanden, ein bereits gedämmtes Haus nochmals energetisch anzufassen. Mit wachsendem Bewusstsein für die Wärmewende wird sich das aber vielleicht ändern. Unabhängig davon kann aber auch davon ausgegangen werden, dass die Belassungsquote noch etwas steigen wird. Es gibt aber eine Grenze, die u.a. in der Akzeptanz durch den Bauherren begründet liegt.

11.1.4 Abfrage Dämmstoffmarktverteilung

Im klassisch verputzten Außenwandbereich werden folgende Anteile von jeweils verschiedenen Akteure abgeschätzt, die stark variieren:

- EPS 30 %, Mineralwolle 50 %, Holzfaser 20 % (Stuckateurverband 2021)
- EPS 50 %, Mineralwolle 50 % (Stuckateurverband 2021)
- EPS 75 %, mineralische Faserdämmstoffe 20 %, Holzfaser 5 % (Stuckateurverband 2021)
- Aufdopplung meist mit mineralischen Faserdämmstoffen (Stuckateurverband 2021)
- EPS 60-70 %, Mineralfaser 30-40 % (Letztere für Hochhäuser, Altersheime und Fluchtwege obligatorisch) (Bauwirtschaft 2021); bei kleinen Vorhaben auch 70-80 % EPS (Bauwirtschaft 2021)
- EPS aus Preisgründen (Stuckateurverband 2021), (Bauwirtschaft 2021)

In der Holztafelbauweise im Wandbereich kommt in der Fertigteileindustrie nach wie vor aufgrund des Preises und der geringen Wärmeleitfähigkeit v.a. Glaswolle zum Einsatz. Da viele Holzhäuser dort gefertigt werden, ist im Wandbereich im Holzbau die Glaswolle noch führend. Im Geschossbau in Holzbauweise kommt Steinwolle aufgrund des Brandschutzes zum Einsatz. Auch der Geschossbau hat ein großes Bauvolumen, so dass in Summe im Gesamtbaumarkt im Holzbereich Glas- und Steinwolle dominieren, obwohl Zimmerer Holzfaser und Hochleistungsmineralfaser bevorzugen (Holzverband 2021).

Im Steildach ist die abgeschätzte Verteilung wie folgt:

- Zwischensparrendämmung: 100 % Mineralwolle (Stuckateurverband 2021)
- Mineralfaser, Aufsparrendämmung PU, bei Zimmerern auch schon mehr Holzweichfaser → v.a. Mineralwolle, PU/PUR, (EPS); etwas zugelegt haben auch Zellulose, Hanf, Holzeinblasdämmung (langsames Umdenken erfolgt hier) (Dachdeckerverband 2021)

- Dachdecker belegen Sparren mit Hartschaum PU- und PS-Systemen, in geringerem Ausmaß auch mit Holzfaser (Holzverband 2021)
- Zimmerer heute: Holzfaser und Hochleistungsmineralfaser. Bei Holzfaser muss Gefach mit genutzt werden, weil Wärmeleitfähigkeit etwas höher ist, was aber auch bauphysikalische Vorteile bietet, weil dann kein Hohlraum entsteht (Holzverband 2021). Das Dach hat als oberstes Bauteil keine brandschutztechnischen Anforderungen → brennbares Material ist hier problemlos einsetzbar (Holzverband 2021).
- Entwicklung über die Zeit nach (Holzverband 2021): 1960er bis 1980er v.a. Glaswolle und zusätzlich Weiterentwicklung Hartschäume (PS und PU), aber auch alte Schüttungen und Schlacke sowie Holzwolleleichtbauplatten (Heraklith); ab den 1990ern kamen naturorganische Dämmstoffe wie Zellulose und Holzfaser, (Baumwolle, Schafwolle, Flachs, Stroh) hinzu. Heute hat Holzfaser (ab Ende 1990er bis heute) die Zellulose wieder etwas verdrängt → momentan werden im Gros alte Konstruktionen mit Glaswolle saniert (Holzverband 2021)
- Holzwolleleichtbauplatten (Heraklith) von innen an Sparren genagelt (Holzverband 2021)
- PU auch aus Platzmangel (Bauwirtschaft 2021)

