

Elisa Dunkelberg, Julika Weiß



Gebäude-Energiewende Arbeitspapier 4

Ökologische Bewertung energetischer Sanie- rungsoptionen



Impressum

Autor/innen:

Dr. Elisa Dunkelberg (IÖW), Dr. Julika Weiß (IÖW)

Als Forschungspartner kooperieren

Projektleitung:

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin

Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin

www.ioew.de

Kooperationspartner:

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg (BTU CS)

Großenhainer Str. 57, 01968 Senftenberg

www.b-tu.de

RWTH Aachen | E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

Mathieustraße 10, 52074 Aachen

www.eonerc.rwth-aachen.de

Zitiervorschlag

Dunkelberg, Elisa; Weiß, Julika (2016): Ökologische Bewertung energetischer Sanierungsoptionen, Gebäude-Energiewende, Arbeitspapier 4, Berlin.

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt „Gebäude-Energiewende – Systemische Transformation der Wärmeversorgung von Wohngebäuden“. Das Projekt ist Teil des vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Schwerpunktprogramms „Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems“ der Sozial-ökologische Forschung (SÖF; Förderkennzeichen 03EK3521). Für nähere Informationen zum Projekt siehe www.gebaeude-energiewende.de.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



FONA
Sozial-ökologische
Forschung
BMBF

b.tu

Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

RWTHAACHEN
UNIVERSITY



i | ö | w

INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Zusammenfassung

Das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „Gebäude-Energiewende“ nimmt Wohngebäude im Eigentum von Privatpersonen in schrumpfenden und wachsenden Regionen in den Blick und ermittelt nachhaltige Sanierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung regional-ökonomischer Faktoren. Im vorliegenden Arbeitspapier wurde untersucht, welche ökologischen Wirkungen energetische Sanierungsmaßnahmen haben. Die Sanierungsmaßnahmen umfassen dabei Maßnahmen an der Gebäudehülle sowie den Einsatz effizienter und auf erneuerbaren Energien basierender Wärmebereitstellungstechnologien. Untersucht wurden die Wirkungen für Prototypen von Einfamilienhäusern und kleinere Mehrfamilienhäusern, die basierend auf dem Gebäudebestand in den beiden Untersuchungsregionen in Brandenburg entwickelt wurden. Im weiteren Projektverlauf werden die Ergebnisse der ökologischen Bewertung verwendet, um Empfehlungen für die Sanierung der Gebäudeprototypen zu geben und unterschiedliche Sanierungsszenarien für die Regionen zu bewerten.

Die ökologische Bewertung diente insgesamt der Beantwortung folgender Fragen:

- Wie schnell amortisieren sich energetische Sanierungsmaßnahmen aus ökologischer Sicht bzw. ab welcher Nutzungsperspektive lohnen sich welche energetischen Sanierungen?
- Welche Umweltwirkung haben Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpakete und welche Maßnahmen(pakete) sind aus ökologischer Sicht für die untersuchten Gebäudeprototypen zu empfehlen?
- Wie unterscheiden sich die Umweltwirkungen je nach verwendetem Dämmstoff und Energieträger?

Zur Ermittlung der Umweltwirkungen wurde eine Ökobilanzierung durchgeführt. Die ökologische Bewertung gibt Auskunft über einzelne Wirkungskategorien – neben dem Treibhausgasemissionsfaktor (GWP), die Verknappung fossiler Energieträger (ADPF), Verknappung abiotischer Stoffe (ADPE), Versauerung (AP), Ozonabbau (ODP), Eutrophierung (EP) und photochemische Ozonbildung (POCP). Die Ökobilanzen basieren auf Daten aus der Datenbank ÖkobaDat. Diese enthält keine Daten zu den Wirkungskategorien Human- und Ökotoxizität, weswegen gesundheitliche und ökotoxikologische Aspekte in dieser Arbeit über eine Literaturrecherche und -auswertung qualitativ berücksichtigt wurden. Durch eine Gewichtung der in der Ökobilanzierung berücksichtigten Wirkungskategorien ist es möglich, aus ökologischer Perspektive Rangfolgen abzuleiten. Die verwendeten Gewichtungsfaktoren wurden aus einer Studie des Joint Research Centre (JRC) übernommen, in der verschiedene Faktorensätze – basierend auf der Einschätzung eines wissenschaftlichen Expertengremiums sowie eines Ausschusses freiwilliger Interessensvertreter – enthalten sind. Ein Vergleich der Ergebnisse bei Verwendung dieser unterschiedlichen Faktorensätze in der vorliegenden Arbeit zeigt nur geringfügige Abweichungen in den daraus abgeleiteten Rangfolgen. In allen Gewichtungssätzen wird die Wirkungskategorie Treibhausgasemissionsfaktor besonders stark gewichtet.

Nachfolgend werden die zentralen Ergebnisse des Arbeitspapiers zusammenfassend dargestellt. **Emissionen aus Herstellung, Transport und Entsorgung** sind bei den Heizungssystemen im Vergleich zur Nutzungsphase vernachlässigbar. Der Einsatz eines auf erneuerbaren Energien basierenden Heizungssystems lohnt sich demnach aus ökologischer Perspektive nahezu sofort. Bei den Dämmmaßnahmen sind die CO_{2eq}-Amortisationszeiten, sprich der Zeitraum, nachdem sich die Emissionen aus Herstellung und Entsorgung durch die reduzierten CO_{2eq}-Emissionen während der Nutzung amortisiert haben, mit wenigen Monaten bzw. Jahren ebenfalls kurz. Somit spielt die „**graue Energie**“¹ bei der energetischen Sanierung nur eine untergeordnete Rolle. Eine Ausnahme stellen neuere Gebäude dar, die bereits einen guten Wärmeschutz aufweisen. Zusätzliche Dämmungen amortisieren sich hier erst nach mehreren Jahren. Neue Fenster amortisieren sich ebenfalls – auch bei älteren Gebäuden – erst nach einem Zeitraum von bis zu zehn Jahren.

Insgesamt lässt sich nach 40 Jahren Nutzungsdauer mittels Fassadendämmung die höchste Endenergieerduktion und somit auch CO_{2eq}-Vermeidung erreichen, es folgen die Innenwanddämmung, der Einsatz von

¹ Als graue Energie wird die Energiemenge bezeichnet, die für Herstellung, Entsorgung etc. benötigt wird.

Dämmputz, die Dämmung der obersten Geschossdecke bzw. des Daches, der Kellerdecke sowie zuletzt der Einsatz neuer Fenster.

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung erlauben aus ökologischer Perspektive für die **Auswahl des Dämmmaterials** einige Schlussfolgerungen. Deutliche Unterschiede bestehen vor allem in den Wirkungskategorien Treibhausgaseffekt, Verknappung fossiler Energieträger, photochemische Ozonbildung und Verknappung abiotischer Stoffe. Die auf Erdöl basierenden Dämmstoffe EPS und PUR weisen höhere Werte in den Kategorien Treibhausgaseffekt und Verknappung fossiler Energieträger auf als Mineralwolle, Kalziumsilikat und die auf NaWaRo basierenden Materialien (Hanf-, Holz- und Zellulosefasern). Bei EPS ist das hohe Potenzial zur photochemischen Ozonbildung hervorzuheben. In der Wirkungskategorie Verknappung abiotischer Stoffe weisen EPS, Holzfasern und Hanffasern sehr geringe Werte auf, wohingegen Mineralwolle, Kalziumsilikat, PUR und Zellulose höhere Potenziale zur Ressourcenverknappung haben. Nach Gewichtung der Wirkungskategorien nimmt EPS den aus ökologischer Perspektive insgesamt schlechtesten Rang ein, es folgen PUR, Hanf- und Holzfasern, Mineralwolle, Kalziumsilikat und Zellulose. Die in der Ökobilanz nicht enthaltenen gesundheitlichen und ökotoxikologischen Effekte betonen die Vorteile von Dämmstoffen auf Basis von NaWaRo (mit Ausnahme von Zellulose), da vor allem EPS und PUR diesbezüglich Nachteile aufweisen. Aber auch bei Dämmstoffen aus NaWaRo kann Toxizität aufgrund von bestimmten Zusätzen ein Thema sein.

Eine wichtige Kenngröße für die ökologische Bewertung der **Wärmebereitstellungstechnologien** sind die spezifischen CO_{2eq}-Emissionen pro Kilowattstunde (inkl. der Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL). Die höchsten Emissionen weisen Öl-Brennwertkessel auf, gefolgt von Gas-Brennwertkesseln, Gaswärmepumpen, Luft-Wärmepumpen, Erdwärmepumpen (Sonden und Kollektoren) sowie zuletzt Pellets und Hackschnitzel-Heizungen. Solarthermieanlagen tragen jeweils zu einer Reduktion der Emissionen um etwa 10 bis 25 % bei, je nachdem ob sie zur Trinkwassererwärmung oder Heizungsunterstützung eingesetzt werden. Werden Pelletkessel oder Hackschnitzelheizungen um Solarthermieanlagen ergänzt, so ändern sich die CO_{2eq}-Emissionen aufgrund der sehr geringen spezifischen CO_{2eq}-Emissionen der Biomasse-Heizungen kaum.

Die meisten Wärmebereitstellungstechnologien weisen in einigen Wirkungskategorien Vor- und in anderen Kategorien Nachteile auf. Die aus Klimaschutzsicht sehr günstigen Systeme Pellets- und Hackschnitzelheizungen weisen Nachteile in den Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung und photochemische Ozonbildung auf. Zudem führen sie infolge von hohen Feinstaubemissionen zu gesundheitlichen Risiken. Mit Strom betriebene Wärmepumpen weisen ebenfalls hohe Werte in den Kategorien Versauerung, Eutrophierung und photochemische Ozonbildung auf – es sei denn, es kommt zumindest anteilig Strom aus Photovoltaik-(PV)-Anlagen zum Einsatz. Nach Gewichtung der Wirkungskategorien erhalten Öl-Brennwertkessel den aus ökologischer Perspektive schlechtesten Rang, es folgen Gas-Brennwertkessel, mit Solarthermie ergänzte Gas-Brennwertkessel, Luft-Wärmepumpen ohne und mit Solarthermie, Erd-Wärmepumpen, Pellet- und Hackschnitzelheizungen ohne und mit Solarthermie sowie mit der besten ökologischen Gesamtperformance Erd-Wärmepumpen, die anteilig mit PV-Strom (hier zu 45 %) betrieben werden. Bei der Bewertung der Wärmepumpen ist die Jahresarbeitszahl (JAZ) entscheidend für das Ergebnis. Feldtests zeigen, dass diese in der Realität teilweise deutlich geringer ausfallen als die von Herstellern angegebenen Leistungszahlen. Bei einer geringen JAZ ist es abhängig vom erzielten solaren Deckungsgrad möglich, dass die Kombination Gas-Brennwertkessel und Solarthermieanlage im Gegensatz zu dem hier berechneten Ergebnis besser abschneidet als eine Luft-Wärmepumpe. In der Summe betonen die Ergebnisse die ökologische Vorteilhaftigkeit von Heizungssystemen, die auf erneuerbaren Energien basieren.

Neben den Einzelmaßnahmen erfolgte eine Bewertung von **Maßnahmenkombinationen** (s. Abb). Die potenzielle CO_{2eq}-Vermeidung durch die energetische Sanierung der Gebäudehülle hängt maßgeblich vom vorliegenden Heizungssystem und dessen spezifischen CO_{2eq}-Emissionen ab. Die Dämmung von Außenwand, oberster Geschossdecke und Kellerdecke führt beispielsweise zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs und entsprechend auch der CO_{2eq}-Emissionen um etwa 50 %. Ist ein Pelletkessel anstelle eines Gas-Brennwertkessels installiert, so beträgt die Reduktion der CO_{2eq}-Emissionen infolge einer Dämmung der genannten Bau-

teile nur etwa 1 t CO_{2eq}/(Gebäude*a) anstelle von 6 t CO_{2eq}/(Gebäude*a). Das Ziel eine hohe CO_{2eq}-Vermeidung zu erreichen und insgesamt möglichst geringe negative ökologische Effekte zu erzielen, lässt sich allerdings nur über die Kombination der Maßnahmen erreichen. In der Summe liegt die erzielte CO_{2eq}-Vermeidung durch die Kombination der Maßnahme Pelletkessel und umfassende Dämmung bei 11 t CO_{2eq}/(Gebäude*a)

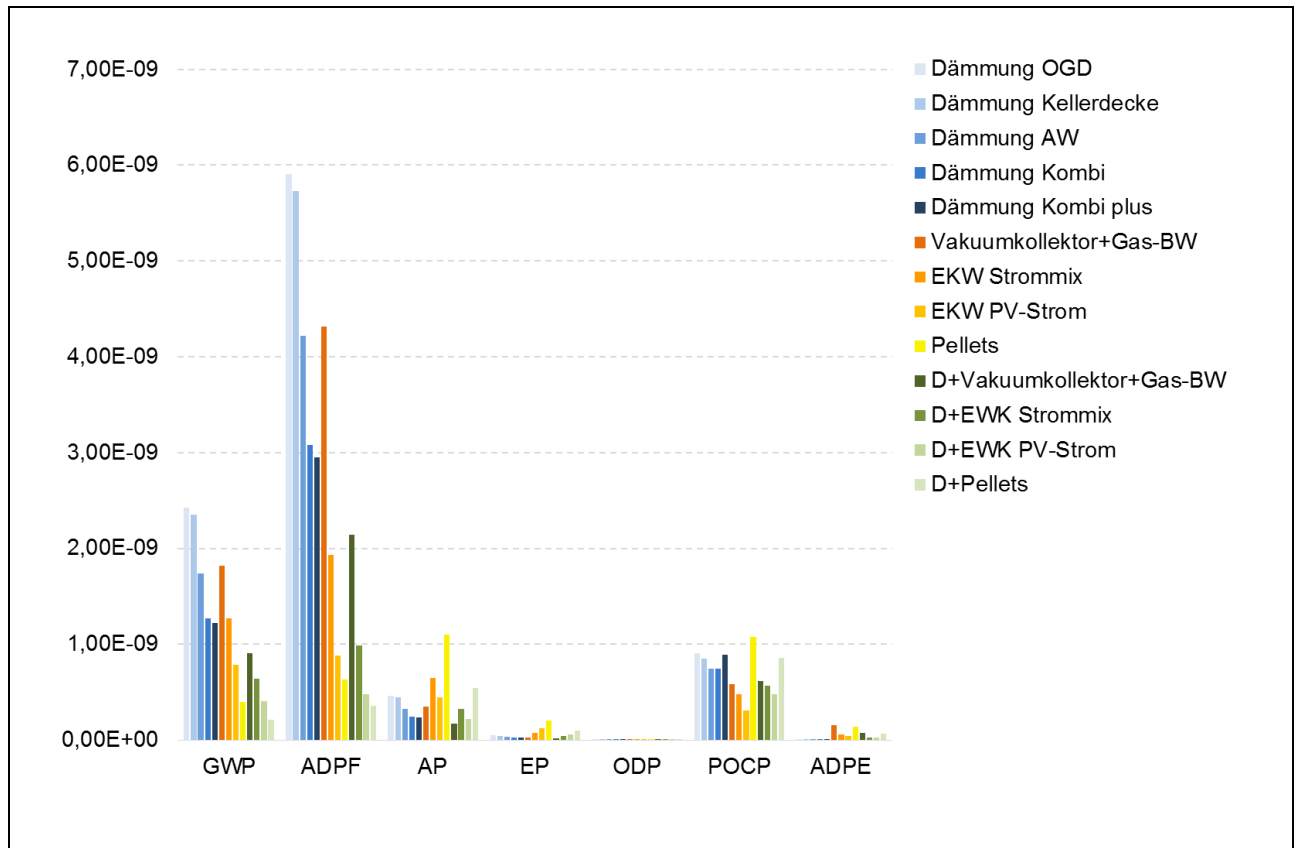


Abbildung: Normierte Emissionen verschiedener Maßnahmenpakete

Erläuterung: Dargestellt sind die normierten Emissionen der jeweiligen Wirkungskategorien, die während der Lebenszyklusphasen Herstellung, Transport, Nutzung und EoL der Dämmmaßnahmen und Heizungssysteme freigesetzt werden. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer des Hauses von 40 Jahren und der Heizungssysteme von 20 Jahren. Das Beispielgebäude weist einen Endenergiebedarf von 264 kWh/(m² GNF*a) im Ausgangszustand auf. Bei den Dämmmaßnahmen wurde als Heizungssystem ein Gas-Niedertemperaturkessel unterstellt (282 g CO_{2eq}/kWh).

im Vergleich zum Ausgangszustand.

Nach Gewichtung der Wirkungskategorien schneiden neben der Kombination aller Dämmmaßnahmen mit einer zu 45 % mit PV-betriebenen Erd-Wärmepumpe die Kombination aller Dämmmaßnahmen mit einem Pelletkessel sowie nachfolgend einer mit dem derzeitigen Strommix betriebenen Erd-Wärmepumpe insgesamt am besten ab. Die Rangfolge der Maßnahmenpakete kann sich allerdings ändern, wenn die erzielbare Reduktion des Endenergiebedarfs beispielsweise aufgrund des Baujahrs geringer ausfällt als für das Referenzgebäude des Gebäudeprototypen 1 berechnet. Grundsätzlich weisen auf erneuerbaren Energien basierende Wärmebereitstellungstechnologien bei geringeren Energieeinsparpotenzialen und entsprechend bei neueren Gebäuden eher ökologische Vorteile gegenüber umfassenden Dämmungen mit hohen Dämmdicken auf. Dies ist auf die geringere Reduktion des Endenergiebedarfs durch die Dämmung – und somit eine zunehmende Relevanz der Emissionen aus der Dämmstoffherstellung – sowie auf das insgesamt niedrigere Niveau des Endenergiebedarfs zurückzuführen. Letzteres führt dazu, dass die hohen Werte einiger auf erneuerbaren

Energien basierender Heizungssysteme in bestimmten Wirkungskategorien, wie beispielsweise das hohe Versauerungspotenzial strombetriebener Wärmepumpen, weniger stark ins Gewicht fallen.

Nicht in der Ökobilanzierung berücksichtigt, sind neben den gesundheitlichen Aspekten die Verfügbarkeit der erneuerbaren Energieträger und mögliche Nutzungskonkurrenzen. Die verfügbaren Potenziale sind vor allem bei Pellets und Hackschnitzeln begrenzt und die Konkurrenz zur stofflichen Nutzung hoch, so dass ein umfassender Einsatz dieser Heizungstechnologien trotz günstigem Abschneiden im Rahmen der Ökobilanzierung nicht sinnvoll ist. Zudem gehen die hohen Feinstaubemissionen mit gesundheitlichen Risiken einher. Es bedarf daher weiterführender Untersuchungen, in welchen Teilen des Gebäudebestands ein Einsatz von Biomasse aufgrund fehlender erneuerbarer Alternativen zu empfehlen ist. Wegen der hohen Feinstaubemissionen ist ein Einsatz gebäudebezogener Biomasseheizungsanlagen insbesondere in Städten problematisch, so dass hier eher auf Alternativen wie Solarthermieanlagen und Wärmepumpen zurückgegriffen werden sollte. Der Einsatz der erneuerbaren Ressourcen, insbesondere von Biomasse, muss zudem mit den Transformationsstrategien für die Sektoren Strom und Verkehr abgestimmt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Zielsetzung	1
2	Methodisches Vorgehen bei der Ökobilanzierung	3
2.1	Allgemeine Vorgehensweise.....	3
2.2	Untersuchungsgegenstand	6
3	Darstellung der Einzelmaßnahmen	9
3.1	Maßnahmen an der Gebäudehülle	9
3.2	Maßnahmen am Heizungssystem	20
4	Ergebnisse der Ökobilanzierung	30
4.1	Maßnahmen an der Gebäudehülle	30
4.1.1	CO _{2eq} -Emissionen, -Vermeidung und Amortisationszeiten	30
4.1.2	Weitere Wirkungskategorien, Normierung und Gewichtung	36
4.2	Heizungssysteme	38
4.2.1	CO _{2eq} -Emissionen.....	38
4.2.2	Weitere Wirkungskategorien, Normierung und Gewichtung	40
4.3	Vergleich der Maßnahmen an der Gebäudehülle und der Heizung sowie Maßnahmenkombinationen	42
5	Fazit und Schlussfolgerungen.....	47
6	Literaturverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1:	CO _{2eq} -Emissionen durch eine Dämmung der Außenwand nach Lebenszyklusphasen	30
Abb. 4.2:	CO _{2eq} -Emissionen durch den Einsatz neuer Fenster nach Lebenszyklusphasen	31
Abb. 4.3:	CO _{2eq} -Emissionen und –Vermeidung verschiedener Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle	32
Abb. 4.4:	Amortisationszeit aus Klimaschutzperspektive der Fassadendämmung mit EPS	34
Abb. 4.5:	Normierte Emissionen verschiedener Dämmmaterialien bei Einsatz zur Innendämmung	36
Abb. 4.6:	Gewichtung der Wirkungskategorien für verschiedene Dämmstoffe (Innendämmung).....	37
Abb. 4.7:	CO _{2eq} -Emissionen verschiedener Heizungssysteme über den gesamten Lebenszyklus	39
Abb. 4.8:	Normierte Emissionen verschiedener Heizungssysteme	41
Abb. 4.9:	Gewichtung der Wirkungskategorien für verschiedene Heizungssysteme	42
Abb. 4.10:	Normierte Emissionen verschiedener Sanierungsmaßnahmen und -pakete	44
Abb. 4.11:	Gewichtung der Wirkungskategorien für Sanierungsmaßnahmen und -pakete...	45
Abb. 4.12:	Gewichtung der Wirkungskategorien für Sanierungsmaßnahmen und -pakete (geringe Energiebedarfsreduktion)	46

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Technische Lebensdauern von Bauteilen und Replacementfaktoren	4
Tab. 2.2:	Normierung und Gewichtung	6
Tab. 2.3:	Kurzcharakterisierung der Gebäudeprototypen.....	6
Tab. 3.1:	Umrechnungsfaktoren der Bauteilflächen für die Gebäudeprototypen	9
Tab. 3.2:	Emissionsfaktoren verschiedener Heizungssysteme	20
Tab. 4.1:	CO _{2eq} -Amortisationszeiten verschiedener Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle.....	34
Tab. 4.2:	Netto-CO _{2eq} -Vermeidung verschiedener Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle nach einer Nutzungsdauer von 40 Jahren	35
Tab. 4.3:	Spezifische CO _{2eq} -Emissionen pro Kilowattstunde Endenergie	40

Abkürzungsverzeichnis

ADPE	Verknappung von abiotischen Ressourcen (Stoffen)
ADPF	Verknappung von abiotischen Ressourcen (fossile Brennstoffe)
AP	Acidification Potential, Versauerungspotenzial
AW	Außenwand
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BRB	Brandenburg
CML	Center of Environmental Science of Leiden University
CO _{2eq}	CO ₂ -Äquivalente
COP	Coefficient of Performance, Leistungszahl bei Wärmepumpen
DT	Deutschland
EoL	End of Life
EP	Eutrophication Potential, Eutrophierungspotenzial
EPD	Environmental Product Declaration
EPS	Expandierter Polystyrolschaum
EWK	Elektro-Wärmepumpe (Erd-) Kollektor
EWL	Elektro-Wärmepumpe Luft
EWS	Elektro-Wärmepumpe (Erd-) Sonde
EZFH	Ein- und Zweifamilienhäuser
Gas-BW	Gas-Brennwertkessel
GP	Gebäudeprototyp
GWP	Global Warming Potential, Treibhauseffekt
HBCD	Hexabromcyclododecan
HEV	Heizenergieverbrauch
JAZ	Jahresarbeitszahl bei Wärmepumpen
LS	Lausitz-Spreewald
MFH	Mehrfamilienhäuser
MVA	Müllverbrennungsanlage
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
ODP	Ozone Depletion Potential, Ozonabbaupotenzial
OGD	Oberste Geschossdecke
Öl-BW	Öl-Brennwertkessel
POCP	Photochemische Ozonbildung

PPM	Potsdam/Potsdam-Mittelmark
PUR	Polyurethan-Hartschaum
PV	Photovoltaik
TCEP	Tris(2-Chloroethyl)phosphat
TCPP	Tris(chloroisopropyl)phosphat
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
WLG	Wärmeleitfähigkeitsgruppe

1 Einführung und Zielsetzung

Das Energiekonzept der Bundesregierung strebt eine Reduktion des Primärenergiebedarfs um 80 % im Gebäudebestand an. Zentrale Elemente, um dieses Ziel zu erreichen, sind eine umfassende energetische Sanierung der Gebäudehülle sowie der breite Einsatz erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung. Während im Stromsektor in den vergangenen Jahren ein deutlicher Ausbau erneuerbarer Energien zu verzeichnen war, geht die Energiewende im Wärmesektor und insbesondere im Gebäudebestand nur schleppend voran. Während im Neubau Gasbrennwertkessel etwa 50 % und Wärmepumpen etwa 20 % der in 2011 installierten Heizungssysteme stellten, waren es im Wohnungsbestand etwa 50 % mit Gas und 30 % mit Heizöl betriebene Kessel (Vohrer et al. 2013). Ziel der Energiewende im Wärmesektor muss es demnach sein den Anteil erneuerbarer Energien im Gebäudebestand zu steigern.

Wohngebäude in Privateigentum stellen die größte Anzahl an Gebäuden und sind daher für die Zielerreichung besonders wichtig. Deutschlandweit existieren etwas mehr als 18 Millionen Wohngebäude – diese bestehen zu 83 % aus Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH) und zu 17 % aus Mehrfamilienhäusern (MFH). 85 % der Wohngebäude in Deutschland sind im Eigentum von Privatpersonen (Statistisches Bundesamt 2011).

Das Projekt Gebäude-Energiewende geht von der These aus, dass der demografische Wandel und die wirtschaftliche Entwicklung einer Region die ökonomische und ökologische Bewertung verschiedener Sanierungsmaßnahmen beeinflussen. Daher befasst sich das Projekt mit dem Sanierungsverhalten und der Bewertung von Sanierungsmaßnahmen in schrumpfenden und wachsenden Regionen. Bevölkerungsabnahme und -alterung sind typische Trends in schrumpfenden Regionen (BBSR 2010). Beide Trends können sich auf den Bereich Wohnen und Bauen auswirken, beispielsweise indem die Nutzungsperspektive von Gebäuden in schrumpfenden Regionen kürzer oder unsicher oder die Leerstandsquote höher ist. Gleichzeitig hat die Nutzungsdauer von Gebäuden einen Einfluss auf die Frage, welche Sanierungsoptionen nachhaltig sind. So ist beispielsweise die Bedeutung der „Grauen Energie“ von Dämmmaterialien bei einer kurzen Nutzungsdauer höher als bei einer langen Nutzungsdauer. Eine These des Forschungsprojekts ist daher, dass abhängig von den Restriktionen, z. B. kürzerer Nutzungsdauern, auch andere Sanierungsmaßnahmen zu empfehlen sind.

Als schrumpfende Region wird im Projekt die Planungsregion Lausitz-Spreewald (LS) und als wachsende Region die Stadt Potsdam und der umgebende Landkreis Potsdam-Mittelmark (PPM) untersucht. Die Ausprägung diverser regionalökonomischer und soziodemografischer Indikatoren für die Untersuchungsregionen ist in Großmann (2015) beschrieben. Bei nahezu allen der fast 30 untersuchten Indikatoren wurden Unterschiede zwischen den Regionen gefunden. Deutliche Unterschiede bestehen bezüglich der durchschnittlichen Netto-Haushaltseinkommen (PPM>LS), der Bruttokaltmiete (PPM>LS) und der Leerstandsquote bei Wohnungen (PPM<LS). Soziodemografische Indikatoren wie das Durchschnittsalter (PPM<LS) und die Bevölkerungsentwicklung sind ebenfalls unterschiedlich ausgeprägt. Die Datenauswertung hat allerdings auch ergeben, dass sich die Untersuchungsregionen teilweise weniger untereinander unterscheiden als im Vergleich zum bundesweiten Durchschnitt. Dies ist besonders beim Netto-Haushaltseinkommen zu sehen, welches in LS bei 1.622 Euro, in PPM bei 1.968 Euro und im bundesweiten Durchschnitt bei 2.988 Euro liegt (Großmann 2015).

Zudem wurde im bisherigen Projektverlauf der Wohngebäudebestand in Privateigentum in den Untersuchungsregionen charakterisiert. Aus energetischer Perspektive relevante Gebäudeeigenschaften sind vor allem das Gebäudealter, die Lage (freistehend, Mittellage, Ecklage), die Gebäudegröße, aber auch der bisherige Sanierungszustand. Die Regionen wurden außerdem hinsichtlich des Energieverbrauchs verglichen (s. Dunkelberg und Weiß 2015). Im Hinblick auf die allgemeinen Gebäudeeigenschaften unterscheidet sich der Gebäudebestand in beiden Regionen nur wenig. In LS war die Bautätigkeit in den Jahren der DDR sowohl bei EZFH als auch bei MFH etwas höher als in PPM. Die durchschnittlichen Heizenergieverbräuche der Gebäude in LS, PPM und in Gesamtdeutschland sind ähnlich hoch. Die Unterschiede im Sanierungszustand der Gebäude sind zwischen den Regionen LS und PPM insgesamt ebenfalls eher gering. Der Anteil vollsanierter EZFH und MFH ist in den Untersuchungsregionen allerdings deutlich höher als in Gesamtdeutschland, wobei die Sanierungen in den Untersuchungsregionen vor allem in den 90er Jahren erfolgten, während in den alten

Bundesländern im Zeitraum von 1990 bis 2009 kontinuierlicher saniert wurde. Der energetische Zustand der sanierten Gebäude in den Untersuchungsregionen entspricht daher häufig nicht den aktuellen energetischen Standards. Dementsprechend liegen die durchschnittlichen Heizenergieverbräuche der vollsanierten EZFH in den Untersuchungsregionen deutlich höher als im bundesweiten Durchschnitt.

Die im Vergleich zu den Vorjahren und zum bundesdeutschen Durchschnitt geringeren Sanierungsraten im Zeitraum von 2005 bis 2009 in den Untersuchungsregionen weisen darauf hin, dass die Sanierungsaktivitäten deutlich gesteigert werden müssen, um zum Erreichen der bundespolitischen Zielsetzung beizutragen. Die in den Nachwendejahren eingebauten Heizungskessel sind zudem inzwischen in die Jahre gekommen, sodass in den nächsten Jahren erneut eine hohe Austauschrate zu erwarten ist. Dieses Sanierungsfenster sollte möglichst durch die Umsetzung von Maßnahmen genutzt werden, die einen hohen ökologischen Nutzen erzielen.

Ziel dieser Arbeit ist die ökologische Bewertung von einzelnen Sanierungsmaßnahmen und Maßnahmenpaketen, die an den für die Untersuchungsregionen identifizierten Gebäudeprototypen umgesetzt werden.

Die Sanierungsmaßnahmen selbst, Außenwand-, Dach- und Kellerdeckendämmung, Fensteraustausch und Heizungsaustausch werden dabei ebenso bewertet und verglichen wie unterschiedliche Materialien bzw. Technologien, die zum Einsatz kommen können. Dies betrifft vor allem die Unterscheidung verschiedener Dämmmaterialien auf Basis synthetischer, mineralischer und nachwachsender Rohstoffe.

Neben der für die Erreichung der Klimaschutzziele entscheidenden Wirkungskategorie Treibhausgaseffekt werden weitere ökologische Wirkungskategorien wie Versauerung, Eutrophierung und Ressourcenaufwand betrachtet, um zu einer weitreichenderen Bewertung zu gelangen. Gesundheitliche Aspekte werden anhand einer Literaturrecherche qualitativ bewertet. Im weiteren Projektverlauf werden die Ergebnisse der ökologischen Bewertung verwendet, um Sanierungsszenarien für die Regionen zu entwickeln und zu bewerten.

Nach einer kurzen Darstellung der Vorgehensweise (Kapitel 2) werden zunächst die einzelnen Sanierungsmaßnahmen inklusive der mit ihnen einhergehenden ökologischen und gesundheitlichen Aspekte literaturbasiert beschrieben (Kapitel 3), anschließend folgen die Ergebnisse der Ökobilanzen für die Einzelmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen (Kapitel 4) sowie eine Zusammenfassung und Schlussfolgerung (Kapitel 5).

2 Methodisches Vorgehen bei der Ökobilanzierung

2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Zur Analyse der ökologischen Wirkungen, die durch die Sanierungsmaßnahmen verursacht werden, wird die Methode der **Ökobilanzierung** angewandt. Die Erstellung der Ökobilanzen erfolgt in Anlehnung an die Ökobilanz-Norm ISO 14040 ff (DIN EN ISO 14040ff). Der Norm entsprechend erstrecken sich Ökobilanzen über den gesamten Lebensweg der eingesetzten Materialien (in diesem Fall z. B. Dämmstoffe, Fenster oder Heizungen). Ergänzend wurde die Norm DIN EN 15804 „Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013“ herangezogen, die das methodische Vorgehen bei der Erstellung von Ökobilanzen speziell im Baugewerbe regelt und vereinheitlicht, insbesondere bezüglich der zu wählenden Berechnungsmethoden, der Auswahl von Umweltindikatoren und Verifizierungsregeln für Umweltproduktdeklarationen (EPD – environmental product declaration) von Bauprodukten und Dienstleistungen. Im Hinblick auf das methodische Vorgehen ist darauf hinzuweisen, dass auf europäischer Ebene derzeit die Entwicklung spezieller Regeln für einen Product Environmental Footprint für Dämmmaterialien für die energetische Sanierung von Gebäuden diskutiert und überprüft wird (EC 2014). Aus dieser Entwicklung können sich perspektivisch neue Anforderungen an das Design entsprechender Ökobilanzen bzw. ökologischer Fußabdrücke ergeben.

Die Norm DIN EN 15804 unterteilt den Lebensweg von Bauprodukten in die **Lebenswegmodule** Herstellungsphase A 1-3 (Rohstoffbereitstellung, Transport, Herstellung), Errichtungsphase A 4-5 (Transport zur Baustelle, Installation), Nutzungsphase B 1-7 (Nutzung, Instandhaltung, Reparatur, Energie- und Wassereinsatz), End-of-Life-Phase C 1-4 (Abbruch, Transport, Aufbereitung und Entsorgung) und Rückgewinnung D (Weiterverwendung, Recycling oder Weiterverwertung). Diese Module wurden, sofern es die Datenverfügbarkeit erlaubte, in dieser Arbeit berücksichtigt. Im Zuge der Nutzungsphase wird der Energieeinsatz zur Deckung des Wärmebedarfs über die gesamte Nutzungsdauer des Gebäudes betrachtet. Als Standardfall wird eine mit Erdgas betriebene Heizung angenommen. Auf diese Weise ist es möglich, die Nettoeffekte von Sanierungsmaßnahmen zu ermitteln, die sich aus der Differenz der Emissionen aus Herstellung, Transport und Entsorgung der Materialien sowie der vermiedenen Emissionen aus dem geminderten Endenergiebedarf ergeben.

Für die Erstellung der Ökobilanzen kam die Software SimaPro 8 zum Einsatz. Die Sachbilanzdaten wurden vornehmlich der **Datenbank** Ökobaudat entnommen und teilweise durch Literaturrecherchen ergänzt. Ökobaudat ist eine Baustoffdatenbank, die speziell für Deutschland Gültigkeit hat und die für die Bestimmung globaler ökologischer Wirkungen eingesetzt werden kann. Sie enthält derzeit insgesamt über 700 Datensätze für Bauprodukte, die konform zur DIN EN 15804 erstellt wurden. Neben Daten zu synthetischen Dämmstoffen sind auch solche zu Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen enthalten. Somit weist die Datenbank mehrere Vorteile gegenüber der Schweizer Datenbank ecoinvent auf, die vor allem für den Schweizer Raum gilt und vornehmlich synthetische Baustoffe aufführt. Die Datenbank Ökobaudat wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) zur Verfügung gestellt und kann in die Software SimaPro integriert werden. Die Datenbank enthält zwei verschiedene Typen an Datensätzen. Zum einen liegen generische Datensätze vor, die basierend auf technischem Wissen, Literatur u.ä. unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlags erstellt wurden. Zum anderen liegen repräsentative Datensätze von Industrieverbänden vor, die aus EPDs generiert wurden (PE International AG und BBSR 2013). Sofern möglich wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die EPD-Datensätze verwendet, teilweise war es jedoch erforderlich diese mit generischen Datensätzen zu verknüpfen (zum Beispiel zur Darstellung der End-of-Life-Phase (EoL)). Eine Aktualisierung der in der Ökobaudat enthaltenen Datenbank erfolgte im Jahr 2015.

Der **Betrachtungszeitraum**, über den die Ökobilanz erstellt wird, ergibt sich über die voraussichtliche Nutzungsdauer des Gebäudes. Diese wird im Standardfall auf 40 Jahre festgesetzt, in der Sensitivitätsanalyse werden zusätzlich kürzere Zeiträume betrachtet, da gerade in schrumpfenden Regionen die Nutzungsdauer bei einem Teil des Gebäudebestandes geringer ausfällt.

Nicht alle Bauteile und Materialien weisen eine Lebensdauer von 40 Jahren oder mehr auf. Bei kürzeren Lebensdauern muss der Austausch der Bauteile bzw. der Materialien berücksichtigt werden. Dies erfolgt über sogenannte **Replacementfaktoren**, die sich aus dem Verhältnis der Nutzungsdauer des Gebäudes zu der des betrachteten Bauteils errechnen. Der Replacementfaktor gibt also an, wie häufig ein Bauteil während der Nutzungsdauer des Gebäudes ersetzt werden muss (s. Tab. 2.1). Nimmt der Replacementfaktor einen ungeraden Wert an, so wird mit diesem Wert weitergerechnet – dies entspricht der üblichen Vorgehensweise bei der Erstellung von Ökobilanzen im Gebäudebereich (vgl. Vrijders und Delem 2010). Der Umgang mit Innovationen ist bei Ökobilanzen in der Regel konservativ. Bei Heizungen wird demnach trotz erwartbarer technologischer Entwicklung im Fall eines Austauschs keine Verbesserung des Wirkungsgrades angenommen.

Tab. 2.1: Technische Lebensdauern von Bauteilen und Replacementfaktoren

Quelle: Lebensdauern entsprechend der Methodenharmonisierung im Förderschwerpunkt Transformation des Energiesystems (Bürger 2014); Originalquellen: BBSR (2011), BTE (2008), VDI-Norm 2067 (2012)

Bauteil/Material	Lebensdauer	Replacementfaktor
Wärmeschutz opake Bauteile (Außenwand, Dach, Fußboden, Kellerdecke)	40	1,0
Fenster	30	1,3
Versorgungstechnologien (Heizung, Warmwasser, Lüftung)	20	2

Eine methodische Entscheidung muss bezüglich des Umgangs mit **Koppelprodukten** getroffen werden. Die Ökobilanznorm schlägt verschiedene Vorgehensweisen vor. Vorrang wird dabei der Systemraumerweiterung für alle erzeugten Nutzen eingeräumt (DIN EN ISO 14040ff). Ist dies aufgrund zu komplexer Systeme nicht möglich, so kann die Methode der Allokation verwendet werden. Bei einer Allokation werden die Umweltwirkungen nach bestimmten Allokationsregeln (z. B. Allokation nach dem unteren Heizwert, dem Marktpreis oder den Mengen) auf die anfallenden Produkte verteilt. Bei den betrachteten Sanierungsmaßnahmen sind vor allem die im Zuge der Verbrennung einiger Dämmstoffe in Müllverbrennungsanlagen hergestellte Elektrizität und Wärme als Koppelprodukte relevant. Methodisch werden hier Gutschriften angerechnet, die sich aus dem deutschen Strommix bzw. aus Erdgas erzeugter Wärme ergeben.

Die **Wirkungsabschätzung** erfolgt bei der Ökobaudat nach der Methode CML 2001 (Center of Environmental Science of Leiden University). Die CML-Methode zählt zu den Midpoint-Ansätzen, die über die jeweiligen Wirkungsindikatoren die potenziellen Veränderungen des Umweltzustandes quantitativ beschreiben. In Abgrenzung dazu versuchen Endpoint-Ansätze über die Indikatoren kausale Zusammenhänge zu den tatsächlichen Veränderungen der Umweltschutzgüter herzustellen (z. B. menschliche Gesundheit oder natürliche biotische Umwelt). Gemäß EN 15804 enthalten die aktuellen Datensätze der Ökobaudat Ergebnisse für die Wirkungskategorien Verknappung von abiotischen Ressourcen (fossile Energieträger, ADPF), Verknappung von abiotischen Ressourcen (Stoffe, ADPE), Versauerung von Boden und Wasser (AP), Ozonabbau (ODP), globale Erwärmung (GWP), Eutrophierung (EP) und photochemische Ozonbildung (POCP). Die verwendeten Charakterisierungsfaktoren stammen aus der CML-IA (Fassung 4.1, vom Oktober 2012) (DIN EN 15804:2014-07).

Die Wirkungskategorien **Ökotoxizität und Humantoxizität**, die nach CML 2001 ebenfalls ausgegeben werden, sind in der Ökobaudat allerdings nicht enthalten. Da in der Vergangenheit insbesondere gesundheitliche Bedenken häufig in Zusammenhang mit dem Einsatz bestimmter Dämmstoffe geäußert wurden, erfolgte im Rahmen dieser Hintergrundstudie eine Literaturrecherche und -auswertung zu den gesundheitlichen und ökotoxikologischen Wirkungen. Das Thema Entsorgung und Recycling wurde im Rahmen der Recherche ebenfalls adressiert, da diesbezüglich für die Ökobilanzierung teilweise vereinfachte Annahmen getroffen werden mussten. Die Aufarbeitung der in der Literatur zu findenden Erkenntnisse erlaubt eine qualitative Einschätzung der Relevanz dieser Aspekte für die jeweiligen Materialien und Anlagen.

Unter dem **anthropogenen Treibhauseffekt** wird die Klimaerwärmung in Folge einer steigenden Konzentration von THG, vor allem Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas und Fluorkohlenwasserstoffe, in der Atmosphäre verstanden. Mögliche Klimafolgen sind steigende Meeresspiegel, häufigere Extremwetterereignisse und Veränderungen in Temperatur und Niederschlagsmustern (UBA 1999). Für die Charakterisierung wird das Global Warming Potential (GWP), globales Erwärmungspotenzial, erfasst, welches in CO₂-Äquivalenten (CO_{2eq}) angegeben wird. Da die Verweildauern der Gase unterschiedlich sind, sind die Äquivalenzfaktoren abhängig vom Zeitbezug; es wird wie üblich ein Zeitbezug von 100 Jahren gewählt (GWP 100).

Die Wirkungskategorie **Versauerungspotenzial** erfasst die Erhöhung der Konzentration von Wasserstoff-H+-Ionen in Luft, Wasser und Boden. Insbesondere Schwefel- und Stickstoffverbindungen reagieren in der Atmosphäre zu Schwefel- und Salpetersäure, die als sogenannter „Saurer Regen“ Boden, Gewässer und Bauwerke schädigen. Durch die pH-Wert-Absenkung werden beispielsweise in versauerten Böden Nährstoffe ausgewaschen und in Oberflächengewässern kann es zu Fischsterben kommen (UBA 1999). Für die Charakterisierung wird das Versauerungspotenzial erfasst, das in SO₂-Äquivalenten angegeben wird.

Unter **Eutrophierung** wird die Anreicherung von Nährstoffen, insbesondere von Nitrat und Phosphat, in Gewässern verstanden. Diese kann eine starke Erhöhung der pflanzlichen Primärproduktion zur Folge haben, was letztlich zu einer deutlichen Sauerstoffzehrung in Gewässern führen kann (UBA 1999). Für die Charakterisierung wird das Eutrophierungspotenzial erfasst, welches in PO₄-Äquivalenten angegeben wird.

Der sogenannte **stratosphärische Ozonabbau** erfolgt in einer Höhe von etwa 25 bis 50 km. In dieser Höhe absorbiert die Ozonschicht einen Teil der ultravioletten Strahlung, die Lebewesen schädigen kann. Gase wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Halone und Lachgas (N₂O) verlagern das natürliche Gleichgewicht ozonbildender und ozonabbauender Reaktionen, sodass sich die Dicke der Ozonschicht verringert (UBA 1999). Für die Charakterisierung wird das Ozonzerstörungspotenzial (ODP) herangezogen, welches in Trichlorofluoromethan-(CFC-11, R 11)-Äquivalenten angegeben wird.

Die sogenannte **photochemische Oxidation** – auch Photosmog oder Sommersmog genannt – in den unteren, bodennahen Luftschichten führt zu einer Bildung von Ozon und anderen Photooxidantien. Ozon ist ein schädliches Spurengas, das lebende Organismen, vor allem Pflanzen, aber auch Materialien schädigt. Verantwortlich für die Ozonbildung sind neben der Licht- bzw. UV-Einstrahlung, vor allem erhöhte NO₂-Konzentrationen und leicht flüchtige Kohlenwasserstoffen (UBA 1999). Zur Charakterisierung wird das ozonbildende Potenzial (PCOP) erfasst, welches in Ethen-(C₂H₄)-Äquivalenten angegeben wird.

Für die Herstellung von Produkten werden teils Rohstoffe eingesetzt, die nur in endlichen Mengen vorhanden sind. Ihre Knappheit führt dazu, dass durch den Verbrauch dieser Ressourcen einer späteren Population die Entwicklungsgrundlage entzogen wird. Die **Verknappung abiotischer Ressourcen** wird anhand zweier Wirkungskategorien erfasst. Die Wirkungskategorie ADPF beschreibt das Potenzial für die Verknappung von fossilen Energieträgern. Das Potenzial wird in MJ angegeben. Die Wirkungskategorie ADPE beschreibt das Potenzial für die Verknappung nicht fossiler Ressourcen und beinhaltet alle nicht erneuerbaren, abiotischen stofflichen Ressourcen (außer fossile Energieträger). Das Potenzial wird in Antimon-(Sb)-Äquivalenten angegeben. Das Verknappungspotenzial wird über die Berücksichtigung von Recycling-Faktoren im Rahmen der jeweiligen End-of-Life-Szenarien gemindert (Boogman und Wurm 2013; Wenker und Rüter 2015).