Im Flachdach ergibt sich folgende abgeschätzte Verteilung:

- Mineralwolle/Steinwolle hat sehr stark zugenommen (Brandschutz, Versammlungsstättenverordnung, Hallenbau), PIR/PUR hat zugenommen, EPS (mittlerweile unbeliebter wegen Schrumpfverhalten), Schaumglasplatten (hat zugenommen, aber immer noch kleiner Anteil) (Dachdeckerverband 2021)
- 50 % EPS, 50 % PUR (Bauwirtschaft 2021)

Für die Kellerdecke wird folgende Aufteilung abgeschätzt:

- 80 % EPS, 20 % Mineralwolle (Keller ist kein Aufenthaltsraum) (Bauwirtschaft 2021)
- Separates System, welches eine abgehängte Decke zusammen mit der Dämmung schafft

Für die Dachbodendämmung wiederum ist die abgeschätzte Verteilung wie folgt:

- 50 % EPS, 50 % Mineralwolle; Laufsteg oder begehbare Spanplatten darüber bei EPS bzw. ausgedämmte Lattenkonstruktion / Kanthölzer auf Boden aufgelegt bei Mineralwolle (Bauwirtschaft 2021)

Bei der Innendämmung werden folgende abgeschätzte Anteile genannt:

- 100 % Perlitedämmplatten bzw. Calciumsilikatdämmplatten (Stuckateurverband 2021)

Bei Unterschichten wie Balkonen und Durchgängen kommt Mineralwolle zum Einsatz, bei Balkonen aufgrund von Platzmangel ggf. auch PU (Bauwirtschaft 2021).

Für die Perimeterdämmung ist XPS ein wichtiger Dämmstoff (Bauwirtschaft 2021).

Eine Formstabilität ist wichtig für das Belassen alter Dämmstoffe, daher findet dieses eher bei alten Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) statt. Diese sind oft im guten Zustand und umfassen v.a. EPS und Mineralwolle (Bauwirtschaft 2021). Der Brandschutz muss dabei erfüllt sein (Malerverband 2021). Diese WDVS dominierten damals auch den Markt und stellen

damit die Dämmstoffsysteme dar, die jetzt im Zuge von Sanierungen anfallen oder aufgedoppelt werden. Bislang werden nur verputzte Außenwanddämmungen älterer Gebäude aufgedoppelt (Stuckateurverband 2021). Im Steildach ist hingegen wie oben aufgeführt im Zuge von jetzigen Sanierungen v.a. mit alter Glaswolle im Gefach umzugehen.

11.2 Ökologische Amortisationszeiten der Dämmung – weitere Gebäudetypen

Tabelle 11-1: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Gebäudes zur Beherbergung/Gastronomie bzw. einer Klinik in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe

Beherbergung, Gastronomie, Klinik	Kumulierter Energieaufwand (a)	Treibhauseffekt (a)	Versauerungspot. (a)	Terr. Eutrophierungspot. (a)	Feinstaubpot. (PM 2,5) (a)
EPS Kessel	0,9	1,0	2,4	2,7	2,3
EPS Wärmepumpe	2,6	2,9	3,1	2,7	2,8
Steinwolleplatten Kessel	1,1	1,3	10,7	10,7	9,4
Steinwolleplatten Wärmepumpe	3,0	3,8	13,7	10,7	11,2
Holzfasерplatten trocken Kessel	2,8	1,0	6,4	11,4	6,8
Holzfasерplatten trocken Wärmepumpe	8,2	2,9	8,2	11,4	8,2
Glaswolleplatten Kessel	0,6	0,5	3,9	7,4	2,7
Glaswolleplatten Wärmepumpe	1,7	1,3	4,9	7,4	3,3
Holzfasereinblasdämmung Kessel	0,5	0,1	0,7	1,1	0,7
Holzfasereinblasdämmung Wärmepumpe	1,5	0,4	1,0	1,1	0,9

Tabelle 11-2: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Gebäudes für Handel/Dienstleistung bzw. eines Praxisgebäudes in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe

Handel, Dienstleistung, Praxisgebäude	Kumulierter Energieaufwand (a)	Treibhauseffekt (a)	Versauerungspot. (a)	Terr. Eutrophierungspot. (a)	Feinstaubpot. (PM 2,5) (a)
EPS Kessel	1,6	1,8	4,3	4,8	4,1
EPS Wärmepumpe	4,3	4,8	5,0	4,4	4,5
Steinwolleplatten Kessel	1,9	2,4	19,3	19,2	16,8
Steinwolleplatten Wärmepumpe	5,0	6,3	22,5	17,5	18,3
Holzfasерplatten trocken Kessel	5,1	1,8	11,5	20,4	12,2
Holzfasерplatten trocken Wärmepumpe	13,4	4,7	13,4	18,7	13,3

Glaswolleplatten Kessel	1,1	0,8	6,9	13,3	4,9
Glaswolleplatten Wärme- pumpe	2,8	2,2	8,1	12,2	5,3
Holzfasereinblasdäm- mung Kessel	1,0	0,2	1,3	2,0	1,3
Holzfasereinblasdäm- mung Wärmepumpe	2,5	0,6	1,6	1,8	1,4

Tabelle 11-3: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten Gebäudes für Gewerbe/Industrie in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe

Gewerbe, Industrie	Kumulierter Energieauf- wand (a)	Treibhausf- fekt (a)	Versauerungs- pot. (a)	Terr. Eutrophie- rungspot. (a)	Feinstaubpot. (PM 2,5) (a)
EPS Kessel	1,4	1,6	3,7	4,2	3,6
EPS Wärmepumpe	3,6	4,1	4,2	3,7	3,8
Steinwolleplatten Kessel	1,6	2,1	16,7	16,7	14,6
Steinwolleplatten Wär- mepumpe	4,2	5,3	19,0	14,9	15,5
Holzfaserplatten trocken Kessel	4,4	1,6	10,0	17,8	10,6
Holzfaserplatten trocken Wärmepumpe	11,3	4,0	11,3	15,9	11,3
Glaswolleplatten Kessel	0,9	0,7	6,0	11,5	4,3
Glaswolleplatten Wärme- pumpe	2,4	1,8	6,8	10,3	4,5
Holzfasereinblasdäm- mung Kessel	0,8	0,2	1,2	1,7	1,1
Holzfasereinblasdäm- mung Wärmepumpe	2,1	0,5	1,3	1,5	1,2

Tabelle 11-4: Ökologische Amortisationszeit für die Dämmung eines ungedämmten sonstigen Nichtwohngebäudes in Richtung KfW-Effizienzhausstandard 55; Angerechnete Heizenergieeinsparung: Gas-Brennwertkessel bzw. Sole-/Wasser-Wärmepumpe

Sonstige Nichtwohn- gebäude	Kumulierter Energieauf- wand (a)	Treibhausf- fekt (a)	Versauerungs- pot. (a)	Terr. Eutrophie- rungspot. (a)	Feinstaubpot. (PM 2,5) (a)
EPS Kessel	0,5	0,6	1,3	1,5	1,3
EPS Wärmepumpe	1,0	1,1	1,2	1,0	1,1
Steinwolleplatten Kessel	0,6	0,7	5,9	5,9	5,1
Steinwolleplatten Wär- mepumpe	1,2	1,5	5,3	4,1	4,3
Holzfaserplatten trocken Kessel	1,6	0,5	3,5	6,2	3,7
Holzfaserplatten trocken Wärmepumpe	3,1	1,1	3,1	4,4	3,1
Glaswolleplatten Kessel	0,3	0,3	2,1	4,1	1,5

Glaswolle matten Wärme- pumpe	0,7	0,5	1,9	2,8	1,2
Holzfasereinblasdäm- mung Kessel	0,3	0,1	0,4	0,6	0,4
Holzfasereinblasdäm- mung Wärmepumpe	0,6	0,1	0,4	0,4	0,3