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung fließen im weiteren Projektverlauf in die Erstellung eines leicht verständlichen Online-Beratungstools ein. Hierfür war es erforderlich aus den einzelnen Wirkungskategorien einen aggregierten Wert zu bilden, der alle Wirkungskategorien berücksichtigt und aus dem sich eine Rangfolge der Sanierungsmaßnahmen aus ökologischer Perspektive ergibt. Zu diesem Zweck bedarf es zunächst einer **Normierung**, damit die Werte zu den Wirkungskategorien dimensionslos vorliegen (Lundie 2013). Die Normierung erfolgte ebenfalls nach CML-Methode. Referenzgröße sind jeweils die Gesamtemissionen innerhalb der jeweiligen Wirkungskategorie in Europa im Jahr 2000 (EU25+3 nach CML-IA Version 4.7) (van Oers 2015). Aus dem Summenwert der Einzelwerte ergibt sich anschließend die Rangfolge. Ergänzend wurden in einem zweiten Schritt nach der Normierung verschiedene Gewichtungsfaktoren berücksichtigt, um die Robustheit der Rangfolge zu überprüfen. Die Gewichtung ist nach Ökobilanz-Norm ein optionaler Schritt, der Werthaltungen der Gesellschaft wiedergibt. Gewichtungsfaktoren können unter anderem über Befragungen von

Expertengruppen oder monetäre Wertungen geniert werden (Guinée et al. 2002). Für die nach Ökobaudat-Methode ausgegebenen Wirkungskategorien wurden im Rahmen der Recherche keine genau passenden Gewichtungsfaktoren gefunden. Behelfsmäßig wurde daher auf von Huppés und von Oers (2011) bzw. Lippiat (2007) dokumentierte Werte zurückgegriffen. Die in Lippiat (2007) dokumentierten Werte basieren auf der Einschätzung eines wissenschaftlichen Beratungsgremiums der Umweltbehörde EPA der USA (EPA Science Advisory Board) sowie auf der Einschätzung eines Ausschusses freiwilliger Interessensvertreter (BEES Stakeholder Panel). Da in den Datensätzen der Ökobaudat nicht alle bei Huppés und van Oers (2011) und Lippiat (2007) berücksichtigten Wirkungskategorien aufgeführt werden, wurden die Prozentwerte entsprechend angepasst, so dass sie insgesamt 100 % ergeben (s. Tab. 2.2). In allen Sets wird die Wirkungskategorie Treibhausgasemission überdurchschnittlich stark gewichtet.

Tab. 2.2: Normierung und Gewichtung

Quelle: Emissionen EU 25+3 für das Jahr 2000 nach CML-IA Version 4.7 (van Oers 2015), Gewichtungsfaktoren angepasst nach Huppés und van Oers (2011) bzw. Lippiat (2007)

Wirkungskategorie	Emissionen EU 25+3	GF EPA Science Advisory Board	GF BEES Stakeholder Panel	Durchschnittswert
GWP	5,22E+12	45%	34%	40%
ADPF	3,51E+13	16%	11%	12%
AP	1,68E+10	5%	11%	7%
EP	1,85E+10	9%	11%	12%
ODP	1,02E+07	3%	11%	7%
POCP	1,73E+09	6%	13%	9%
ADPE	6,75E+07	16%	11%	12%

2.2 Untersuchungsgegenstand

Im vorherigen Projektverlauf wurden sieben Gebäudeprototypen definiert, die mit fünf EZFH und zwei MFH den Wohngebäudebestand in den Untersuchungsregionen bezüglich der Verteilung in den Baualtersklassen und der Lage (freistehend, Mittellage) repräsentieren. Die ökologische Bewertung der Sanierungsmaßnahmen erfolgte für diese **Gebäudeprototypen**. Eine Kurzbeschreibung findet sich in Tab. 2.3.

Tab. 2.3: Kurzcharakterisierung der Gebäudeprototypen

Quelle: Primärenergie- und Endenergiebedarf stammen aus einer Modellierung des Projektpartners RWTH-Aachen

Erläuterung: unbeh = unbeheizt, beh = beheizt, unged = ungedämmt, ged = gedämmt

	GP 1	GP 2	GP 3	GP 4	GP 5	GP 6	GP 7
Gebäudetyp	EZFH	EZFH	EZFH	EZFH	EZFH	MFH	MFH
Baualtersklasse	bis 1948	bis 1948	1949-1990	1991-2000	1991-2000	bis 1948	1991-2000
Lage	frei	mittel	frei	frei	mittel	end	end
Gebäudenutzfläche [m ²]	180	150	150	180	150	500	500

	GP 1	GP 2	GP 3	GP 4	GP 5	GP 6	GP 7
Dach	unbeh.	unbeh.	beh.	beh.	beh.	unbeh.	beh.
Dachdämmung			unged.	ged.	ged.		ged.
OGD	unged.	unged.				unged.	
Fassade	unged.	unged.	unged.	ged.	ged.	unged.	ged.
Kellerdecke	unged.	unged.	unged.	ged.	ged.	unged.	ged.
Fenster	2-S	2-S	2-S	2-S	2-S	2-S	2-S
Primärenergiebedarf [kWh/m ² GNF a]	290	260	262	153	155	169	99
Endenergiebedarf [kWh/m ² GNF a]	263	236	238	139	141	154	90

Die ökologische Bewertung erfolgte zunächst für Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle und am Heizungssystem. Nachfolgend wurden verschiedene Maßnahmenkombinationen bzw. -pakete bewertet. Dabei wurden bei den Dämmmaßnahmen unterschiedliche Materialien sowie auf dem Markt übliche Dämmstärken betrachtet. Folgende Einzelmaßnahmen wurden im Zuge der ökologischen Bewertung berücksichtigt:

Maßnahmen an der Gebäudehülle

- + AW 1: Dämmung der Außenwand mit mineralischem Dämmputz (5 cm)
- + AW 2: Dämmung der Außenwand mit EPS, Mineralwolle, Holzfaser (je nach Material 6 bis 23 cm)
- + IW: Innendämmung mit Holz-, Hanf- und Zellulosefasern, Kalziumsilikathydrat, EPS, PUR-Hartschaum und Mineralwolle (5 cm)
- + OGD: Dämmung der obersten Geschossdecke mit EPS, PUR, Mineralwolle, Holz, Hanf, Zellulose (je nach Material 9 bis 27 cm)
- + D: Kombination Zwischen- und Untersparrendämmung mit EPS, PUR, Mineralwolle, Holz, Hanf (16 cm Zwischensparrendämmung plus 0 bis 12 cm Untersparrendämmung)
- + KD 1: Dämmung der Kellerdecke von unten: EPS, PUR, Mineralwolle, Holz, Hanf (4 bis 10 cm)
- + KD 2: Dämmung der Kellerdecke von oben: EPS, Mineralwolle, PUR, Holzfaser (2 cm)
- + Einbau neuer Fenster (Zweischeiben- und Dreischeibenverglasung, Holz sowie Kunststoff) (2-S, 3-S))

Maßnahmen am Heizungssystem

- + Einbau eines Gas-Brennwertkessels (Gas-BW)
- + Einbau eines Öl-Brennwertkessels (Öl-BW)
- + Einbau eines Pelletkessels (P)
- + Einbau einer Hackschnitzelheizung (HS)
- + Einbau einer Solarthermieanlage (Flachkollektor zur Trinkwasserunterstützung)
- + Einbau einer Solarthermieanlage (Vakuümrohrenkollektor zur Heizungsunterstützung)
- + Einbau einer Luft-Wärmepumpe (EWL), Strommix Deutschland sowie teils mit Strom aus einer Photovoltaikanlage (PV)
- + Einbau einer Erd-Wärmepumpe (Kollektor (EWK), Sonde (EWS), Strommix Deutschland sowie teils mit Strom aus einer Photovoltaikanlage (PV)
- + Einbau einer gasbetriebenen Wärmepumpe (GWL)

Bei der ökobilanziellen Bewertung der Maßnahmen an der Gebäudehülle wurde als Bestands-Heizungssystem ein Gas-Niedertemperatur-Kessel unterstellt. Entsprechend wurden die Emissionsdaten aus dem Datensatz „Nutzung - Gas Niedertemperatur < 20 kW“ der ÖkobaDat übernommen. Der CO_{2eq}-Emissionsfaktor

beträgt dem Datensatz zufolge 282 g CO_{2eq}/kWh thermischer Energie. Die Primärenergie- und Endenergiebedarfe der Gebäudeprototypen wurden ebenso wie die Endenergiebedarfsreduktion infolge der Sanierungsmaßnahmen durch den Projektpartner RWTH Aachen basierend auf einer Modellierung berechnet.

Die aus der Ökobaudat verwendeten Datensätze beziehen sich auf das Referenzjahr 2015 und haben laut Angabe in der Datenbank Gültigkeit bis mindestens 2018, teilweise 2020. In Ausnahmefällen wurden – sofern keine aktuellen Datensätze zur Verfügung standen – ältere Datensätze verwendet. Dies ist in der Darstellung der Einzelmaßnahmen angegeben (siehe Kapitel 3). Die Datensätze der Ökobaudat enthalten zum **Umgang mit Unsicherheit** Sicherheitsaufschläge von 10 oder 20 % auf die Ergebnisse. Die Qualität der Daten ist leider schwer abzuschätzen, da die Datensätze keine Sachbilanzdaten enthalten, sondern ausschließlich die bereits zusammengefassten Werte für die Wirkungskategorien bereitstellen. Es daher nicht möglich, den Ursprung der Emissionen zurückzuverfolgen oder Änderungen in den Vorketten vorzunehmen.

Im nachfolgenden Kapitel sind die Maßnahmen an der Gebäudehülle sortiert nach den eingesetzten Materialien und die verschiedenen Heizungssysteme genauer beschrieben. In Kapitel 4 folgt die Ergebnisdarstellung.

3 Darstellung der Einzelmaßnahmen

3.1 Maßnahmen an der Gebäudehülle

Für die energetische Sanierung der Gebäudehülle steht eine Vielzahl an Maßnahmen zur Verfügung. Dies sind zum einen die Dämmung der Außenwand, die Innendämmung, die Dämmung der obersten Geschosse und des Daches. Eine weitere Maßnahme ist der Einbau von neuen Fenstern mit geringeren U-Werten.

Bezüglich der Dämmmaßnahmen können jeweils verschiedene Dämmstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften zum Einsatz kommen. Die am Markt verfügbaren Dämmmaterialien werden teilweise unterteilt in synthetische Dämmstoffe, die aus auf Erdöl-basierendem Kunststoffen hergestellt werden, und Naturdämmstoffe, unter die mineralische Dämmstoffe auf Basis von Gesteinen wie vulkanischen Perliten oder Bims ebenso gefasst werden wie Dämmstoffe auf Basis von nachwachsen Rohstoffen oder tierischen Materialien (DUH 2016). In dieser Arbeit werden Dämmstoffe auf Basis von tierischen Materialien nicht betrachtet, so dass im Folgenden eine Unterscheidung in synthetische, mineralische und NaWaRo-Dämmstoffe erfolgt.

Als Repräsentanten der synthetischen Dämmstoffe werden in dieser Arbeit expandierter Polystyrolschaum (EPS) sowie Polyurethan-Hartschaum (PUR) betrachtet. Als Beispiele für mineralische Dämmstoffe mineralischer Dämmputz, Mineralwolle und Kalziumsilikat-Platten sowie als Beispiele für NaWaRo-Dämmstoffe Holzfasern, Hanffasern und Zellulose. Die in der Bilanzierung verwendeten Datensätze zur Herstellung der Produkte beinhalten die Module A1 bis A3 gemäß EN 15804. Die Systemgrenze der Herstellungsphase bildet das fertige Produkt am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle oder vom Gebäude zum Ort der Entsorgung oder Weiterverwertung sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden. In dieser Arbeit wird vereinfachend ein Standardfall von einer Distanz des Herstellerbetriebs zur Baustelle von 150 km und von der Baustelle bis zum Ort der Entsorgung von 100 km angenommen.

Für die Bilanzierung wurden für die zuvor ermittelten Gebäudeprototypen jeweils die für die Maßnahme relevanten Bauteilflächen festgelegt. Dabei bezieht sich die Dämmung mit Dämmputz auf die Nettofläche der Außenwand (Hülle abzüglich Tür- und Fensterfläche) und die Dämmung an der Außenwand auf die sogenannte kalkulatorische Fläche (Hülle abzüglich Türfläche). Bei den Fensterflächen wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass sich die Gesamt-Fläche anteilig auf 85 % Glas und 15 % Rahmen verteilt. Die sich aus den Grundrissen der Prototypen ergebenden Umrechnungsfaktoren für die jeweiligen Bauteilflächen finden sich in Tab. 3.1. Grundsätzlich wurde im Rahmen der Bilanzierung bei allen Dämmungen von 5 % Verschnitt ausgegangen (vgl. Müller 2010), der ebenfalls dem jeweils unterstellten EoL zugerechnet wurde.

Tab. 3.1: Umrechnungsfaktoren der Bauteilflächen für die Gebäudeprototypen

Quelle: Bereitgestellt durch die RWTH Aachen, GNF = Gebäudenutzfläche, AW = Außenwand, T = Türfläche, F = Fensterfläche, OGD = Oberste Geschossdecke

Bauteil	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7
GNF [m ²]	180	150	150	180	150	500	500
AW-T [m ² /m ² GNF]	1,19	0,52	1,04	1,03	0,30	0,51	0,43
AW-T-F [m ² /m ² GNF]	1,03	0,40	0,88	0,84	0,30	0,51	0,42
Netto-Innen [m ² /m ² GNF]	0,94	0,44	0,69	0,70	0,19	0,42	0,33
F (Glas) [m ² /m ² GNF]	0,13	0,10	0,14	0,16	0,10	0,14	0,18
F (Rahmen) [m ² /m ² GNF]	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03

Bauteil	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7
Dach [m ² /m ² GNF]	0,53	0,53	0,69	0,45	0,46	0,35	0,35
OGD [m ² /m ² GNF]	0,42	0,42	0,42	0,31	0,33	0,28	0,23
Kellerdecke [m ² /m ² GNF]	0,42	0,42	0,42	0,31	0,33	0,28	0,23
Fußboden [m ² /m ² GNF]	0,42	0,42	0,42	0,31	0,33	0,28	0,23

Im Folgenden sind die Dämmmaterialien anhand ihrer Eigenschaften, Einsatzbereiche, dem Herstellungsverfahren und unterstellen EoL-Szenario, sowie ökologischer und gesundheitlicher Aspekte charakterisiert.

Dämmung mit expandiertem Polystyrolschaum (EPS)

Eigenschaften und Einsatzbereich: Expandierter Polystyrolschaum (EPS), auch bekannt unter Styropor-Dämmung, zählt zu den synthetischen organischen Dämmstoffen. EPS ist feuchtigkeitsbeständig (die Wasseraufnahme beträgt < 5 Vol-%), nicht kompostierbar, nicht UV-beständig und wenig elastisch. EPS gilt als schwer entflammbar. EPS-Dämmplatten sind vielseitig einsetzbar und werden für die Dämmung von Decken, Dächern und für die Fassadendämmung verwendet². EPS-Hartschaum hat eine geschlossenzellige, mit Luft gefüllte Struktur, die Platten bestehen zu etwa 98 % aus Luft. Die Wärmeleitfähigkeit liegt typischerweise zwischen 0,035 und 0,040 W/(m K)³, im Rahmen der Bilanzierung wurde von einem Wert von 0,035 W/(m K) ausgegangen. In der Datenbank Ökobaodat existieren verschiedene Datensätze für die Decken/Böden- und für Außenwand/Dach-Dämmung, wobei sich die Materialien in der Rohdichte unterscheiden. Es wurden daher die zwei Datensätze „EPS-Hartschaum für Wände und Dächer W/D-035“ und „EPS-Hartschaum für Decken/Böden und als Perimeterdämmung B/P-035“ – jeweils weiß – für die vorliegende Bilanzierung verwendet. Neben EPS existiert extrudiertes Polystyrol, XPS, welches ähnliche Eigenschaften wie EPS aufweist, jedoch besonders geeignet ist für Anwendungen mit hoher Druck- oder Feuchtigkeitsbelastung (z. B. Balkone, Flachdächer, Kelleraußenwände) (ASEW 2008). XPS wird in dieser Studie nicht weiter berücksichtigt.

Herstellung: Als Rohstoff für EPS wird ein aus Erdöl hergestellter Kunststoff (Polystyrol) eingesetzt, darüber hinaus kommen Pentan als Treibmittel sowie Zusatzstoffe zum Flammenschutz zum Einsatz. Ein in der Vergangenheit häufig verwendetes Flammenschutzmittel ist Hexabromcyclododecan (HBCD), welches inzwischen aus Umweltschutzgründen weitgehend durch das alternative Flammenschutzmittel Polymer-FR (flame-retardant) ersetzt wurde. In dieser Studie wurden EPS-Hartschaum-Platten mit Polymer-FR bilanziert. EPS wird durch Polymerisation und anschließende Expansion hergestellt. Das aus der Polymerisation resultierende Granulat wird mittels Wasserdampf auf das 20 bis 50-fache seines ursprünglichen Volumens aufgebläht und nach Abkühlung ebenfalls durch Behandlung mit Wasserdampf aufgeschäumt. Die Perlen verschweißen zu einem homogenen Material. Graues EPS als alternative zu weißem EPS enthält zusätzlich Graphitpartikel, welche durch Reflexion und Absorption der Strahlung die Wärmeleitfähigkeit reduzieren (FIW München 2013).

EoL: Beim Rückbau von EPS-Dämmungen fällt ein Verbundabfall aus EPS und Mörtel an, der meist einen EPS-Anteil von maximal 60 % aufweist und bislang meist keiner Verwertung zugeführt wird (Mäurer und Schlummer 2014). Bei sorgfältiger Trennung kann der EPS-Anteil entweder thermisch verwertet oder perspektivisch auch recycelt werden. „Altes“ EPS, welches HBCD als Flammenschutzmittel enthält, darf aufgrund von ökologischen Risiken nicht recycelt werden. Um Umweltrisiken zu minimieren, empfiehlt das Umweltbundesamt, Verschnitt und Abfall HBCD-haltiger Dämmstoffe so vollständig wie möglich einzusammeln und thermisch zu entsorgen, da das HBCD bei der Verbrennung vollständig zerstört und das enthaltene Brom als Salz in der

² <http://www.daemmen-und-sanieren.de/daemmung/daemmstoffe/eps-daemmung>

³ <http://www.waermedaemmstoffe.com/>

Abgasreinigung aufgefangen wird (UBA 2016). Aus der Perspektive des Ressourcenschutzes ist eine thermische Verwertung allerdings nicht optimal, da die polymeren Ressourcen und die aufgewendete Produktions- und Veredelungsenergie verloren gehen (Mäurer und Schlummer 2014). Für HBCD-freie EPS-Dämmstoffe gilt: Aktuell fällt nur ein sehr geringer Anteil der „neuen“ EPS-Dämmstoff-Menge als Abfall an. Dieser reicht nicht aus, um Recyclingverfahren im Industriemaßstab zu betreiben oder zu etablieren. Ausgehend von einer Lebensdauer von etwa 30 Jahren ist zu erwarten, dass die Menge zukünftig zunehmen und Recyclingverfahren perspektivisch an Relevanz gewinnen werden (Mäurer und Schlummer 2014). Zu beachten ist dabei, dass EPS aufgrund der geringen Dichte ein sehr hohes Volumen aufweist, so dass ein Transport des Abfalls über größere Strecken zu vermeiden ist. Derzeit laufen verschiedene Forschungsvorhaben zur Abtrennung der neuen Flammschutzmittel, so dass sowohl das Flammschutzmittel als auch der Kunststoffanteil recycelt werden können. Darüber hinaus gibt es Bestrebungen, mobile Lösungsmitteltanks zur EPS-Erfassung einzusetzen, um Verkehrsaufkommen und Logistikkosten einzusparen. Derzeit ist jedoch noch davon auszugehen, dass der Verbundabfall inklusive des EPS-Anteils entweder deponiert oder – auch in naher Zukunft - der EPS-Anteil einer thermischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen zugeführt wird. In dieser Studie wird der Empfehlung des Umweltbundesamts folgend von einer thermischen Verwertung des EPS ausgegangen. Für die Bilanzierung erfolgt entsprechend eine Verknüpfung mit dem Prozess-Datensatz „Verbrennung Polystyrol in MVA incl. Gutschrift“. Die Gutschrift wurde mit dem deutschen Strommix und Wärme aus Erdgas berechnet⁴.

Ökologische Aspekte: Die zur Herstellung von EPS eingesetzten Rohstoffe basieren auf der nicht erneuerbaren Ressource Erdöl und der Energieaufwand bei der Herstellung ist relativ hoch (Drewer et al. 2013). Das in der Vergangenheit eingesetzte Flammschutzmittel HBCD ist ein Umweltgift, welches toxisch für Gewässerorganismen und bioakkumulierend ist, das heißt es reichert sich in Organismen an. Der Stoff gilt zudem als möglicherweise fortpflanzungsschädlich, ist langlebig und breitet sich über weite Entfernungen aus. Im Jahr 2013 wurde HBCD unter der internationalen Stockholm-Konvention als persistenter, schwer abbaubarer, organischer Schadstoff identifiziert, was bedeutet, dass es zu einem weltweiten Handels- und Verwendungsverbot kommen wird (UBA 2016). In der unmittelbaren Umgebung der Dämmprodukte sind kaum akute Umweltwirkungen zu erwarten, da auch bei ungeschützt außen angebrachten Dämmstoffen nur sehr geringe Konzentrationen des wenig wasserlöslichen HBCD ausgewaschen werden (UBA 2016). In neuem EPS wird anstelle von HBCD ein alternatives Flammschutzmittel, Polymer-FR, eingesetzt, für welches die aufgeführten negativen Umweltwirkungen nach jetzigem Kenntnisstand nicht gelten. Dennoch errechnet Hochrein (2013 zitiert in Bürger et al. 2016) auch für HBCD-freies EPS ein im Vergleich zu anderen Dämmmaterialien hohes Gefahrstoffpotenzial. Bei der Herstellung von EPS wird Pentan als Treibmittel eingesetzt, welches als giftig für Wasserorganismen und wassergefährdend eingestuft ist (Drewer et al. 2013). Pentan zählt zudem zu den flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, volatile organic compounds), die gemeinsam mit den Stickoxiden wichtige Vorläufersubstanzen für die Bildung von Photooxidantien (Ozon/Sommersmog) sind (Brown und Holme 2015). In gebundener Form gilt Pentan als unbedenklich, die Wirkung tritt entsprechend vornehmlich im Produktionsprozess auf. Alle auf Erdöl basierenden Dämmstoffe weisen trotz der zugesetzten Flammschutzmittel eine Brennbarkeit auf, so dass im Fall eines Brandes auch die eingesetzten Dämmstoffe mit verbrennen können. Im Brandfall können Stoffe mit negativen ökologischen Wirkungen freigesetzt werden.

Gesundheitliche Aspekte: Das ehemals als Flammschutzmittel eingesetzte HBCD kann negative gesundheitsschädliche Effekte hervorrufen. Tierversuche haben gezeigt, dass der Stoff die Embryonal- und Säuglingsentwicklung negativ beeinflussen kann. HBCD ist jedoch nicht als akut toxisch für den Menschen eingestuft, das heißt für Bewohner/innen von mit HBCD-haltigen Dämmplatten sanierten Gebäuden besteht nach jetzigem Kenntnisstand keine Gesundheitsgefährdung (UBA 2016). Für das inzwischen eingesetzte Flammschutzmittel Polymer-FR gelten die genannten negativen gesundheitlichen Aspekte nach jetzigem Kenntnisstand nicht. Im Brandfall können Stoffe mit negativen gesundheitlichen Wirkungen freigesetzt werden. Pentan gilt ebenfalls als gesundheitsschädlich, verbleibt in der Nutzungsphase der Dämmplatten jedoch im Material, entsprechend

⁴ <http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uid=56d90d2e-11c8-4b49-bc6c-c61f682d0be1&lang=de>

beschränken sich die negativen Wirkungen auf den Herstellungsprozess (Drewer et al. 2013). Eine Arbeit von Hochrein (2013 zitiert in Bürger et al. 2016) errechnet das Gefahrenstoffpotenzial in Monoethylenglykol-Äquivalente als Wirkungskategorie zur Bewertung der Toxizität basierend auf einer Methode des Öko-Instituts. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass EPS von allen untersuchten Dämmmaterialien das höchste Gefahrenstoffpotenzial aufweist, wenn der Einsatz von HBCD berücksichtigt wird. Ohne HBCD belegt EPS dieser Studie zufolge nach PF-Hartschaum (Phenolharz-Hartschaum) den zweitschlechtesten Rang.

Dämmung mit Polyurethan-Hartschaum (PUR)

Eigenschaften und Einsatzbereich: Polyurethan-Hartschaum (PUR)-Platten zählen wie EPS zu den synthetischen Dämmstoffen. Die Dämmplatten sind alterungsbeständig, hoch druckbelastbar, schimmel- und fäulnisresistent und nicht kompostierbar. Sie wirken zudem schalldämmend. PUR ist durch den Zusatz von Flammenschutzmitteln als schwer entflammbar eingestuft. Die maximale Feuchteaufnahme von PUR-Hartschaum bei Diffusion und Kondensation beträgt etwa 6 Vol-%. Die Wärmeleitfähigkeit liegt typischerweise bei nur $0,025 \text{ W}/(\text{m K})^5$. In der Ökobaudat existieren verschiedene Datensätze für PUR-Dämmplatten. Für die Bilanzierung wurde der Datensatz „PURDämmplatten mit Mineralvlies-Deckschicht“ (beidseitig mineralvlieskaschierte PUR-Dämmplatten) verwendet. Der Datensatz bezieht sich auf einen Quadratmeter installierte PU-Dämmplatte. Die Ergebnisse der Wirkungskategorien auf die Bezugsgröße Kilogramm erfolgte mit dem im Datensatz angegebenen Umrechnungsfaktor von $0,231 \text{ m}^2/\text{kg}^6$. PUR-Dämmplatten werden vielseitig zur Dämmung von Decken und Dächern, Außenwänden und zur Perimeterdämmung eingesetzt (Drewer et al. 2013).

Herstellung: Der in der Ökobaudat aufgeführte Datensatz umfasst die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung (A1-A3). Als Rohstoffe für PUR werden aus Erdöl hergestellte Polyole und Polyisocyanate eingesetzt, darüber hinaus kommen Pentan als Treibmittel sowie Zusatzstoffe zum Flammenschutz zum Einsatz (vor allem halogenierte Phosphorsäureester TCEP (Tris(2-Chloroethyl)phosphat) oder TCPP (Tris(chloroisopropyl)phosphat)). Prinzipiell können die Polyole auch auf der Basis von Pflanzenölen hergestellt werden. Polyurethan-Hartschaum (PU) entsteht durch eine chemische Reaktion von Methylendiphenylisocyanat (55-65 %) und Polyol (20-30 %) unter Zusatz von niedrig siedenden Treibmitteln (ca. 4-6 %, z. B. Pentan). Hinzu kommen als Hilfsstoffe Wasser (0,2-0,4 %), Schaumstabilisatoren und Katalysatoren (ca. 2-3 %) sowie Flammenschutzmittel (ca. 3-5 %). Die Mineralvliesdeckschichten bestehen hauptsächlich aus Kalziumkarbonat, Glasfaservlies und Kleber auf Basis von Urea-Formaldehyd sowie Styrol-Butadien-Kautschuk⁷.

EoL: Polyurethan-Dämmstoffe werden in der Regel mechanisch befestigt oder lose verlegt. Rückbau und sortenreine Erfassung der Abfälle sind daher theoretisch gut möglich. Saubere und unbeschädigte Polyurethan-Dämmplatten können wieder- bzw. weiterverwendet, werkstofflich oder rohstofflich (Glykolyse) wiederverwertet werden. Bei der Glykolyse werden Polyurethan-Hartschaum-Abfälle bei ca. 200 °C in ein flüssiges Reagenat, das Glykolysepolyol, umgewandelt. Glykolysepolyol kann wiederum als Rohstoff für die Polyurethan-Herstellung verwendet werden. Die werkstoffliche Verwertung beinhaltet die Herstellung von Klebpressplatten aus Polyurethan-Hartschaumabfällen – primär aus Zuschnittresten und Baustellenabfällen. Solche Klebpressplatten werden unter anderem für die Dämmung von Fensterrahmen und für die Wärmebrückendämmung eingesetzt. Die Wieder- oder Weiterverwendung bereits eingebauter PU-Dämmstoffplatten nach der Nutzungsdauer ist derzeit noch nicht üblich. Laut der Abfallablagereverordnung und der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (AVV) dürfen Polyurethan-Dämmstoffe (Abfallschlüsselnummer 170604 für Abfälle von der Baustelle) nicht unvorbehandelt abgelagert werden. Sie werden daher in der Regel ge-

⁵ <http://www.waermedaemmstoffe.com/>

⁶ <http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=03998c02-90d1-41cd-9c68-83ffec88d125&lang=de>

⁷ <http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=03998c02-90d1-41cd-9c68-83ffec88d125&lang=de>

schreddert und thermisch behandelt. Der Energiegehalt des Dämmstoffs kann dabei thermisch und zur Stromerzeugung genutzt werden. Der Datensatz „PUR-Dämmplatten mit Mineralvlies-Deckschicht“ geht von einer thermischen Verwertung aus und enthält eine entsprechende Gutschrift.

Ökologische Aspekte: Die zur Herstellung von PUR eingesetzten Rohstoffe basieren auf der nicht erneuerbaren Ressource Erdöl und der Energieaufwand bei der Herstellung ist relativ hoch (Drewer et al. 2013). Bei der Herstellung von PUR wird Pentan als Treibmittel eingesetzt, welches als giftig für Wasserorganismen und als wassergefährdend eingestuft ist und außerdem zur Bildung von Photooxidantien (Ozon/Sommersmog) führt. In gebundener Form gilt es als unbedenklich. Das Flammschutzmittel TCEP ist als umweltgefährlich und giftig für Wasserorganismen eingestuft, das Flammschutzmittel TCPP als wassergefährdend. Alle auf Erdöl basierenden Dämmstoffe weisen trotz der zugesetzten Flammschutzmittel eine Brennbarkeit auf. In der Vergangenheit wurden mehrere Brände in Verbindung mit Wärmeverbundsystemen erfasst (Feuerwehr Frankfurt a. M. 2015). Im Brandfall können Stoffe mit negativen ökologischen Wirkungen freigesetzt werden.

Gesundheitliche Aspekte: Die in der Herstellung eingesetzten Isocyanate sind als gesundheitsschädlich eingestuft, gelten in der mit Polyurethan polymerisierten Form jedoch als unbedenklich. Das Treibmittel Pentan gilt ebenfalls als gesundheitsschädlich, verbleibt im Falle der Unversehrtheit aufgrund der Geschlossenheit jedoch im Material, entsprechend beschränken sich die negativen Wirkungen auf den Herstellungsprozess. TCEP ist als gesundheitsschädlich und als vermutlich krebserregend eingestuft, gilt in gebundener Form jedoch als unbedenklich (Drewer et al. 2013). Im Brandfall entstehen toxische Stoffe.

Dämmung mit mineralischem Dämmputz

Eigenschaften und Einsatzbereich: Mineralische Dämmputze werden als Unter- bzw. Oberputz auf Wänden, Decken und Trennwänden eingesetzt und können die Grundlage für einen Anstrich bilden (IBU 2012a). Eingesetzt werden Materialien mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit. Zudem wird der Putz dicker aufgebracht (wenige Zentimeter) als gewöhnlicher Putz, damit er eine Dämmwirkung entfalten kann. Die Dämmwirkung ist erheblich geringer als die von Dämmplatten, da die Wärmeleitfähigkeit mit $< 0,2 \text{ W/(mK)}$ höher und die erzielbare Dicke geringer ist. Allerdings können Dämmputze eine Alternative in solchen Fällen bieten, in denen Wärmeverbundsysteme ausgeschlossen sind⁸.

Herstellung: Die Datenbank Ökobaudat enthält keinen Datensatz zu mineralischem Dämmputz. Daher wurde ein EPD der Firma quick-mix Gruppe GmbH & Co KG, erstellt durch das Institut Bauen und Umwelt e.V. im Jahr 2012, mit der Nummer EPD-QMX-2009231-D, für diese Arbeit übernommen und mit einem Sicherheitszuschlag von 20 % versehen. Im Rahmen des Herstellungsprozesses werden die Grundstoffe Sand, Bindemittel, Leichtzuschläge und Zusatzmittel und -stoffe gravimetrisch dosiert und miteinander gemischt. Das Gemisch wird abgepackt und als Werk trockenmörtel ausgeliefert. Der Datensatz umfasst ausschließlich die Aufwendungen bis zum Werkort (cradle to grade) (IBU 2012a).

EoL: Mineralischer Dämmputz kann nach Ablauf der Nutzung aber vor Ablauf der Lebensdauer weiterverwendet werden, also zum Beispiel als Putzgrund für das Aufbringen eines neuen Putzes oder einer Wärmedämmung dienen. Nach Ablauf der Lebensdauer kann mineralischer Dämmputz bei sortenreinem Rückbau einem Baustoffrecycling zugeführt werden. Üblicherweise erfolgt eine Weiterverwertung in Form rezyklierter Gesteinskörnungen im Hoch- und Tiefbau. Ebenso kann eine Deponierung erfolgen. Laut dem Monitoring-Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012 werden 93 % der Baustellenabfälle (u.a. mineralische Dämmstoffe) in Deutschland einer sonstigen Verwertung zugeführt. Nur knapp 5 % werden deponiert (BBS 2015). Der letztgenannte Anteil wurde in der folgenden Arbeit übernommen, sprich für das gesamte Material wird eine Bauschutttaufbereitung und für 5 % eine Bauschuttdeponierung angenommen. Eine Gutschrift für den Teil des Bauschutt, der einer sonstigen Verwertung zugeführt wird, erfolgte nicht, da entsprechende Daten nicht vorlagen. Der Datensatz Bauschuttdeponierung umfasst die Ablagerung von 1 kg

⁸ <https://www.energie-lexikon.info/waermedaemmputz.html>

Bauschutt auf einer dafür vorgesehenen Deponie sowie den anteiligen Betrieb und die entsprechenden Auswirkungen der Deponie über einen Zeitraum von 100 Jahren.

Nennenswerte *ökologische oder gesundheitliche Aspekte*, die in Verbindung mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Dämmputz stehen, wurden im Rahmen der Recherche nicht identifiziert.

Dämmung mit Mineralwolle

Eigenschaften und Einsatzbereich: Unter Mineralwolle werden anorganische Faserdämmstoffe aus Steinwolle- und Glaswolle erfasst. Mineralfaserdämmstoffe zählen zu den am weitesten verbreiteten Dämmstoffen, die vor allem zur Dämmung von Außenwänden geeignet sind (Drewer et al. 2013), aber auch häufig zur Dämmung der obersten Geschossdecke sowie des Daches eingesetzt werden. Glaswolle hat bei gleicher Rohdichte tendenziell eine etwas niedrigere Wärmeleitfähigkeitsgruppe (WLG) als Steinwolle (FIW München 2013). Die Wärmeleitfähigkeit von Mineralfaserdämmstoffen liegt typischerweise zwischen 0,035 und 0,045 W/(m K), im Rahmen der Bilanzierung wurde von einem durchschnittlichen Wert von 0,035 W/(m K) ausgegangen. Stein- und Glaswolle gelten als leicht zu verarbeiten, nicht brennbar, als resistent gegen Schimmel, Fäulnis und Ungeziefer, können keine Feuchtigkeit aufnehmen und weisen eine geringe Wärmespeicherfähigkeit auf⁹.

Herstellung: Steinwolle wird aus Sedimentgestein oder magmatischem Gestein (z. B. Dolomit, Diabas, Sand, Bauxit) und verschiedenen Sekundärrohstoffen hergestellt (FIW München 2013). Das Ausgangsmaterial wird bei Temperaturen zwischen 1.400 und 1.500 °C geschmolzen und anschließend über schnell rotierende Walzen geführt. Nachfolgend wird ein Bindemittel hinzugefügt, die Masse zu Fasern versponnen und imprägniert sowie das Bindemittel gehärtet. Für die Glaswolle-Herstellung werden Glasscherben, Sand, Soda und Borax verwendet (FIW München 2013), unter Stromzufuhr bei etwa 1.400 °C geschmolzen und anschließend in einer Rotationstrommel geschleudert. Nach Verfestigung der Fasern werden diese über Laufbänder durch einen Tunnelofen geführt, wo das Bindemittel bei etwa 200 °C härtet. Für verschiedene Anwendungen bzw. Bauteile existieren typische Zusammensetzungen und Rohdichten. Demnach existieren unterschiedliche Datensätze für Mineralwolle je nach Anwendungsbereichen Dämmung an Fassade, Boden, Schrägdach und Innenausbau¹⁰, die für die entsprechenden Bauteile berücksichtigt wurden. Die Datensätze sind mit einem Sicherheitszuschlag von 10 % auf die Ergebnisse versehen. Die genaue Zusammensetzung der Mineralwollen (Anteil Stein- und Glaswolle) ist in der Beschreibung der Datensätze nicht dokumentiert.

EoL: Für den speziellen Entsorgungsprozess von Mineralwolle liegt in der Ökobaudat kein separater Datensatz vor. Mineralwolle-Dämmstoffe können wie normaler Bauschutt entsorgt und ein Teil des Schutts kann in der Ziegelherstellung verwendet werden (Müller 2010; IBU 2012b; Drewer et al. 2013). Ebenso wie bei der Entsorgung von mineralischem Dämmputz wird davon ausgegangen, dass 5 % als Bauschutt deponiert werden und 95 % einer sonstigen Verwertung zugeführt werden (ebenfalls ohne Berücksichtigung einer Gutschrift). Für die Deponierung wird wiederum der Prozess „Bauschuttdeponierung“ gewählt. Diese Annahme gilt ausschließlich für sogenannte „neue“ Mineralwolle-Dämmstoffe (eine Erläuterung findet sich unter dem Punkt *gesundheitliche Aspekte*). Alte Mineralwolle-Dämmstoffe gelten als gefährliche Abfälle und müssen entsprechend entsorgt werden (DGUV 2009), eine Wieder- oder Weiterverwendung ist hier nicht möglich¹¹.

Ökologische Aspekte: Es werden nicht erneuerbare, abiotische Ressourcen für die Herstellung von Mineralwolle eingesetzt. Die Wege, die für den Transport einiger eingesetzter Rohstoffe zurückgelegt werden, sind verhältnismäßig lang (insbesondere Nephelin und Bauxit). Bauxit beispielsweise wird aus Australien, Guinea,

⁹ <http://www.waermedaemmstoffe.com/htm/mineralwolle.htm>

¹⁰ Siehe Dokumentation des Datensatzes unter <http://oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html>.

¹¹ <http://www.ral-mineralwolle.de/ral-guetezeichen-4.html>

Spanien und Frankreich importiert (Drewer et al. 2013). Allerdings kommt vor allem bei Glaswolle-Dämmplatten als Rohstoff auch bis zu 80 % Altglas zum Einsatz¹², so dass es sich teilweise um Recyclingprodukte handelt. In diesem Fall ist von kurzen Transportwegen auszugehen. Der Energieaufwand bei der Herstellung ist außerdem ebenfalls relativ hoch (Drewer et al. 2013).

Gesundheitliche Aspekte: Bei der Bewertung von Mineralwolle-Dämmstoffen sind „alte“ und „neue“ Mineralwolle-Dämmstoffe zu unterscheiden (DGUV 2009). Seit dem Jahr 2000 gilt in Deutschland ein Verbot des Herstellens, Inverkehrbringens und Verwendens von Mineralwolle-Dämmstoffen, die nicht die Freizeichnungskriterien des Anhangs IV Nr. 22 der Gefahrstoffverordnung erfüllen. Bei zuvor eingebauten „alten“ Dämmstoffen muss davon ausgegangen werden, dass sie diese Kriterien nicht erfüllen. Entsprechend gelten die aus „alter“ Mineralwolle freigesetzten Stäube als krebserzeugend. Dies gilt für die „neuen“ Mineralwolle-Dämmstoffe nicht. Die Fasern der neuen Dämmstoffe, die eine Halbwertszeit von weniger als 40 Tagen aufweisen, gelten als gesundheitlich unbedenklich (DGUV 2009). Einige Produkte auf dem Markt enthalten Formaldehyd, das als vermutlich kanzerogen, im ausgehärteten Zustand jedoch als unbedenklich gilt. Auf dem Markt sind inzwischen auch Produkte ohne Formaldehyd erhältlich (Drewer et al. 2013). Bei der Verarbeitung von Mineralwolle-Dämmstoffen ist zu beachten dass durch die Fasern mechanische Hautreizungen auftreten können, die mit einem Juckreiz einhergehen. Die Staubfreisetzung bei der Verarbeitung und beim Abriss kann zu vorübergehende Reizungen der Augen, der Atemwege und der Nasenschleimhaut führen (DGUV 2009). In der Nutzungsphase treten diese Gefährdungen nicht auf. Grundsätzlich empfiehlt die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) die Verwendung von "Erzeugnissen aus Mineralwolle", die mit dem RAL Gütezeichen ausgewiesen sind (DGUV 2009).

Dämmung mit Kalziumsilikat-Platten

Eigenschaften und Einsatzbereich: Kalziumsilikat-Platten zählen zu den mineralischen Dämmstoffen. Sie werden vor allem aus Sand, Brandkalk, Flugasche und in geringen Mengen aus Zellstoff hergestellt. Die Dämmplatten sind druckfest, nicht brennbar, formstabil, schallhemmend und aufgrund des hohen pH-Wertes schimmelresistent. Die kapillare Leitfähigkeit der Platten ermöglicht den Feuchtigkeitstransport, das heißt das Material kann Feuchtigkeit speichern und wieder abgeben. Die Wärmeleitfähigkeit liegt typischerweise zwischen 0,050 und 0,065 W/(m K)¹³, in der Bilanzierung wurde von einer WLG von 0,055 W/(m K) ausgegangen. Die Platten werden vornehmlich für die Innen-Dämmung eingesetzt (Drewer et al. 2013).

Herstellung: Kalziumsilikat-Platten bestehen aus Kalziumsilikathydraten und einem geringen Anteil an Zellstoff (< 0,6 Vol -%). Sie werden mittels Postautoklavierung produziert. Die Ausgangsstoffe werden mit Wasser gemischt und in Reaktoren zu einer gelartigen Suspension verarbeitet, anschließend entwässert und zu einzelnen Platten geformt. In einem Autoklaven bei Drücken von 10 bis 20 bar und Temperaturen von 150 bis 200 °C verfestigt die Kristallbildung die Rohstoffe zu Kalziumsilikathydraten. Zuletzt werden die Platten getrocknet, geschliffen und zugesägt. In der aktuellen Version der Ökobaudat ist unter Kalziumsilikat-Platten ausschließlich Porenbeton aufgeführt, der die Lebenszyklusstadien der Herstellung der Vorprodukte bis hin zur Rohstoffgewinnung und Verarbeitungsprozesse (cradle to gate) enthält und hier als Annäherung verwendet wurde.

EoL: Kalziumsilikat-Platten können bei sortenreinem Rückbau entsprechend ihrer ursprünglichen Nutzung wiederverwendet oder in zermahlenem Zustand als Abfallkalk in der Landwirtschaft oder als Füllstoff eingesetzt werden. Sofern dies nicht möglich ist, kann das Material als Bauschutt deponiert werden (Drewer et al. 2013). In dieser Arbeit wird als konservative Annahme und aufgrund mangelnder Informationen zum Anteil der Wieder- und Weiterverwertung von einer Bauschuttdeponierung ausgegangen.

¹² <http://www.baustoffwissen.de/wissen-baustoffe/baustoffknowhow/haus-garten-wegebau/daemmung/unterschied-glaswolle-steinwolle/>

¹³ <http://www.waermedaemmstoffe.com/>

Ökologische Aspekte: Die in der Herstellung eingesetzten Rohstoffe sind in großer Menge verfügbar und die Transportwege kurz. Ökotoxikologische Stoffe kommen nicht zum Einsatz. Aufgrund der fehlenden Brennbarkeit entstehen auch im Brandfall keine zusätzlichen umweltrelevanten Emissionen. Der Energieaufwand bei der Herstellung ist jedoch verhältnismäßig hoch (Drewer et al. 2013) und die relativ hohe WLG begrenzt die Einsatzfähigkeit dieses Dämmmaterials, da die erforderlichen Dämmdicken zu hoch würden.

Gesundheitliche Aspekte: In Zusammenhang mit Kalziumsilikat-Platten sind keine gesundheitlichen Bedenken bekannt (Drewer et al. 2013).

Dämmung mit Holzfasern

Eigenschaften und Einsatzbereich: Holzweichfaserplatten zählen ebenfalls zu den Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen. Als Rohstoffe kommt meist Nadelrestholz (Schwachholz aus Durchforstungen) zum Einsatz. Es existieren zudem Holzfaserdämmstoffe aus Hobelresten und Spänen (FNR 2012a). Die Wärmeleitfähigkeit liegt typischerweise zwischen 0,040 und 0,055 W/(m K)¹⁴, in der Bilanzierung wurde eine WLG von 0,04 W/(m K) angenommen. Holzweichfaserplatten weisen gute Schalldämmeigenschaften auf, sind druckbelastbar, feuchteregulierend und normal entflammbar. Zudem weisen sie eine sehr gute Wärmespeicherfähigkeit auf. Diese Eigenschaft ist insbesondere im Dachbereich günstig, da der Temperaturverlauf im Tag- und Nachtrhythmus möglichst stark gedämpft werden soll (DUH 2016). Somit trägt eine Dämmung mit Holzfasern zum sommerlichen Wärmeschutz bei. Holzfaserdämmplatten sind vielfältig einsetzbar und werden in der Innen- und Außendämmung von Wänden, Fußböden und Decken sowie in Wärmedämmverbundsystemen verwendet. Holzfasern werden zudem für die Hohlraumdämmung und zur Dämmung oberster Geschossdecken eingesetzt (Drewer et al. 2013).

Herstellung: Der Datensatz zur Herstellung der Holzfaserdämmplatten (Rohdichte: 160 kg/m³) aus der Ökobaudat bezieht sich auf das Nassherstellungsverfahren. Der Datensatz ist mit einem Sicherheitszuschlag von 20 % auf die Ergebnisse versehen. Bei dem Datensatz ist zu beachten, dass er die Aufnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre während der Biomasseproduktion beinhaltet. Da die aufgenommene Menge CO₂ höher ist als die in der Herstellung freigesetzte, ist das GWP von Holzfaserdämmplatten (Modul A) negativ. Zum Schutz vor Schimmel und zur Verbesserung des Brandschutzes werden in der Herstellung teilweise Flammschutzmittel, z. B. Borsalze, eingesetzt (Drewer et al. 2013).

EoL: An ihrem Lebensende können Holzfaserdämmplatten theoretisch wiederverwendet oder stofflich verwertet werden, in Abwesenheit von Borsalzen kompostiert oder thermisch verwertet werden. Aufgrund fehlender Sammellogistik findet eine stoffliche Verwertung derzeit kaum statt. Daher wird in dieser Arbeit eine thermische Verwertung unterstellt. Durch die Verknüpfung mit dem EoL-Datensatz „Verbrennung von Holzwerkstoffen in Müllverbrennungsanlagen“ nimmt das GWP einen in der Summe positiven Wert an. Dabei ist eine Gutschrift für die produzierte Energie in der Müllverbrennungsanlage (deutscher Strommix, Wärme aus Erdgas) berücksichtigt. Der Heizwert von Holzfasern liegt Beilicke (2010) zufolge zwischen 17 und 21 MJ/kg, Schmiedel (2013) zufolge bei 18 MJ/kg. Bei der Erstellung des Datensatzes „EoL Holzwerkstoffe in MVA“ wurde von einem Heizwert von 14,6 MJ/kg ausgegangen¹⁵. Um den Unterschied in den Heizwerten zu berücksichtigen, wurde zur Berechnung der Gutschrift ein Korrekturfaktor von 1,23 berücksichtigt. Unterschiede in der Zusammensetzung der bei der Verbrennung emittierenden Gase können aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden.

Ökologische Aspekte: Aus Perspektive des Ressourcenschutzes ist positiv hervorzuheben, dass einheimische, nachwachsende Rohstoffe zum Einsatz kommen, was mit einem geringen Transportaufkommen bzw.

¹⁴ <http://www.waermedaemmstoffe.com/>

¹⁵ Mitteilung per E-Mail von Stephan Rössig, BBSR, am 12.8.2015.

kurzen Transportwegen einhergeht (Drewer et al. 2013). Konkurrenzen mit anderen Nutzungsformen wie beispielsweise der Spanplattenherstellung oder energetischen Nutzung können prinzipiell auftreten. Grundsätzlich ist jedoch eine stoffliche Nutzung der energetischen Nutzung vorzuziehen. Der Energieaufwand bei der Herstellung ist bei Holzweichfaserplatten (Nassverfahren) verhältnismäßig hoch (Drewer et al. 2013). Die teilweise in der Herstellung eingesetzten Borsalze sind schwach wassergefährdend und führen dazu, dass das Produkt nicht kompostierbar ist (es gibt allerdings auch Produkte ohne Borsalze). Im Brandfall entstehen vornehmlich ähnliche Produkte wie bei der Verbrennung von Holz (vor allem CO₂, CO und Wasser), abhängig von den Additiven können weitere Stoffe freigesetzt werden. Sofern Mehrschicht-Platten in Kombination mit PUR-Hartschaum verwendet werden, entstehen im Brandfall toxische Substanzen (Danner 2010).

Gesundheitliche Aspekte: Imprägnierte Platten sind gesundheitlich bedenklich. Borsäure und die Salze der Borsäure, Borate, sind seit Inkrafttreten des Global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS-Verordnung nach 1272/2008/EG) als reproduktionstoxisch eingestuft (VSI 2010). Davon abgesehen gelten Holzweichfaserplatten als gesundheitlich unbedenklich (Drewer et al. 2013).

Dämmung mit Zellulose

Eigenschaften und Einsatzbereich: Dämmstoffe aus Zellulose zählen ebenfalls zu den Dämmmaterialien aus NaWaRo. Es handelt sich in der Regel um ein Recyclingprodukt, zum Einsatz kommen vor allem sortenreines Altpapier aus Tageszeitungen (Drewer et al. 2013). Darüber hinaus werden Borsalze, Magnesiumsulfat oder Ammoniumphosphat als Flammschutzmittel eingesetzt. Zellulosefasern und -flocken wirken schalldämmend, feuchteregulierend und weisen eine hohe Wärmespeicherkapazität auf, d.h. das Material trägt wie Holzfaserdämmplatten zum sommerlichen Wärmeschutz bei. Zellulosefaserplatten sind jedoch nicht druckbelastbar. Das Material ist normal entflammbar, deponiefähig, aber nicht kompostierbar. Die WLG liegt typischerweise bei 0,040 W/(m K), dieser Wert wurde in der Bilanzierung angenommen. Zellulose eignet sich für die Dämmung von Hohlräumen, obersten Geschossdecken, für die Außendämmung des Daches und die Innendämmung (Drewer et al. 2013).

Herstellung: Die Lebenszyklusanalyse umfasst die Lebenswegabschnitte cradle to gate. Der in der Bilanzierung unterstellte Datensatz „Zellulose-Einblas-Dämmstoff“ ist mit einem Sicherheitszuschlag von 20 % auf die Ergebnisse versehen. Hauptrohstoff bei der Herstellung sind Altpapierfasern, was den CO₂-Ressourcenfluss im Input erklärt (CO₂-Einbindung, sprich negativer Wert). Zur Verbesserung des Brandschutzes und als Schutz vor Schimmel werden im Herstellungsprozess ca. 12-20 % Borsalze hinzugegeben¹⁶.

EoL: Dämmstoffe aus Basis von Zellulose können an ihrem Lebensende wieder verwendet werden, sofern das Material nicht verunreinigt ist, deponiert oder thermisch verwertet werden (Drewer et al. 2013). An dieser Stelle wird analog zu den anderen Dämmmaterialien aus NaWaRo eine thermische Verwertung angenommen (Kopplung mit dem Datensatz „Verbrennung von Holzwerkstoffen in MVA“). Der Heizwert von Zellulose liegt Beilicke (2010) zufolge bei etwa 16,2 MJ/kg. Entsprechend der Vorgehensweise bei Holzweichfaserplatten wurde zur Berechnung der Gutschrift ein Korrekturfaktor von 1,11 berücksichtigt.

Ökologische Aspekte: Aus Perspektive des Ressourcenschutzes ist positiv hervorzuheben, dass mit Altpapierfasern vornehmlich Reststoffe eingesetzt werden. Die häufig in der Herstellung eingesetzten Borsalze sind allerdings schwach wassergefährdend und führen dazu, dass das Produkt nicht kompostierbar ist (es gibt auf dem Markt auch Produkte ohne Borsalz). Der Energieaufwand bei der Herstellung ist laut Drewer et al. (2013) vergleichsweise gering. Bei der Herstellung und Verarbeitung kommt es zu einer starken Staubentwicklung.

Gesundheitliche Aspekte: Borsäure und ihre Salze, die Borate, die im Zuge der Herstellung häufig eingesetzt werden, sind seit Inkrafttreten des Global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von

¹⁶ <http://www.waermedaemnstoffe.com/htm/zellulose.htm>

Chemikalien (GHS-Verordnung nach 1272/2008/EG) als reproduktionstoxisch eingestuft (VSI 2010). Der Einsatz von Borsäure führt der Studie von Hochrein (2013 zitiert in Bürger et al. 2016) im Vergleich zu anderen Dämmstoffen zu einem verhältnismäßig hohen Gefahrenstoffpotenzial. Bei der Herstellung und Verarbeitung kommt es zudem zu einer starken Staubentwicklung, so dass bei der Verarbeitung ein Schutz gegen Produktstaub erforderlich ist (Drewer et al. 2013).

Dämmung mit Hanffasern (Hanfvlies)

Eigenschaften und Einsatzbereich: Dämmstoffe aus Hanffasern zählen ebenfalls zu den Dämmmaterialien aus NaWaRo. Als Stützfasern werden teilweise synthetische Fasern, beispielsweise Polyester, eingesetzt (Drewer et al. 2013). Dämmstoffe aus Hanffasern besitzen schalldämmende Eigenschaften, sind robust, feuchtigkeitsbeständig und aufgrund der Inhaltsstoffe der Hanffasern resistent gegen Schädlingsbefall. Auf eine Imprägnierung kann teilweise verzichtet werden. Die Wärmespeicherfähigkeit von Hanf ist nicht so gut wie beispielsweise bei Holzfasern, so dass Hanf nur bedingt für den sommerlichen Wärmeschutz geeignet ist. Die WLG liegt typischerweise zwischen 0,040 und 0,045 W/(m K)¹⁷, in der Bilanzierung wurde ein Wert von 0,040 W/(m K), angenommen. Hanf wird meist zur Hohlräumdämmung, Zwischen-, Voll- und Aufsparrendämmung, zur Dämmung von Zwischenwänden und Außenwänden eingesetzt (Drewer et al. 2013).

Herstellung: Der Datensatz zur Herstellung von Hanfvlies umfasst die Herstellung der Vorprodukte, die landwirtschaftliche Faserhanfproduktion und die Vliesproduktion inklusive Verpackung (cradle to gate). Zunächst werden Faserbündel durch sogenanntes Rösten zu Einzelfasern gelöst, anschließend folgt mittels mechanischen Verfahren der Faseraufschluss. Die Herstellung von mattenförmigen Dämmstoffen erfolgt durch Vliesbildung und mechanische Verfilzung der Fasern. In diesem Schritt werden sogenannte Stützfasern hinzugefügt (FIW München 2013). Angenommen ist im vorliegenden Datensatz eine Zusammensetzung des Vlieses aus 85 % Hanffasern und 15 % Polyesterfasern als Stützfasern. Zum Flammenschutz wird das Vlies mit 4 % Soda überzogen. Bei dem Datensatz ist zu beachten, dass er die Kohlenstoffdioxidaufnahme aus der Atmosphäre während der Biomasseproduktion beinhaltet und mit einem EoL-Szenario verknüpft werden muss. Der Datensatz ist mit einem Sicherheitszuschlag von 20 % auf die Ergebnisse versehen

EoL: Hanffasern können entweder recycelt, kompostiert oder thermisch verwertet werden (Drewer et al. 2013). Die Kompostierbarkeit ist aufgrund des Polyesteranteils eingeschränkt (Stadt Heidelberg 2009). Für Hanfvlies wird in dieser Arbeit daher eine thermische Verwertung angenommen („Verbrennung von Holzwerkstoffen in Müllverbrennungsanlagen“). Der Heizwert von Hanffasern liegt Schmiedel (2013) zufolge bei 16,9 MJ/kg. Entsprechend der Vorgehensweise bei Holzweichfaserplatten wurde zur Berechnung der Gutschrift ein Korrekturfaktor von 1,16 berücksichtigt.

Ökologische Aspekte: Hanf ist eine einheimische Agrarpflanze, die traditionell für die stoffliche Nutzung angebaut wird. Zwischen April und August erreicht die schnell wachsende Pflanze eine Höhe von drei bis vier Metern. Der Anbau erfordert keinen Einsatz von chemischen Unkrautvernichtungs- und Pflanzenschutzmitteln sowie keinen oder nur einen geringen Einsatz an Düngemitteln. Der Wasserverbrauch ist gering. Hanf kann durch seine tiefgehenden Wurzeln Erosion entgegenwirken (Toonen 2007). Die höchsten Erträge erreicht Faserhanf auf tiefgründigen, humosen Böden mit guter Wasserversorgung, er sollte jedoch aufgrund der Konkurrenz zu anderen Marktfrüchten und Nahrungsmitteln auf weniger guten Böden angebaut werden (SMUL 2001). Die Transportwege im Rahmen von Anbau und Produktion sind verhältnismäßig kurz und der Energieaufwand bei der Herstellung gering (Drewer et al. 2013). Produkte, die synthetische Stützfasern enthalten sind allerdings nicht kompostierbar und müssen deponiert oder thermisch verwertet werden (Drewer et al. 2013).

Gesundheitliche Aspekte: In Zusammenhang mit Hanf sind keine gesundheitlichen Bedenken bekannt (Drewer et al. 2013).

¹⁷ <http://www.waermedaemmstoffe.com/>

Fenster: Zwei- bzw. Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung, Holzrahmen

Herstellung: Bei der Herstellung der Fenster werden jeweils zwei Datensätze zur Herstellung des Rahmens „Holz-Blendrahmen; 1,30 kg/m“ sowie für die Verglasung „Isolierglas 2-Scheiben; 20 kg/m²“ bzw. „Dreifachverglasung; 9,72 kg/m²“ zusammengeführt. Es handelt sich jeweils um Cradle to gate-Datensätze (Module A1 – A3 gemäß EN 15804). Glas wird aus Quarzsand, Soda, Dolomit, Kalk und Feldspat hergestellt. Die Verglasung besteht aus zwei bzw. drei Scheiben sogenanntem Floatglas, mit einer Dicke von jeweils 4 mm, zweifach beschichtet (low-e mittels metallischen Pigmenten und Farbpigmenten) und 16 mm Abstand zwischen den Scheiben. Im Scheibenzwischenraum befindet sich eine Argonfüllung. Die Floatglasherstellung erfolgt bei 1.100 °C, die Glasschmelze wird über auf ein Bad aus flüssigem Zinn geleitet, auf dem das Glas schwimmt und sich gleichmäßig ausbreitet. Das Glas kühlt auf ca. 600 °C runter und wird fortlaufend herausgezogen und gekühlt (DERA 2014). Das Edelgas Argon wird aus der Luft gewonnen. Die Datensätze zu Zwei- und Dreischeibenverglasung sind jeweils mit einem Sicherheitszuschlag von 20 % auf die Ergebnisse versehen. Der Datensatz zur Rahmenherstellung beschreibt die Herstellung von einem laufenden Meter Holz-Blendrahmen (IV 68 Kiefer). Er umfasst die Rahmenherstellung, inklusive der forstwirtschaftlichen Vorkette sowie die Lackierung des Holzes. Da auch die CO₂-Aufnahme während der Biomasseproduktion berücksichtigt ist, muss der Datensatz mit einem EoL-Datensatz verknüpft werden. Der Datensatz ist außerdem mit einem Sicherheitszuschlag von 10 % auf die Ergebnisse versehen.

EoL: Die Ökobaudat enthält keinen EoL-Datensatz für Fensterglas. Daher wird als EoL-Szenario für das Fensterglas vereinfachend von den gleichen Anteilen an Recycling (90 %) und Deponierung (10 %) ausgegangen wie bei Houwald et al. (2012). Die Ergebnisse aus der Wirkungsabschätzung des EoL von Houwald et al. (2012) für Zwei-Scheiben-Isolierglas werden dem Datensatz zur Herstellung des Zwei- bzw. Drei-Scheiben-Isolierglases aus der Ökobaudat entsprechend angepasst. Mögliche EoL-Szenarien von Holzrahmen sind Verbrennung, Verrottung und Deponierung. Üblich ist hauptsächlich die Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen (s. z. B. ift Rosenheim 2012), weswegen in dieser Arbeit eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Verbrennung von Holzwerkstoffen in MVA“ gewählt wird.

Ökologische Aspekte: Die Materialien zur Herstellung des Fensterglases sind alle flächendeckend und ausreichend in Deutschland vorhanden. Die Rohstoffe werden im Tagebau abgebaut - mit entsprechenden Natur- und Landschaftsschäden, die durch Renaturierungsmaßnahmen behoben werden. Während des Herstellungsprozesses fallen Staubemissionen an und das Schmelzen der Rohstoffe bedarf eines hohen Energieeinsatzes. In der Nutzungsphase entstehen keine negativen Umweltauswirkungen. Die Gewinnung und Herstellung der Metalle für die Beschichtung geht mit dem Entstehen schwermetallhaltiger Stäube einher, auch das Recycling des Glases wird aufwendiger, da die Beschichtungen gelöst werden müssen. Die Gewinnung von Argon bedarf eines zusätzlichen Energieaufwands, schneidet jedoch günstiger ab als der Einsatz alternativer Edelgase wie Krypton oder Xenon (Mack 2002). Bei Holzfenstern ist aus Perspektive des Ressourcenschutzes positiv hervorzuheben, dass einheimische, nachwachsende Rohstoffe zum Einsatz kommen, was mit kurzen Transportwegen einhergeht (Drewer et al. 2013). Grundsätzlich bestehen Konkurrenzen mit anderen Nutzungsformen, jedoch ist eine stoffliche Nutzung einer energetischen Nutzung vorzuziehen. Durch die lange Nutzungsdauer stellt der Holzrahmen einen CO₂-Speicher dar. Nach Ablauf der Nutzungsdauer kann das Holz weiterverwertet oder thermisch genutzt werden. Der Energieaufwand bei der Herstellung von Holzrahmen ist zudem gering. Allerdings weisen Holzrahmen in der Langzeitbilanz eine geringere Witterungsbeständigkeit auf als PVC-Fenster. Bei höheren Anforderungen an den Wetterschutz können ein höherer Wartungs- und Pflegeaufwand mit Schutzmittelbeschichtungen nachteilig wirken¹⁸.

Gesundheitliche Aspekte: Im Rahmen der Herstellung des Fensterglases können Quarzstäube auftreten, die zu Atemwegserkrankungen führen können. Darüber hinaus wurden keine negativen gesundheitlichen Aspekte in Zusammenhang mit Isolier- bzw. Wärmeschutzverglasung und der Holzrahmenherstellung aufgedeckt.

¹⁸ <http://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Holzfenster>

Fenster: Zwei- bzw. Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung, Kunststoffrahmen

Herstellung: Bei der Herstellung der Fenster werden wiederum zwei Datensätze zur Herstellung des Rahmens (Blendrahmen PVC-U; 2,8 kg/m) sowie für die Verglasung „Isolierglas 2-Scheiben“ bzw. „Dreifachverglasung“ zusammengeführt. Die Herstellung, das EoL-Szenario und die Umwelt- und Gesundheitsaspekte des Fensterglases sind im vorherigen Kapitel beschrieben. Der Datensatz zur Rahmenherstellung „Blendrahmen PVC-U“ beschreibt die Herstellung von einem Meter PVC-U-Rahmen mit Aussteifungsprofil. Der Datensatz ist mit einem Sicherheitszuschlag von 10 % auf die Ergebnisse versehen.

EoL: Für den Kunststoffrahmen wird von einer thermischen Verwertung ausgegangen, das heißt es erfolgt eine Verknüpfung mit dem Prozess-Datensatz „Verbrennung Kunststoff in Müllverbrennungsanlage“ inklusive Gutschrift.

Ökologische und gesundheitliche Aspekte: Die zur Herstellung von PVC-Fensterrahmen eingesetzten Rohstoffe basieren auf der nicht erneuerbaren Ressource Erdöl. Der Energieaufwand bei der Herstellung ist relativ hoch. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Literaturrecherche keine negativen ökologischen und gesundheitlichen Aspekte in Zusammenhang mit PVC-Fensterrahmen aufgedeckt.

3.2 Maßnahmen am Heizungssystem

Zu einigen der in der Ökobilanzierung betrachteten Heizungstechnologien liegen vom Umweltbundesamt (UBA) veröffentlichte Emissionsfaktoren für CO_{2eq}, SO₂, NO_x, Staub und CO vor (s. Tab. 3.2). Wärmebereitstellungstechnologien, die im Projekt Gebäudeenergiekunde bewertet werden, in der Veröffentlichung des UBA aber nicht erfasst sind, sind Hackschnitzelheizungen, Kombinationen von Solarthermie mit anderen Heizungstechnologien, Wärmepumpen in Kombination mit PV-Anlagen sowie Gas-Wärmepumpen.

Tab. 3.2: Emissionsfaktoren verschiedener Heizungssysteme

Quelle: UBA (2013)

Energieträger	CO _{2eq} [g/kWh]	SO ₂ [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	Staub [g/kWh]	CO [g/kWh]
Heizöl	314	0,330	0,252	0,019	0,144
Erdgas	248	0,011	0,176	0,006	0,136
Pellets	32	0,116	0,383	0,118	0,711
Solarthermie Flachkollektor	22	0,035	0,041	0,016	0,121
Solarthermie Vakuumröhrenkollektor	31	0,053	0,056	0,026	0,172
Elektro-Wärmepumpe (JAZ ca. 3)	212	0,104	0,185	0,014	0,110

Gasbrennwert-Kessel

Der in der Bilanzierung berücksichtigte Gasbrennwert-Kessel „Gas-Brennwertgerät < 20 kW (Standgerät)“ hat ein Gewicht von 133 kg. Der Datensatz umfasst die Module A1 bis A3, das heißt die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung, das Modul C (Beseitigung) und das Modul D (Recycling). Berücksichtigt ist eine Recyclingrate von 95 %. Für den restlichen Anteil ist in dem Datensatz eine Ablagerung auf einer Inertstoffdeponie unterstellt. Die Effizienz neuer Gasbrennwert-Kessel liegt mit über 100 % deutlich über denen herkömmlicher Niedertemperaturkessel mit ca. 90 %, bezogen auf den Heizwert (BDEW 2013). Die höhere Effizienz von Brennwert-Kesseln ist darauf zurückzuführen,

dass die Kondensationswärme des im Abgas enthaltenen Wasserdampfs genutzt wird. Zusätzlich zum Heizkessel wurde in der Bilanzierung ein Pufferspeicher aus Stahl mit einem Volumen von 200 L bei EZFH und 500 L bei MFH berücksichtigt. Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase erfolgte eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Nutzung - Gas Brennwert < 20 kW“.

Ökologische Aspekte: Der Einsatz der nicht erneuerbaren Ressource Erdgas als Brennstoff ist aus Sicht des Ressourcenschutzes negativ zu bewerten. Die Erdgasgewinnung über Bohrungen sowie der Transport, der größtenteils in Pipelines über lange Distanzen erfolgt, gehen mit Umweltwirkungen einher. In Europa konsumiertes Erdgas stammt mehrheitlich aus den Förderregionen West-Sibirien, Wolga-Ural, Nordsee und Nordafrika (BGR 2009). Zu den relevantesten Umwelteffekten im Zuge der Rohstoffgewinnung und des Transports zählen atmosphärische und flüchtige Emissionen durch Abfackelungs- und Abblasprozesse sowie an Verdichterstellen, Sammelstellen und durch Leckagen an den Pipelines (UNEP IE 1997). Die potenzielle Gewinnung von unkonventionellem Erdgas beispielsweise durch Fracking wird aus ökologischer Perspektive sehr kritisch diskutiert. Bedenken betreffen vor allem die Gefahr der Trinkwasserverschmutzung sowie den Einsatz von umweltwirksamen Chemikalien und die Entsorgung des anfallenden Abwassers (UBA 2012).

Die mit der Verbrennung in der Heizanlage verbundenen und über den gesamten Lebenszyklus freigesetzten CO_{2eq}-Emissionen sind im Vergleich zu anderen fossilen Brennstoffen wie Heizöl relativ gering, im Vergleich zu Biomasse-Heizungen und Wärmepumpen jedoch hoch (s. Tab. 3.2) (Breitschopf 2012; UBA 2013). Die mit der Verbrennung einhergehenden Kohlenmonoxid-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sind bei Gasbrennwert-Kesseln im Vergleich zu Öl- und Biomasse-Heizungen (Pellets, Hackschnitzel, Stückholz) gering (Breitschopf 2012). Die SO₂-Emissionen, die zur Wirkungskategorie Versauerung beitragen, sind bei Erdgas-Heizungen sehr gering. Ein geringer Anteil des Gases aus dem Gasnetz stammt aus der Biomethanherzeugung. Perspektivisch ist von etwas höheren Anteilen auszugehen. Allerdings geht auch die Biogas- und Biomethanbereitstellung abhängig von den eingesetzten Substraten mit unerwünschten Umwelteffekten wie Eutrophierung und Versauerung sowie mit Nutzungskonkurrenzen einher (Dunkelberg et al. 2015).

Gesundheitliche Aspekte: Im Zuge der Erdgasgewinnung ereignen sich regelmäßig Förder- und Transportunfälle. Mit Fracking werden darüber hinaus Gesundheitsgefahren durch die eingesetzten Chemikalien sowie durch toxische Stoffe geogenen Ursprungs im Lagerstättenwasser, z. B. Schwermetalle, radioaktive Substanzen und aromatische Kohlenwasserstoffe befürchtet (Schomann et al. 2014). Die bei der Verbrennung von Erdgas entstehenden Abgase gelten als nicht gesundheitsschädlich und die Kohlenmonoxid-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sind im Vergleich zu vielen anderen auf Verbrennung basierenden Heizungen gering (siehe oben). Aufgrund der Entzündbarkeit des Gases besteht im Fall von Leckagen grundsätzlich Explosionsgefahr. Erdgas selbst ist nicht giftig. Das Einatmen von Gas kann bei hohen Konzentrationen durch die Sauerstoffverdrängung allerdings zu Bewusstlosigkeit und Ersticken führen. Aus Sicherheitsgründen ist Erdgas daher odoriert, so dass bereits geringe Konzentrationen zu einem intensiven Geruch führen (SWM 2015).

Ölbrennwert-Kessel

Der in der Bilanzierung berücksichtigte Ölbrennwert-Kessel „Öl-Brennwertgerät < 20 kW (Standgerät)“ weist ein Gewicht von 162 kg auf. Der Datensatz umfasst die Module A1 bis A3, das heißt die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung, das Modul C (Beseitigung) und das Modul D (Recycling). Berücksichtigt ist eine Recyclingrate von 95 %. Für den restlichen Anteil ist eine Ablagerung auf einer Inertstoffdeponie unterstellt. Neben einem Pufferspeicher aus Stahl mit einem Volumen von 200 L bei EZFH und 500 L bei MFH wurde ein Öl-Tank aus Nylon mit einem Volumen von 1.000 L berücksichtigt. Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase erfolgte eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Nutzung - Öl Brennwert < 20 kW“.

Ökologische Aspekte: Der Einsatz der nicht erneuerbaren Ressource Erdöl als Ausgangsbasis für den Brennstoff Heizöl ist aus Sicht des Ressourcenschutzes negativ zu bewerten. Die Gewinnung von Erdöl inklusive

der Bohrungen und des Transports geht mit ähnlichen negativen Umweltwirkungen einher wie die Erdgasgewinnung (BGR 2009). Zu den relevantesten Umwelteffekten im Zuge der Rohstoffgewinnung und des Transports zählen atmosphärische und flüchtige Emissionen durch Abfackelungsprozesse sowie an Verdichterstellen, Sammelstellen und durch Leckagen an den Pipelines (Al-Hamad, Nassehi und Khan 2010; Schifter et al. 2005; UNEP IE 1997). Heizöl ist schädlich für Wasserorganismen und hat in Gewässern eine langfristig schädliche Wirkung¹⁹ (Total 2011). Tankerunfälle führen deshalb zu schwerwiegenden ökologischen Auswirkungen, sind in den vergangenen Jahren jedoch seltener geworden (ITOPF 2010). Die mit der Verbrennung in der Heizanlage verbundenen CO₂-Emissionen sind ebenso wie die CO_{2eq}-Emissionen über den gesamten Lebensweg sowohl im Vergleich zu mit Erdgas betriebenen Heizungen als auch im Vergleich zu Biomasse-Heizungen und Wärmepumpen hoch. Die mit der Verbrennung einhergehenden Kohlenmonoxid-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sind bei Ölbrennwert-Kesseln im Vergleich zu Biomasse-Heizungen (Pellets, Hack-schnitzel, Stückholz) gering, im Vergleich zu Erdgas-Heizungen jedoch etwas höher (Breitschopf 2012; Thrän und Pfeiffer 2013; UBA 2013). Die SO₂-Emissionen, die zur Wirkungskategorie Versauerung beitragen, sind bei Öl-Heizungen deutlich höher als bei Erdgas-Heizungen (Thrän und Pfeiffer 2013; UBA 2013).

Gesundheitliche Aspekte: Wie bei der Erdgasgewinnung ereignen sich auch im Zuge von Erdölgewinnung und -transport Förder- und Transportunfälle. Die bei der Verbrennung von Heizöl entstehenden Abgase gelten als nicht gesundheitsschädlich. Die Kohlenmonoxid-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sind im Vergleich zu vielen anderen auf Verbrennung basierenden Heizungen gering (siehe oben). Heizöl wirkt gesundheitsschädlich beim Einatmen, leicht reizend für die Atmungsorgane, reizt die Haut und kann beim Verschlucken Lungenschäden verursachen. Zudem besteht ein Verdacht auf eine krebserzeugende Wirkung (Total 2011).

Pelletkessel

Der in der Bilanzierung berücksichtigte Pelletkessel „Pelletkessel < 20 kW“ hat ein Gewicht von 335 kg und eine Leistung von 14,9 kW. Der Datensatz umfasst die Module A1 bis A3, das heißt die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung, das Modul C (Beseitigung) und das Modul D (Recycling). Berücksichtigt ist eine Recyclingrate von 95 %. Für den restlichen Anteil ist in dem Datensatz eine Ablagerung auf einer Inertstoffdeponie unterstellt. Zusätzlich zum Heizkessel wurde in der Bilanzierung ein Pufferspeicher aus Stahl mit einem Volumen von 200 L bei EZFH und 500 L bei MFH berücksichtigt. Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase erfolgte eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Nutzung - Pelletkessel < 20 kW“.

Ökologische Aspekte: Der Einsatz der erneuerbaren Ressource Biomasse ist im Hinblick auf den Ressourcenschutz zunächst zu begrüßen. Wichtigster Rohstoff für die Pelletproduktion sind Sägespäne und Hack-schnitzel, welche in Betrieben der Holzbe- und verarbeitenden Industrie anfallen. Rund 90 % der in Deutschland produzierten Pellets werden aus Sägenebenprodukten hergestellt. Daneben sind vor allem nicht-sägefähige Rundholzsortimente von Bedeutung, welche im Sägewerk nicht eingesetzt werden können (DEPI 2015). Im vergangenen Jahr wurden in Deutschland 2 Millionen Tonnen Pellets hergestellt, der Verbrauch belief sich 2015 bundesweit auf 1,86 Millionen Tonnen. Somit war Deutschland wie auch in den Jahren zuvor Nettoexporteur von Pellets (DEPI 2016). Die Transportwege sind daher im Vergleich zu fossilen Brennstoffen gering. Vor dem Hintergrund eines begrenzten Potenzials der Sägenebenprodukte und der Konkurrenz zur stofflichen Nutzung des Rohstoffes, insbesondere besteht auch eine Konkurrenz zur Nutzung von Sägenebenproduktion zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen (FNR 2014), stellt sich die Frage nach alternativen Rohstoffen. Waldresthölzer werden aufgrund des Rindenanteils nicht für die Produktion von zertifizierten Pellets verwendet, sägefähiges Rundholz steht in Konkurrenz zur stofflichen Nutzung und ist zu teuer und Altholz ist aufgrund der Emissionsproblematik von der Zertifizierung ausgeschlossen (DEPI 2015). Zukünftig könnte der Einsatz von landwirtschaftlichen Energiehölzern aus KUP und nicht-holzartiger Biomasse an Bedeutung gewinnen, in

¹⁹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/heizoel-im-mangrovenwald>

der heutigen Situation sind diese Rohstoffe jedoch noch wenig relevant (Döring 2011). Die landwirtschaftliche Produktion von KUP geht mit geringen negativen Umweltwirkungen einher, steht jedoch grundsätzlich in Konkurrenz zum landwirtschaftlichen Nahrungsmittel- und Futtermittelanbau (Dunkelberg und Aretz 2013).

Da in der Phase der Primärproduktion zunächst CO₂ aus der Atmosphäre in der Biomasse gebunden und während der Verbrennung wieder freigesetzt wird, sind die Netto-CO_{2eq}-Emissionen, die mit dem Einsatz von Pellets als Brennstoff einhergehen, deutlich geringer als bei den fossilen Brennstoffen Erdgas und Heizöl. Die mit der Verbrennung einhergehenden Kohlenmonoxid-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sind allerdings bei Pellet-Heizungen im Vergleich zu Erdgas- und Ölheizungen deutlich höher. Die SO₂-Emissionen, die zur Wirkungskategorie Versauerung beitragen, sind bei Pellet-Heizungen deutlich höher als bei Gas-Heizungen, jedoch niedriger als bei Öl-Heizungen (Breitschopf 2012; Dunkelberg und Aretz 2013; Thrän und Pfeiffer 2013; UBA 2013).

Gesundheitliche Aspekte: Holz enthält geringe Mengen an Stickstoff-, Schwefel- und Chlorverbindungen. Bei der Verbrennung entstehen daher Stickstoff- und Schwefeloxide sowie Salzsäure, die gesundheitsschädlich sind. Das am intensivsten diskutierte Gesundheitsproblem in Bezug auf Pelletheizungen sind die verhältnismäßig hohen Feinstaubemissionen. Feinstaubpartikel können in die Lunge eindringen und zu Atemwegserkrankungen führen und zu Beeinträchtigungen des Herz-Kreislauf-Systems beitragen. Darüber hinaus besteht der Verdacht, dass Feinstaub kanzerogen wirkt. Bei unvollständiger Verbrennung kommt es zusätzlich zu Kohlenmonoxid-Emissionen und zur Freisetzung organischer, teils Krebs erzeugender Verbindungen (z. B. polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK)). Holzpellets verbrennen jedoch insgesamt schadstoffärmer als andere Holzbrennstoffe (z. B. Scheitholz). Um die genannten Emissionen und Gesundheitsrisiken zu minimieren, ist es wichtig, bei der Wahl des Kessels auf das Umweltzeichen „Blauer Engel“ zu achten. Die Holzpellets selbst sind ein genormter Brennstoff und entsprechend zertifiziert (DIN EN 14961-2, DINplus, EN-plus). Darüber hinaus existieren auch mit dem Blauen Engel zertifizierte Holzpellets, die besondere Anforderungen an den Brennstoff sowie an die Rohstoffe erfüllen. Es ist zudem auf eine trockene Lagerung der Pellets, eine regelmäßige Wartung und Überwachung der Heizung durch Fachpersonal sowie eine sorgsame Entsorgung der Asche im Hausmüll (möglichst ohne Aufwirbelung und Berührung) zu achten (UBA 2011).

Hackschnitzelkessel

Der in der Bilanzierung berücksichtigte Hackschnitzelkessel „Hackschnitzelkessel < 20 kW“ hat ein Gewicht von 631 kg. Der Datensatz umfasst die Module A1 bis A3, das heißt die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung, das Modul C (Beseitigung) und das Modul D (Recycling). Berücksichtigt ist eine Recyclingrate von 95 %. Für den restlichen Anteil ist in dem Datensatz eine Ablagerung auf einer Inertstoffdeponie unterstellt. Zusätzlich zum Heizkessel wurde in der Bilanzierung ein Pufferspeicher aus Stahl mit einem Volumen von 200 L bei EZFH und 500 L bei MFH berücksichtigt. Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase erfolgte eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Nutzung - Hackschnitzelkessel < 20 kW“.

Ökologische Aspekte: Der Einsatz der erneuerbaren Ressource Biomasse ist im Hinblick auf den Ressourcenschutz zunächst zu begrüßen. Hackschnitzel sind maschinell zerkleinerte Holzstücke, die aus Waldrestholz, sonstigem Schwachholz, Holz aus Durchforstungs- und Landschaftspflegemaßnahmen sowie aus landwirtschaftlichen Kurzumtriebsplantagen, Industrierestholz und Gebrauchtholz hergestellt werden (FNR 2012b). Durch den Einsatz heimischer Rohstoffe sind die Transportwege des Brennstoffs gering. Neben der energetischen Nutzung finden Hackschnitzel auch Verwendung in der stofflichen Nutzung zur Herstellung von Holzwerkstoffen und Zellstoff, so dass hier Nutzungskonkurrenzen auch zur Dämmstoffherstellung bestehen (FNR 2012b; FNR 2014). Die Hackschnitzelbereitstellung aus den genannten Sortimenten führt in der Regel zu geringen Umweltwirkungen, da die Aufarbeitung nur mit einem geringen Arbeits-, Maschinen- und Energieaufwand einhergeht (FNR 2012b; Dunkelberg und Aretz 2013). Da in der Phase der Primärproduktion CO₂ aus der Atmosphäre in der Biomasse gebunden und während der Verbrennung wieder freigesetzt wird, sind die

Netto-CO_{2eq}-Emissionen, die mit dem Einsatz von Hackschnitzeln als Brennstoff einhergehen, deutlich geringer als bei Erdgas und Heizöl und auch geringer als beim Pelleteinsatz, da die Pelletherstellung energieaufwendiger ist. Die mit der Verbrennung einhergehenden Kohlenmonoxid-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sind wie bei Pellet-Heizungen bei Hackschnitzel-Heizungen im Vergleich zu Erdgas- und Ölheizungen höher. Die SO₂-Emissionen sind bei Hackschnitzel-Heizungen deutlich höher als bei Gas-Heizungen, jedoch niedriger als bei Öl-Heizungen (Breitschopf 2012; Dunkelberg und Aretz 2013; Thrän und Pfeiffer 2013).

Gesundheitliche Aspekte: Die gesundheitlichen Aspekte sind in gleicher Weise zu bewerten wie bei Pellet-Heizungen. Bei der Verbrennung entstehen die gesundheitsschädlichen Verbindungen Stickstoff- und Schwefeloxide sowie Salzsäure und es kommt zu verhältnismäßig hohen Feinstaubemissionen, die zu Atemwegserkrankungen und Beeinträchtigungen des Herz-Kreislauf-Systems führen können. Bei unvollständiger Verbrennung kommt es zusätzlich zu Kohlenmonoxid-Emissionen und zur Freisetzung organischer, teils Krebs erzeugender Verbindungen (z. B. PAK). Um die genannten Emissionen und Gesundheitsrisiken zu minimieren, ist es wichtig, bei der Wahl des Kessels auf das Umweltzeichen „Blauer Engel“ zu achten. Es existieren auch mit dem Blauen Engel zertifizierte Hackschnitzel, die besondere Anforderungen an den Brennstoff sowie an die Rohstoffe erfüllen. Es ist zudem auf eine trockene Lagerung der Hackschnitzel, eine regelmäßige Wartung und Inspektion der Anlage durch Fachpersonal sowie eine sorgsame Entsorgung der Asche im Hausmüll (möglichst ohne Aufwirbelung und Berührung) zu achten (UBA 2011).

Solarthermie – Flachkollektor zur Trinkwassererwärmung

Solarthermieanlagen können zur Trinkwassererwärmung sowie zur Heizungsunterstützung eingesetzt werden. Es existieren zwei Kollektortypen, Flach- und Vakuumröhrenkollektoren, die grundsätzlich beide sowohl zur Trinkwassererwärmung als auch zur Heizungsunterstützung eingesetzt werden können. Laut BSB (2014) sind Flachkollektoren besonders geeignet, um hauptsächlich im Sommer Warmwasser bereit zu stellen. Daher wird in dieser Studie vereinfachend davon ausgegangen, dass Flachkollektoren für die Trinkwassererwärmung und Vakuumröhrenkollektoren für die Heizungsunterstützung eingesetzt werden.

Die in der Bilanzierung berücksichtigte Solarthermieanlage „Solaranlage Flachkollektor“ bezieht sich auf einen Quadratmeter eines Flachkollektors (Flächengewicht: 18,3 kg/m²). Der Datensatz umfasst die Module A1 bis A3, das heißt die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung, das Modul C (Beseitigung) und das Modul D (Recycling). Berücksichtigt ist eine Recyclingrate von 95 %. Für den restlichen Anteil ist in dem Datensatz eine Ablagerung auf einer Inertstoffdeponie unterstellt. Eine optimal ausgelegte Solarthermieanlage kann etwa 65 % des Energiebedarfs für Warmwasser abdecken (Deutsches Kupferinstitut 2006; BSB 2014). Hierfür erforderlich sind etwa sieben Quadratmeter Kollektorfläche (bei einem EZFH mit vier Personen) (VBZ NRW 2012). Für die MFH wurde eine größere Kollektorfläche von insgesamt 17,5 Quadratmetern angenommen, dies entspricht einer Auslegung für den Warmwasserbedarf von etwa 10 Personen. Erhebungen zufolge liegt der Warmwasseranteil am Energieverbrauch bei Gebäuden mit hohem Energieverbrauch bei etwa 15 % und bei Gebäuden mit niedrigem Energieverbrauch bei etwa 30 % (BMVBS 2012). In der Bilanzierung wird vereinfachend von einem solaren Deckungsgrad von 15 % bezogen auf den Endenergiebedarf ausgegangen, dies entspricht den Deckungsgraden, die bei Gebäuden mit mittlerem Energieverbrauch erreicht werden können. Die verbleibende Endenergie wird von einem Heizkessel bzw. einer Wärmepumpe bereitgestellt. Hierbei wurden die folgenden Kombinationen betrachtet:

- + Flachkollektor plus Gas-Brennwert
- + Flachkollektor plus Pelletkessel
- + Flachkollektor plus Hackschnitzelkessel
- + Flachkollektor plus Luft-Wärmepumpe bzw. Erd-Wärmepumpe

Zusätzlich zur Solarthermieanlage und dem Heizkessel wurde in der Bilanzierung ein Pufferspeicher aus Stahl mit einem Volumen von 500 L bei EZFH und 1000 L bei MFH berücksichtigt. Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase erfolgte für den Anteil des Endenergiebedarfs aus der Solaranlage eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Nutzung - Flachkollektor“, der sich auf die Bereitstellung von 1125,3 MJ_{th} bezieht

und den Strombedarf der Pumpen beinhaltet. Für den restlichen Anteil des Endenergiebedarfs erfolgte eine Verknüpfung mit dem jeweils für das ergänzende Heizungssystem gültigen Nutzungs-Datensatz.

Ökologische Aspekte: Der Einsatz mineralischer Ressourcen für die Produktion von Solarthermieanlagen wird in der aktuellen Studie „Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems“ als unkritisch angesehen (WI 2014). Zum Einsatz kommen vor allem Kupfer, Aluminium und Eisen. In der Nutzungsphase wird Strom für den Betrieb der Kreislaufpumpe eingesetzt, darüber hinaus kommt die erneuerbare Ressource Solarenergie zum Einsatz. Da mit Solaranlagen zur Warmwasserbereitstellung nur Deckungsgrade von etwa 15 % erreicht werden, hängt die gesamt-ökologische Bewertung maßgeblich von dem ergänzenden Heizungssystem ab. Emissionen entstehen durch die solarthermische Anlage selbst vor allem im Zuge der Rohstoffgewinnung, insbesondere Kupfergewinnung, sowie in der Betriebsphase durch den Stromverbrauch der Kreislaufpumpe (UBA 2013). Die spezifischen Staubemissionen, die über den gesamten Lebenszyklus, vornehmlich jedoch in Zusammenhang mit dem Rohstoffabbau entstehen, sind ebenso wie die SO₂-Emissionen im Vergleich zu Erdgas-Heizungen höher, jedoch geringer als bei Öl-Heizungen. Biomasse-Heizungen führen durch die hohen Emissionen in der Nutzungsphase zu insgesamt höheren Staubemissionen als Solarthermieanlagen (UBA 2013). Die über den Lebensweg freigesetzten Mengen an Treibhausgasen und Stickoxiden sind im Vergleich zu fossilen sowie auf Biomasse basierende Heizungssystemen deutlich geringer. Das Umwelt-Label „Blauer Engel“ wird auch für die Kennzeichnung von Solarkollektoren verwendet, wobei besonders energieeffiziente Anlagen ausgezeichnet werden.

Gesundheitliche Aspekte: Im Unterschied zu den mit fossilen Brennstoffen und mit Biomasse betriebenen Heizungssystemen entstehen die Emissionen nicht am Ort der Solarthermieanlage selbst, sondern vornehmlich im Zuge der Ressourcengewinnung und am Ort der Stromerzeugung. Der in der Solaranlage eingesetzte Wärmeträger besteht in der Regel aus Wasser mit einem Frostschutzmittel als Additiv, eine Entsorgung kann über die Problemmüllsammlung erfolgen. Für den Betreiber der Solarthermieanlage besteht durch Emissionen, Chemikalien, Strahlung oder Lärm kein direktes Gesundheitsrisiko (LfU 2015).

Solarthermie – Vakuumröhrenkollektor zur Heizungsunterstützung

Vakuumröhrenkollektoren können zur Trinkwassererwärmung sowie zur Heizungsunterstützung eingesetzt werden. In dieser Studie wird vereinfachend davon ausgegangen, dass Vakuumröhrenkollektoren für die Heizungsunterstützung eingesetzt werden.

Die in der Bilanzierung berücksichtigte Solarthermieanlage „Solaranlage Vakuumröhrenkollektor“ bezieht sich auf einen Quadratmeter eines Flachkollektors (Flächengewicht: 29,5 kg/m²). Der Datensatz umfasst die Module A1 bis A3, das heißt die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung, das Modul C (Beseitigung) und das Modul D (Recycling). Berücksichtigt ist eine Recyclingrate von 95 %. Für den restlichen Anteil ist in dem Datensatz eine Ablagerung auf einer Inertstoffdeponie unterstellt. Zur Heizungsunterstützung eingesetzte Solarthermieanlagen erreichen bei Altbauten in der Regel einen solaren Deckungsgrad von 10 bis 20 % am Endenergiebedarf und bei Gebäuden mit geringer Energiebedarf einen Anteil von 25 bis 40 % (VBZ NRW 2012). Hierfür erforderlich sind etwa 0,7 Quadratmeter Röhrenkollektorfläche pro Quadratmeter Wohnfläche. Dies entspricht einer Kollektorfläche von etwa 10 m² bei den EZFH und 30 m² bei den MFH. In der Bilanzierung wird vereinfachend von einem solaren Deckungsgrad von 25 % bezogen auf den Endenergiebedarf ausgegangen. Die verbleibende Endenergie wird von einem Heizkessel bzw. einer Wärmepumpe bereitgestellt, wobei die folgenden Kombinationen betrachtet wurden:

- + Vakuumröhrenkollektor plus Gas-Brennwert
- + Vakuumröhrenkollektor plus Pelletkessel
- + Vakuumröhrenkollektor plus Hackschnitzelkessel
- + Vakuumröhrenkollektor plus Luft-Wärmepumpe bzw. Erd-Wärmepumpe

Zusätzlich zur Solarthermieanlage und zum Heizkessel wurde in der Bilanzierung ein Pufferspeicher aus Stahl mit einem Volumen von 500 L bei EZFH und 1000 L bei MFH berücksichtigt. Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase erfolgte für den Anteil des Endenergiebedarfs aus der Solaranlage eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Nutzung – Röhrenkollektor“, der sich auf die Bereitstellung von 1.454,5 MJ_{th} bezieht und den Strombedarf der Pumpen beinhaltet. Für den restlichen Anteil des Endenergiebedarfs erfolgte eine Verknüpfung mit dem jeweils für das ergänzende Heizungssystem gültigen Nutzungs-Datensatz.

Ökologische Aspekte: Der Einsatz mineralischer Ressourcen, vor allem Kupfer, Aluminium und Eisen, für die Produktion von Solarthermieanlagen wird als unkritisch angesehen (WI 2014). In der Nutzungsphase wird Strom für den Betrieb der Kreislaufpumpe eingesetzt, darüber hinaus kommt die erneuerbare und unbegrenzt verfügbare Solarenergie zum Einsatz. Da mit Solaranlagen zur Heizungsunterstützung Deckungsgrade von etwa 20 bis 30 % erreicht werden, hängt die gesamt-ökologische Bewertung maßgeblich von dem ergänzenden Heizungssystem ab. Emissionen entstehen durch die solarthermische Anlage selbst vor allem im Zuge der Rohstoffgewinnung, insbesondere Kupfergewinnung, sowie in der Betriebsphase durch den Stromverbrauch der Kreislaufpumpe (UBA 2013). Die spezifischen Emissionen von Treibhausgasen, Staub, Stickoxiden und SO₂ fallen über den Lebenszyklus hinweg höher aus als bei Flachkollektoren (UBA 2013), sind im Vergleich zu den fossilen und mit Biomasse betriebenen Heizungssystemen jedoch in gleicher Weise zu bewerten. Das Umwelt-Label „Blauer Engel“ wird auch für die Kennzeichnung von Solarkollektoren verwendet, wobei besonders energieeffiziente Anlagen ausgezeichnet werden.

Gesundheitliche Aspekte: Die gesundheitlichen Aspekte sind in gleicher Weise zu bewerten wie bei Flachkollektoren.

Luft-Wärmepumpe

Wärmepumpen werden für die Bereitstellung der thermischen Grundlast eingesetzt. Vielfach ist ergänzend ein Gas-Brennwertkessel zur Deckung der Spitzenlast im Winter vorhanden. Wärmepumpen können zudem gut mit solarthermischen Anlagen kombiniert werden, die im Sommerbetrieb meist die komplette Bereitstellung des Warmwassers übernehmen können. Luft-Wärmepumpen entziehen der Umgebungsluft über einen Wärmetauscher Wärme und geben diese an den Heizungskreislauf ab. Für den Kreislaufprozess kommen bei strombetriebenen Wärmepumpen Kompressoren zum Einsatz. Ergänzend zur Wärmepumpe bedarf es eines Pufferspeichers. Eine zentrale Kennzahl zur Beschreibung der Effizienz einer Wärmepumpe ist der COP, „Coefficient of Performance“, der definiert ist als das Verhältnis von Wärmeleistung und der dazu erforderlichen Antriebsenergie (Strom). Luft-Wärmepumpen weisen nach DIN EN 14511 einen COP zwischen 3,2 und 4,2 auf, mehrheitlich werden Werte von etwa 3,2 erreicht (Fraunhofer ISE 2011).

Die in der Bilanzierung berücksichtigte Luft-Wärmepumpe „Strom Wärmepumpe (Luft-Wasser)“ bezieht sich auf eine Nennheizleistung von 14 kW. Der Datensatz umfasst die Module A1 bis A3, das heißt die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung, das Modul C (Beseitigung) und das Modul D (Recycling). Berücksichtigt ist eine Recyclingrate von 95 %. Zusätzlich zur Wärmepumpe wurde in der Bilanzierung ein Pufferspeicher aus Stahl mit einem Volumen von 500 L bei EZFH und 1000 L bei MFH berücksichtigt. Für den Fall der Kombination der Wärmepumpe mit einer Solarthermieanlage wurden Pufferspeicher in einer Größe von 1000 L bei EZFH und 1500 L bei MFH angenommen.

Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase erfolgte eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Nutzung - Strom-Wärmepumpe Luft-Wasser 14kW (2/35)“ abgebildet, der eine COP von 3,1 bei 2 °C Außenlufttemperatur und 35 °C Vorlauftemperatur unterstellt. Die Strombereitstellung für den Betrieb der Wärmepumpe bezieht sich auf den Strommix Deutschland. Um unabhängiger von fossilen Brennstoffen zu werden, versuchen Teile der Bevölkerung einen möglichst hohen Anteil der Energie, die sie nutzen, regenerativ selbst zu erzeugen. Eine Möglichkeit, einen hohen Autarkiegrad und Strom-Eigenverbrauchsanteil zu erzielen, ist die Kombination einer Photovoltaik-Anlage mit einer Wärmepumpe. Daher erfolgte in dieser Arbeit ergänzend eine Bilanzierung für den Fall, dass 45 % des für den Wärmepumpenbetrieb erforderlichen Stroms aus

der eigenen PV-Stromproduktion stammen und 65 % aus dem Strommix Deutschland. Diese Annahmen basieren auf Ergebnissen einer IÖW-Studie zum Strom-Eigenverbrauchsanteil beim kombinierten Betrieb einer PV-Anlage und einer Wärmepumpe (Gähns et al. 2015).

Ökologische Aspekte: Kritische mineralische Ressourcen kommen für die Herstellung von Wärmepumpen nicht zum Einsatz (WI 2014). Für die ökologische Bewertung sind die Herstellungs- und Entsorgungsphase von Wärmepumpen daher im Vergleich zur Nutzungsphase vernachlässigbar. Für die Umwelt relevante Emissionen entstehen während der Nutzungsphase vor allem durch den Einsatz von Strom für den Betrieb der Wärmepumpe. Entscheidend für die Höhe der Emissionen sind zum einen die Zusammensetzung der Stromerzeugung und zum anderen der COP. Die ökologische Bewertung von strombetriebenen Wärmepumpen wird sich daher durch die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im Strommix zukünftig ändern. Die Bilanzierung in dieser Studie bezieht sich auf den aktuellen Strommix sowie auf einen hohen Anteil an PV-Strom, um die Technologiekombination PV-Anlage und Wärmepumpe zu berücksichtigen. Im Vergleich zu anderen Wärmepumpensystemen ist die durchschnittliche COP von Luft-Wärmepumpen niedrig, das heißt die Emissionen fallen während des Betriebs vergleichsweise hoch aus. Feldtests zeigen, dass Wärmepumpen in der Realität teilweise geringere JAZ als COP-Werte erzielen. Während sich der COP ausschließlich auf die Wärmepumpe bezieht und unter Normbedingungen ermittelt wird, berücksichtigt die JAZ die gesamte Wärmepumpen-Heizungsanlage und bezieht sich auf die über ein ganzes Jahr abgegebene Wärme sowie die aufgenommene elektrische Arbeit. Einem Feldtest im Zeitraum 2006 bis 2013 zufolge erreichten die getesteten Luft-Wärmepumpen im Durchschnitt nur eine JAZ von 2,8 (Auer und Schote 2014). Entsprechend würden die Emissionsfaktoren in allen Wirkungskategorien etwas höher ausfallen, als in dieser Studie basierend auf einer COP von 3,1 errechnet. Eine weitere Emissionsquelle während der Nutzungsphase sind Leckagen beim Einsatz teilfluorierter Kältemittel (UBA 2013). Das Umweltbundesamt empfiehlt daher die Verwendung natürlicher Kältemittel wie Propan (UBA 2015). Im Vergleich zu Öl- und Gasbrennwertkesseln sind die THG-Emissionen, die über den gesamten Lebenszyklus von Luft-Wärmepumpen entstehen (bei Bezug auf den Strommix Deutschland), geringer, im Vergleich zu Biomasse-Heizungen und Solarthermieanlagen jedoch höher (UBA 2013). Die SO₂-, NO_x- und Staub-Emissionen fallen geringer als bei Öl-Heizungen und Biomasse-Heizungen jedoch höher als bei Gas-Heizungen aus (UBA 2013). Auf dem Markt gibt es Wärmepumpen, die mit dem Umwelt-Label „Blauer Engel“ gekennzeichnet sind, dabei wird berücksichtigt, dass die Anlagen möglichst energieeffizient sind und ein klimafreundliches Kältemittel verwenden.

Gesundheitliche Aspekte: Die teilweise als Kältemittel verwendeten halogenierten Kohlenwasserstoffe sind nahezu geruchlos und bei sachgemäßer Anwendung nicht gesundheitsschädlich. Allerdings besteht bei Anreicherung von Kältemitteldämpfen in der Luft durch Verdrängen von Sauerstoff Erstickungsgefahr, da auch höhere Konzentrationen die Geruchsschwelle nicht überschreiten. Einzelne teilfluorierte Kältemittel sind brennbar. Im Falle der Verbrennung entstehen teils toxische Verbindungen (Schick Gruppe 2007). Propan als alternatives, umweltfreundlicheres Kältemittel ist brennbar und weist eine geringe Toxizität auf. Durch Verdrängung von Sauerstoff in der Luft kann es bei hohen Gaskonzentrationen ebenfalls zu Bewusstlosigkeit und Erstickten kommen (DVFG 2011). Luft-Wärmepumpen verursachen unter anderem durch den Betrieb der Kompressoren Geräuschemissionen im niederfrequenten Bereich, die teilweise als störendes Brummen wahrgenommen werden, insbesondere wenn sich Wärmepumpen aufgrund günstiger Stromtarife nachts oder in den frühen Morgenstunden einschalten. Die Geräuschemissionen können durch den Kauf von Geräten mit möglichst niedrigen Schalleistungspegeln, durch die sorgfältige Wahl des Standorts sowie durch Schallschutzmaßnahmen, z. B. Isolierungen gemindert werden (LfU 2011).

Erd-Wärmepumpe

Eine allgemeine Kurzbeschreibung von Wärmepumpen findet sich im vorherigen Kapitel zu Luft-Wärmepumpen. Erdreich-Wärmepumpen weisen nach DIN EN 14511 einen COP zwischen 4,2 und 4,7 auf, im Durchschnitt werden Werte von etwa 4,5 erreicht (Fraunhofer ISE 2011). Erd-Wärmepumpen existieren als Kollektoren und Sonden. Im Fall von Kollektoren verläuft ein Rohrsystem in einer Tiefe von etwa 1 – 1,5 m horizontal unterhalb der Erdoberfläche. Bei Wohngebäuden werden die Rohre typischerweise im Garten verlegt. Sonden hingegen werden in bis zu einer Tiefe von etwa 100 m vertikal verlegt und benötigen demnach deutlich weniger

Platz. Der COP, der mit Erdsonden erreicht wird, ist aufgrund der höheren Temperatur der Sole in der erreichten Tiefe im Vergleich zu Erdkollektoren etwas höher (LLUR 2011).

Die in der Bilanzierung berücksichtigten Erd-Wärmepumpen „Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor)“ und „Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde)“ beziehen sich auf eine Nennheizleistung von 20 kW. Der Datensatz umfasst die Module A1 bis A3, das heißt die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung, das Modul C (Beseitigung) und das Modul D (Recycling). Berücksichtigt ist eine Recyclingrate von 95 %. Zusätzlich zur Wärmepumpe wurde in der Bilanzierung ein Pufferspeicher aus Stahl mit einem Volumen von 500 L bei EZFH und 1000 L bei MFH berücksichtigt. Für den Fall der Kombination der Wärmepumpe mit einer Solarthermieanlage wurden Pufferspeicher in einer Größe von 1000 L bei EZFH und 1500 L bei MFH angenommen.

Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase erfolgte eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Nutzung - Strom-Wärmepumpe Sole-Wasser (0/35)“ abgebildet, der eine COP von 4,4 bei einer Temperatur der Sole von 0 °C Außenlufttemperatur und eine Vorlauftemperatur von 35 °C unterstellt. Für die Strombereitstellung gelten die gleichen Annahmen wie bei der Luft-Wärmepumpe.

Ökologische Aspekte: Ebenso wie bei Luft-Wärmepumpen sind die Herstellungs- und Entsorgungsphase im Vergleich zur Nutzungsphase bei Erd-Wärmepumpen vernachlässigbar. Auch hinsichtlich der Emissionen sind Erd-Wärmepumpen in gleicher Weise wie Luft-Wärmepumpen zu bewerten, aufgrund des höheren COP sind die spezifischen Emissionen pro Kilowattstunde jedoch etwas geringer als bei Luft-Wärmepumpen. Wie bei Luft-Wärmepumpen wurden bei Erd-Wärmepumpen in Feldtests geringere JAZ als der in der Bilanzierung unterstellte COP von 4,4 erfasst. Der durchschnittliche Wert lag hier bei 3,4 – einzelne Anlagen wiesen deutlich höhere Werte auf (Auer und Schote 2014). Bei Erd-Wärmepumpen können die Emissionsfaktoren dementsprechend ebenso wie bei Luft-Wärmepumpen höher ausfallen als in der Bilanzierung errechnet. Zudem ist bei Erd-Wärmepumpen der Grundwasserschutz zu beachten, da grundsätzlich dem Boden und dem Grundwasser Wärme entzogen wird, was die Ökosysteme verändern kann. Erdkollektoren unterliegen meist keiner wasserrechtlichen Genehmigungspflicht, wenn sie oberhalb des Grundwasserspiegels eingebaut werden. Für den Bau von Erd-Wärmesondenanlagen sind hingegen eine wasser- und/oder bergrechtliche Anzeige und in der Regel eine wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich. Häufig bedarf es zudem eines hydrogeologischen Fachgutachtens, sofern nicht Informationen durch Aufschlüsse in der Nachbarschaft vorliegen. Grundsätzlich gilt, dass Bohrungen und demnach Erdsonden in Wasser- und Heilquellenschutzgebieten nicht zulässig sind, bei Flächen mit Untergrundkontaminationen, tieferen Grundwasserstockwerken und im Fall von sogenanntem gespanntem Grundwasser Einzelfallprüfungen erforderlich sind (BWP 2012).

Gesundheitliche Aspekte: Die gesundheitlichen Aspekte sind in ähnlicher Weise zu bewerten wie bei Luft-Wärmepumpen. Das Problem der Lärmemissionen ist bei Erd-Wärmepumpen weniger relevant, da die Erd-Wärmepumpen im Gegensatz zu Luft-Wärmepumpen meist im Gebäudeinneren aufgestellt sind (LfU 2011).

Gas- Wärmepumpe

Gas-Wärmepumpen funktionieren prinzipiell in gleicher Weise wie Elektro-Wärmepumpen, nur dass der Kompressor mit einem Gas-Motor anstatt mit einem elektrischen Antrieb betrieben wird. In dieser Arbeit wird eine Gas-Luft-Wärmepumpen unterstellt, das heißt die Wärmepumpe entzieht der Umgebungsluft über einen Wärmetauscher Wärme und gibt diese an den Heizungskreislauf ab. Bei Gaswärmepumpen stammt meist nur etwa ein Viertel der erzeugten Heizwärme aus Umweltwärme, bei Elektro-Wärmepumpen sind es Dreiviertel.

Der in der Bilanzierung berücksichtigte Datensatz „Gaswärmepumpe (Luft) 20-70 kW“ umfasst die Module A1 bis A3, das heißt die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung, die Transporte der Rohstoffe und die Herstellung inklusive Verpackung, das Modul C (Beseitigung) und das Modul D (Recycling). Berücksichtigt ist eine Recyclingrate von 95 %. Zusätzlich zur Wärmepumpe wurde in der Bilanzierung ein Pufferspeicher aus Stahl mit einem Volumen von 500 L bei EZFH und 1000 L bei MFH berücksichtigt. Für den Fall der Kombination der Wärmepumpe mit einer Solarthermieanlage wurden Pufferspeicher in einer Größe von 1000 L bei EZFH und

1500 L bei MFH angenommen. Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase erfolgte eine Verknüpfung mit dem Datensatz „Nutzung - Gas-Wärmepumpe Luft (20 kW) 0 °C“.

Ökologische Aspekte: Ebenso wie bei Elektro-Wärmepumpen sind die Herstellungs- und Entsorgungsphase im Vergleich zur Nutzungsphase bei Erd-Wärmepumpen vernachlässigbar. Im Vergleich zur Gas-Brennwerttechnik weisen Gas-Wärmepumpen primärenergetische Vorteile bzw. Einsparungen auf. Im Vergleich zu Elektro-Wärmepumpen hängt die Bewertung des Primärenergieeinsatzes maßgeblich von der Zusammensetzung des Strommixes ab. Im Fall einer wenig effizienten und ökologischen Stromerzeugung schneiden Gas-Wärmepumpen besser ab als Elektro-Wärmepumpen, bei steigendem Anteil erneuerbarer Energien schwindet der Vorteil und kann sich in einen Nachteil wandeln (IFEU und WI 2008; Ebert und Gansler 2013). Bezüglich der Kältemittel gelten die gleichen Aussagen wie bei Elektro-Wärmepumpen und bezüglich des Einsatzes von Erdgas als Brennstoff gelten die gleichen Aussagen wie bei Gas-Brennwertkesseln (siehe oben).

Gesundheitliche Aspekte: Bezüglich der gesundheitlichen Aspekte gelten vergleichbare Aussagen wie bei Elektro-Luft-Wärmepumpen und Gas-Brennwertkesseln (siehe oben).

4 Ergebnisse der Ökobilanzierung

4.1 Maßnahmen an der Gebäudehülle

Die auf dem Markt verfügbaren Dämmmaterialien unterscheiden sich, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, hinsichtlich der Eigenschaften, eingesetzten Rohstoffe, der Herstellungsprozesse und der damit verbunden ökologischen und gesundheitlichen Aspekte. Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse der Ökobilanzierung zunächst für die im Zuge der energetischen Gebäudesanierung besonders relevante Wirkungskategorie GWP dargestellt, anschließend wird auf die weiteren Wirkungskategorien eingegangen. Bei der Bilanzierung der Dämmstoffe nicht berücksichtigt, wurde das Putzsystem, inklusive Kleber und Putz, da diese Anwendungen auch bei der reinen Renovierung ohne energetische Modernisierung anfallen. Eine Studie von Hochrein (2013 zitiert in Bürger et al. 2016) zeigt, dass das Putzsystem insbesondere für die human- und ökotoxikologische Wirkung einen großen Anteil an dem Gesamtgefahrstoffpotenzial der Dämmmaßnahmen ausmacht, das heißt die reine Renovierung der Fassade ohne den Einsatz von Dämmstoffen verursacht hier bereits den Großteil der Emissionen (Bürger et al. 2016). Bestrebungen zur Senkung des Gefahrstoffpotenzials im Zuge der energetischen Sanierung sollten daher diese Arbeitsschritte mit berücksichtigen.

4.1.1 CO_{2eq}-Emissionen, -Vermeidung und Amortisationszeiten

In der Ökobilanzierung wurden die Lebenszyklusphasen Herstellung, Transport und EoL differenziert, um die Herkunft der Emissionen nachvollziehen zu können. Abb. 4.1 zeigt am Beispiel der Dämmung der Fassade

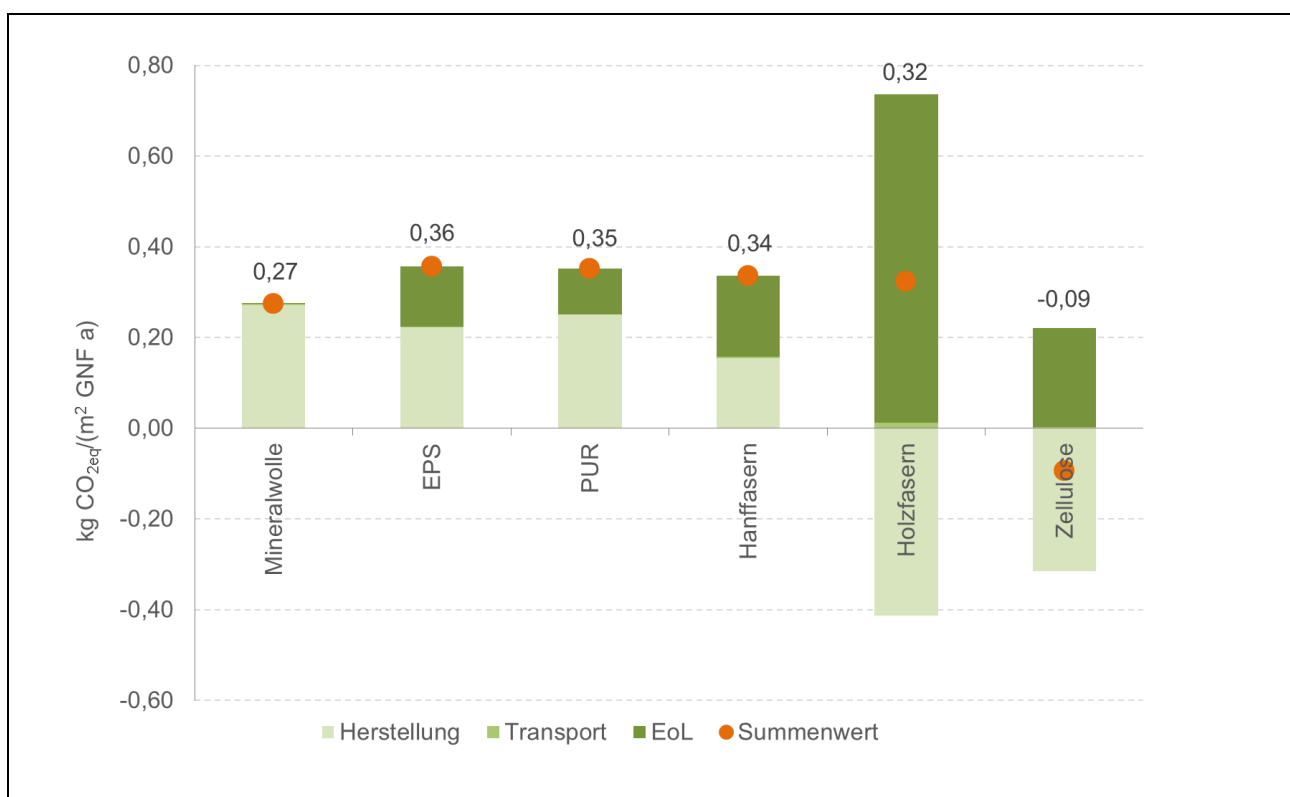


Abb. 4.1: CO_{2eq}-Emissionen durch eine Dämmung der Außenwand nach Lebenszyklusphasen

Erläuterung: Dargestellt sind die CO_{2eq}-Emissionen pro m² GNF und Jahr, die während der Lebenszyklusphasen Herstellung, Transport und EoL bei Verwendung der Dämmmaterialien freigesetzt bzw. gebunden werden. Die Dämmdicken sind entsprechend der WLG auf eine 12 cm-EPS-Dämmung angepasst. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer von Haus und Dämmmaterialien von 40 Jahren. Die Zahlen oberhalb der Säulen beziffern die Summe der CO_{2eq}-Emissionen über alle Lebenszyklusphasen.

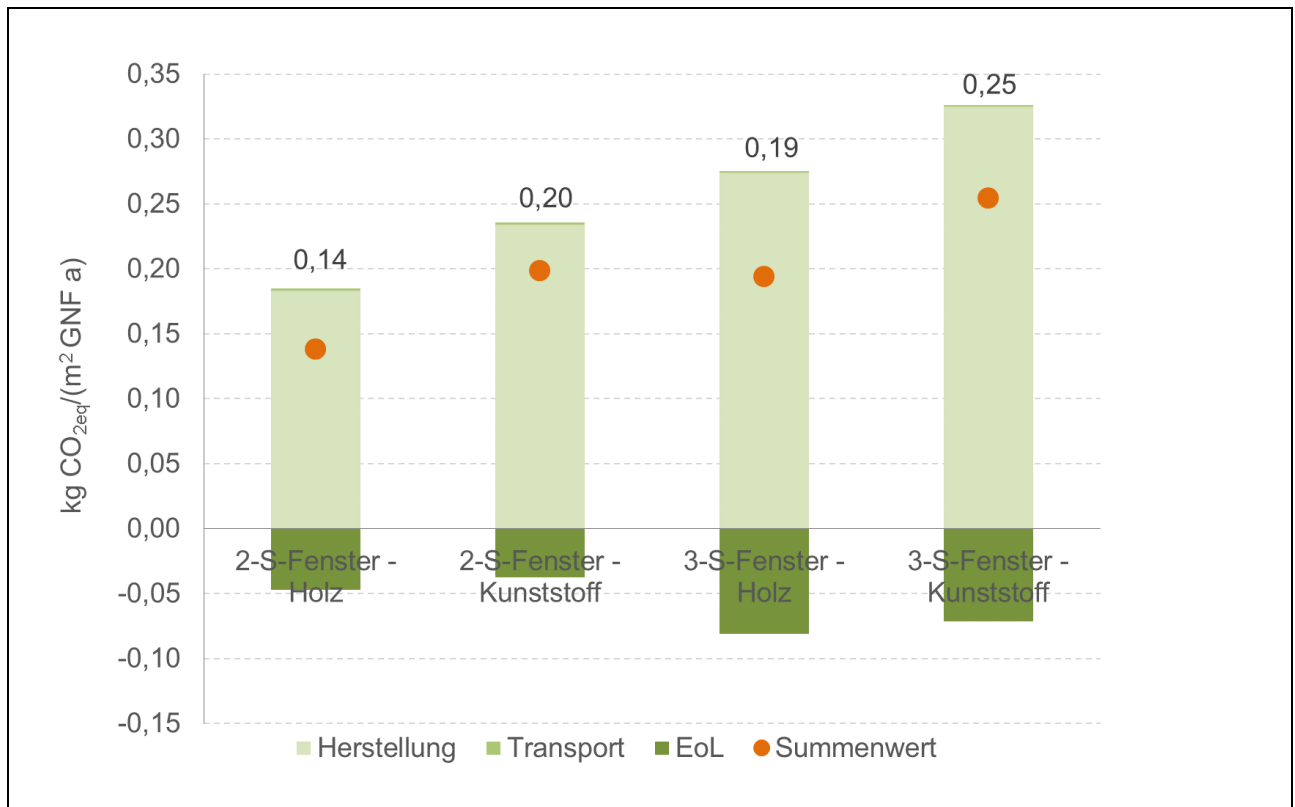


Abb. 4.2: CO_{2eq}-Emissionen durch den Einsatz neuer Fenster nach Lebenszyklusphasen

Erläuterung: Dargestellt sind die CO_{2eq}-Emissionen pro Quadratmeter GNF und Jahr, die während der Lebenszyklusphasen Herstellung, Transport und EoL bei Verwendung verschiedener Dämmmaterialien freigesetzt bzw. gebunden werden. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer des Hauses von 40 Jahren und Nutzung der Fenster von 30 Jahren. Die Zahlen oberhalb der Säulen beziffern die Summe der CO_{2eq}-Emissionen über alle Lebenszyklusphasen.

die CO_{2eq}-Emissionen, die während der genannten Lebenszyklusphasen bei Einsatz unterschiedlicher Materialien freigesetzt bzw. gebunden werden. Bei Dämmmaterialien, die auf Holz und Zellulose basieren, überwiegt in der Herstellungsphase die CO₂-Einbindung durch die Biomasseprimärproduktion (bzw. die CO₂-Speicherung im Recyclingprodukt Altpapier). Bei Hanf überwiegen während der Herstellungsphase hingegen die CO_{2eq}-Emissionen, vermutlich da bei Hanfvlies in nicht unerheblichen Umfang Polyesterfasern eingesetzt werden. Da bei auf NaWaRo basierenden ebenso wie bei auf Erdöl basierenden Dämmmaterialien eine Verbrennung in einer MVA als EoL angenommen ist, werden in dieser Lebenszyklusphase relevante Mengen an CO_{2eq} freigesetzt. Die Unterschiede zwischen den auf NaWaRo und Erdöl basierenden Materialien erklären sich vor allem über die deutlich höheren Rohdichten bei den NaWaRo-Dämmstoffen, insbesondere Holz und Zellulose. In allen Fällen ist eine Gutschrift durch die Nutzung der thermischen und elektrischen Energie angerechnet. Mineralwolle sticht insofern hervor, dass ausschließlich in der Herstellungsphase nennenswerte CO_{2eq}-Emissionen freigesetzt werden, die Phasen Transport und EoL (Entsorgung auf der Deponie) können hier vernachlässigt werden. Bei allen Dämmmaterialien abgesehen von Zellulose werden über die drei Lebenszyklusphasen mehr CO_{2eq}-Emissionen freigesetzt als gebunden. Am höchsten sind die Werte bei EPS und PUR, am niedrigsten beim Zellulose-Einblasdämmstoff, Mineralwolle- und Holzfaserdämmstoffen.

Bei den Optionen für neue Fenster (jeweils Holz- vs. Kunststoffrahmen und 2- vs. 3-Scheibenverglasung) zeigt sich, dass Fenster mit Holzrahmen zu geringeren CO_{2eq}-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus führen als Kunststoffrahmen und 2-Scheiben-Fenster zu geringeren als 3-Scheiben-Fenster (s. Abb. 4.2). Vorteile der Holzrahmen ergeben sich vor allem aus der CO₂-Einbindung während der Biomasseprimärproduktion.

Sowohl bei der Betrachtung der Dämmung als auch der Fenster ist bislang die Reduktion des Brennstoffaufwands durch die Senkung des Endenergiebedarfs während der Nutzungsphase noch nicht berücksichtigt. Abb. 4.3 zeigt die CO_{2eq}-Emissionen, die durch Herstellung, Transport und EoL der Maßnahmen entstehen, die CO_{2eq}-Vermeidung durch die Senkung des Endenergiebedarfs sowie den Netto-Effekt aus beidem. Für die Energiebereitstellung wurde in dieser Beispielrechnung ein Gas-Niedertemperaturkessel unterstellt.

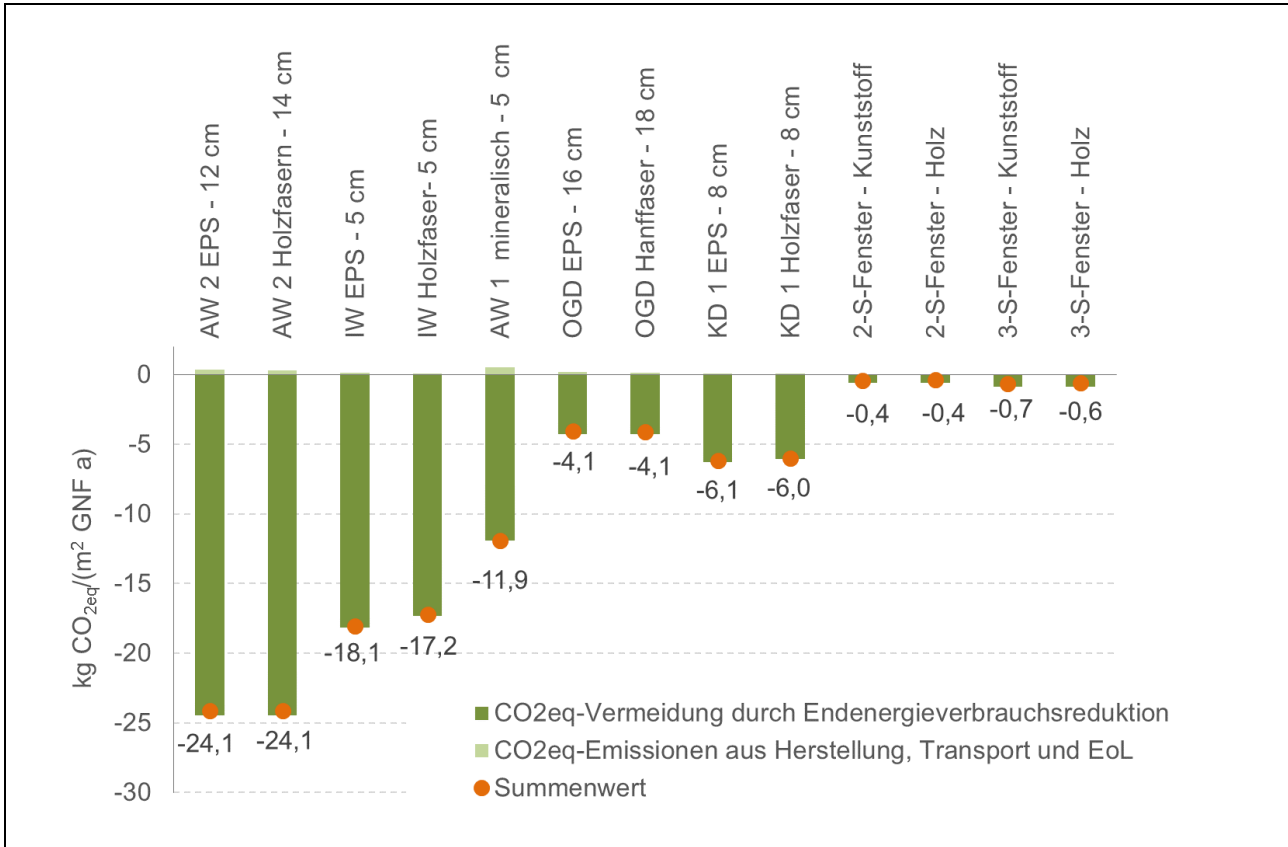


Abb. 4.3: CO_{2eq}-Emissionen und –Vermeidung verschiedener Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle

Erläuterung: Dargestellt sind die CO_{2eq}-Emissionen pro Quadratmeter GNF und Jahr, die während der Lebenszyklusphasen Herstellung, Transport und EoL bei Umsetzung verschiedener Sanierungsmaßnahmen freigesetzt bzw. gebunden werden sowie durch die Endenergieverbrauchsreduktion vermieden werden. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer des Hauses von 40 Jahren und Nutzung der Dämmmaterialien von 40 Jahren sowie der Fenster von 30 Jahren. Die Zahlen unterhalb der Säulen beziffern die Netto-CO_{2eq}-Emissionen. Gebäudeprototyp 1 weist einen Endenergiebedarf von 264 kWh/(m² GNF*a) vor der Sanierung auf. Als Heizungssystem ist ein Gas-Niedertemperaturkessel unterstellt (282 g CO_{2eq}/kWh).

Alle untersuchten Maßnahmen an der Gebäudehülle führen über eine Nutzungsdauer des Gebäudes von 40 Jahren zu einer Netto-Vermeidung an CO_{2eq}-Emissionen. Mittels Fassadendämmung lässt sich die höchste CO_{2eq}-Vermeidung erreichen, es folgen die Innenwanddämmung, der Einsatz von Dämmputz, die Dämmung der obersten Geschosdecke und der Kellerdecke sowie zuletzt der Einsatz neuer Fenster, wobei die Netto-CO_{2eq}-Vermeidung bei der Fenstererneuerung sehr gering ausfällt.

Die Netto-CO_{2eq}-Vermeidung wird über verschiedene Einflussfaktoren bestimmt.

Zwei sehr relevante Faktoren sind die durch die Sanierungsmaßnahme erzielbare Reduktion im Endenergiebedarf sowie die Emissionen, die durch die Maßnahme selbst entstehen. Die durch die Sanierungsmaßnahme

erzielbare Reduktion des Endenergiebedarfs fällt bei der Fassadendämmung am höchsten und beim Fenster-austausch am geringsten aus. Insgesamt haben die Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL der Dämmmaterialien in der Beispielrechnung aufgrund der hohen erzielbaren Endenergiebedarfsreduktion bei diesem Gebäudeprototyp einen eher geringen Einfluss auf den Netto-Effekt. Im Vergleich der 2-Scheiben- mit der 3-Scheiben-Verglasung wird beispielsweise deutlich, dass die 3-Scheiben-Verglasung trotz der höheren $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen in Herstellung, Transport und EoL aufgrund der höheren Endenergiebedarfsreduktion in der Summe Vorteile gegenüber der 2-Scheiben-Verglasung aufweist.

Im Fall der Innendämmung ist die Dämmdicke den Annahmen zufolge auf 5 cm und im Fall der Kellerdeckendämmung auf 8 cm begrenzt. Die Reduktion des Endenergiebedarfs fällt bei der Innen- und Kellerdeckendämmung bei Einsatz von NaWaRo-Dämmstoffen aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit daher geringer aus als bei Einsatz von EPS. Insgesamt ist bei diesen Maßnahmen die $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Vermeidung bei NaWaRo-Dämmstoffen geringer als beim Einsatz von EPS. Bei den anderen Bauteilen wird dieser Effekt durch höhere Dämmdicken bei den NaWaRo ausgeglichen, so dass hier der Vorteil der NaWaRo überwiegt.

Entscheidend für die Höhe der $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Vermeidung während der Nutzungsphase sind zudem das Heizungssystem bzw. die spezifischen $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen pro bereitgestellter Kilowattstunde. Die Beispielrechnung bezieht sich, wie beschrieben, auf einen Gas-Niedertemperaturkessel zur Wärmebereitstellung. Bei Öl-Heizungen fällt die $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Vermeidung aufgrund der höheren spezifischen $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen aus der Ölheizung höher aus, bei auf erneuerbaren Energien basierenden Heizungssystemen geringer (siehe auch Kapitel 4.3).

Eine interessante Kenngröße zur Charakterisierung und Bewertung verschiedener energetischer Sanierungsmaßnahmen ist deren $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Amortisationszeit, sprich der Zeitpunkt, an dem sich die Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL durch die $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Vermeidung in der Nutzungsphase aus Klimaschutzperspektive amortisieren. Abb. 4.4 zeigt am Beispiel der Fassadendämmung mit EPS verschiedener Dämmdicken, wie sich die Netto- $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Vermeidung bei unterschiedlich langer Nutzungsdauer des Gebäudes ändert.

Eine Amortisation der Emissionen aus der Sanierungsmaßnahme selbst wird bei einer Außenwanddämmung mit EPS bereits innerhalb weniger Monate bzw. Jahre erreicht, das heißt diese Maßnahme bewirkt bereits nach einer relativ kurzen Nutzungsdauer aus Klimaschutzperspektive einen positiven Effekt.

Die Darstellung verdeutlicht außerdem, dass die Amortisationszeit bei geringen Dämmdicken zwar kürzer ist, bei längeren Nutzungsdauern zugleich jedoch dickere Dämmstärken zu deutlich höheren $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Reduktionen führen. Ist zu erwarten, dass das konkrete Beispielgebäude noch länger als etwa sechs Jahre genutzt wird, so empfiehlt sich aus Klimaschutzgründen die dickere Dämmung mit 20 cm EPS.

An dieser Stelle ist zu beachten, dass in der Ökobilanzierung Dämmdicken gewählt wurden, die meist zu U-Werten deutlich über $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ führen – eine 20 cm EPS-Dämmung der Außenwand bewirkt beispielsweise einen U-Wert von $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Jochum und Mellwig (2014) haben untersucht, ab welcher Dämmstoffdicke der Primärenergieaufwand für Herstellung, Transport und Montage für einen zusätzlichen Zentimeter an Dämmstoff größer ist als die durch die Wärmeschutzwirkung dieses zusätzlichen Zentimeters eingesparte Primärenergie. Als untere Grenze wurden im Zuge dieser Analysen U-Werte von etwa $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ermittelt. Dies entspricht bei Materialien wie EPS und Mineralwolle einer Dämmdicke von etwa 40 cm, bei PUR-Dämmplatten liegt aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Materials die Grenze bereits bei etwa 25 cm (vgl. auch Bürger und Hesse 2015).

Tab. 4.1 führt die $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Amortisationszeiten für verschiedene Sanierungsmaßnahmen und für die sieben im Projekt betrachteten Gebäudeprototypen auf. Während sich die $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Aufwendungen für die Außenwand- und Kellerdeckendämmung nach meist weniger als einem Jahr amortisieren, sind die Amortisationszeiten bei der Dämmung der obersten Geschossdecke und des Daches (Zwischensparrendämmung) aufgrund der geringeren Energiebedarfsreduktionspotenziale mit zwei bis drei Jahren etwas länger und beim Fensteraustausch mit bis zu 10 Jahren deutlich länger.

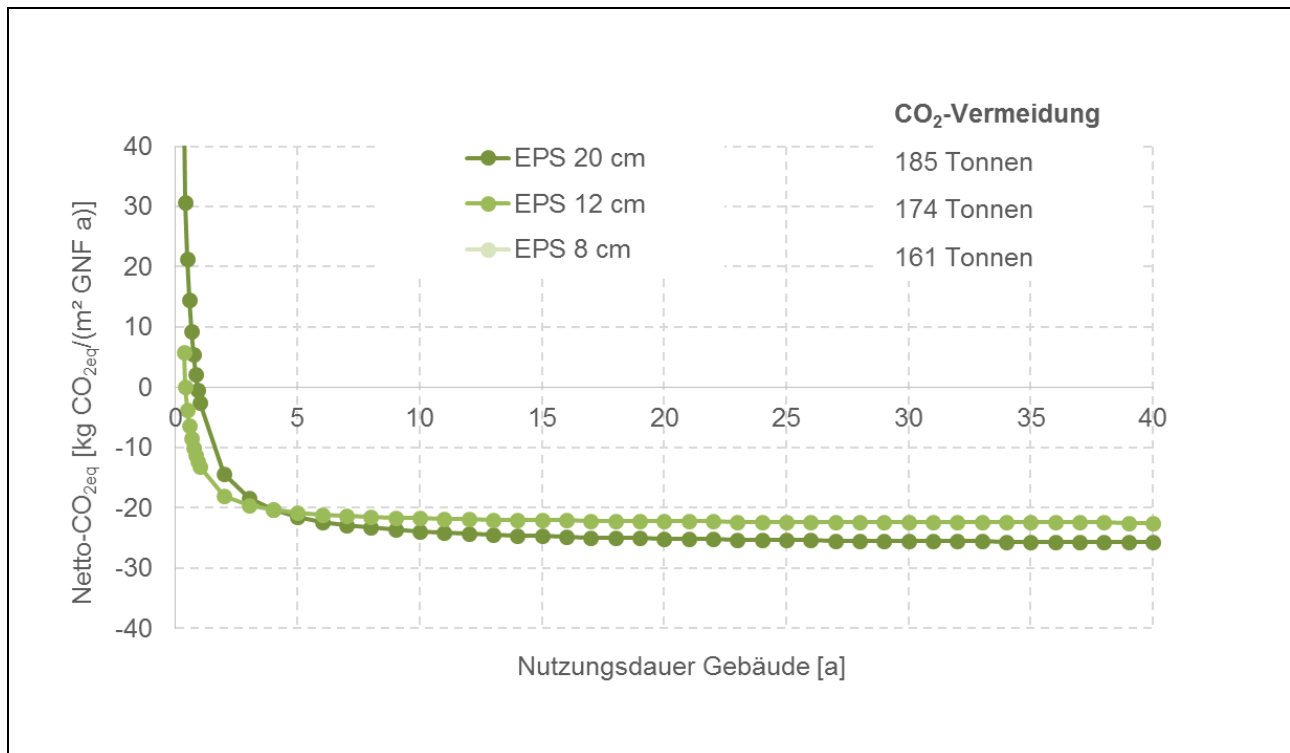


Abb. 4.4: Amortisationszeit aus Klimaschutzperspektive der Fassadendämmung mit EPS

Erläuterung: Dargestellt sind die Netto-CO_{2eq}-Emissionen pro Quadratmeter GNF und Jahr bei Variation der Nutzungsdauer des Gebäudes sowie die CO_{2eq}-Amortisationszeit und die CO_{2eq}-Vermeidung nach 40 Jahren Nutzung. Der Gebäudeprototyp 1 weist einen Endenergiebedarf von 264 kWh/(m²GNF*a) vor der Sanierung auf. Als Heizungssystem ist ein Gas-Niedertemperaturkessel unterstellt.

Tab. 4.1: CO_{2eq}-Amortisationszeiten verschiedener Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle

Quelle: Eigene Berechnung, Amortisationszeit ist dargestellt in Jahren

Maßnahme	GP 1	GP 2	GP 3	GP 4	GP 5	GP 6	GP 7
AW2 EPS 20 cm	< 1	< 1	2	(4)	(3)	< 1	(4)
AW2 Holz 24 cm	< 1	< 1	2	(4)	(3)	< 1	(4)
IW EPS 5 cm	< 1	< 1	< 1	(2)	(2)	< 1	(2)
IW Holz 5 cm	< 1	< 1	< 1	(2)	(2)	< 1	(2)
AW1 min	2	< 1	2	(6)	(4)	< 1	(7)
OGD EPS 24 cm	3	2	–	–	–	3	–
OGD Holz 27 cm	2	2	–	–	–	3	–
Dach EPS 16 cm	–	–	3	–	–	–	–
Dach Holz 16 cm	–	–	2	–	–	–	–
KD1 EPS 8 cm	< 1	< 1	2	–	–	< 1	–

Maßnahme	GP 1	GP 2	GP 3	GP 4	GP 5	GP 6	GP 7
KD1 Holz 8 cm	< 1	< 1	< 1	–	–	< 1	–
3-S-Fenster-Kunst	11	4	4	2	< 1	4	2
3-S-Fenster-Holz	8	3	3	2	< 1	3	2

Dämmungen, die auf Holzfasern basieren, amortisieren sich etwas schneller als auf EPS basierende Dämmungen. Das gleiche gilt für Fenster mit Holzrahmen im Vergleich zu Kunststoffrahmen. Bei den Gebäudeprototypen der Baujahre 1990 bis 2000 sind im Ausgangszustand bereits Dämmungen an den Bauteilen Außenwand, oberste Geschossdecke und Kellerdecke angenommen, so dass die durch die zusätzliche Dämmung erzielbare Energieeinsparung deutlich geringer und die Amortisationszeiten entsprechend länger sind.

Demgegenüber steht wiederum die Netto-CO_{2eq}-Vermeidung, die langfristig nach einer Nutzungsdauer von 40 Jahren erzielt wird (Tab. 4.2). Bei dem freistehenden EZFH mit Baujahr bis 1948 und dem MFH in Ecklage gleichen Baujahrs sind die Unterschiede zwischen den Maßnahmen besonders deutlich. Eine hohe Vermeidung wird durch die Außenwanddämmung erzielt, deutlich geringere Werte durch die Dämmung der obersten Geschossdecke und der Kellerdecke. Die erzielbare CO_{2eq}-Vermeidung durch den Einbau neuer Fenster ist hingegen bei dem EZFH sehr gering – dies passt zu den langen Amortisationszeiten bei diesem Prototypen. Bei dem EZFH in Mittellage gleichen Baujahrs (GP 2) sind die Unterschiede zwischen Außenwanddämmung und Dämmung der obersten Geschossdecke bzw. der Kellerdecke wesentlich geringer, da aufgrund der geringeren Fassadenfläche eine weniger hohe Energieeinsparung erzielt werden kann. Gleiches gilt weniger ausgeprägt für das neuere EZFH mit Baujahr zwischen 1949 und 1990 (GP 3). Bei den Neubauten aus den Baujahren 1991 bis 2000 (GP 4 und 5), bei denen im Ausgangszustand bereits Dämmungen an Außenwand, oberste Geschossdecke und Kellerdecke angenommen sind, fällt die Netto-CO_{2eq}-Vermeidung deutlich geringer aus. Eine zusätzliche CO_{2eq}-Vermeidung kann hier vor allem durch den Fensteraustausch erzielt werden. Die Vermeidung ist hier sogar höher als bei den älteren Gebäuden, da bei den älteren Gebäuden die Wärmeverluste bei Fensteraustausch von den Fenstern zu anderen Bauteilen verschoben werden.

Tab. 4.2: Netto-CO_{2eq}-Vermeidung verschiedener Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle nach einer Nutzungsdauer von 40 Jahren

Quelle: Eigene Berechnung, in Tonnen

Maßnahme	GP 1	GP 2	GP 3	GP 4	GP 5	GP 6	GP 7
AW2 EPS 20 cm	185	75	104	(35)	(14)	316	(46)
AW2 Holz 24 cm	186	75	104	(35)	(14)	316	(47)
IW EPS 5 cm	130	57	63	(14)	(4)	186	(17)
IW Holz 5 cm	130	57	63	(14)	(4)	186	(18)
AW1 min	86	59	78	(20)	(10)	249	(23)
OGD EPS 24 cm	31	44				53	
OGD Holz 27 cm	31	44				54	
Dach EPS 16 cm			33				
Dach Holz 16 cm			33				

Maßnahme	GP 1	GP 2	GP 3	GP 4	GP 5	GP 6	GP 7
KD1 EPS 8 cm	44	44	23			62	
KD1 Holz 8 cm	43	43	22			60	
3-S-Fenster-Kunst	3	6	11	31	32	32	91
3-S-Fenster-Holz	3	7	12	32	32	33	92

4.1.2 Weitere Wirkungskategorien, Normierung und Gewichtung

Die bislang dargestellten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Wirkungskategorie Treibhausgas-effekt. Für eine umfassende ökologische Bewertung werden als weitere Wirkungskategorien Verknappung von abiotischen Ressourcen (fossile Energieträger, ADPF), Verknappung von abiotischen Ressourcen (Stoffe, ADPE), Versauerung von Boden und Wasser (AP), Ozonabbau (ODP), Eutrophierung (EP) und photochemische Ozonbildung (POCP) betrachtet. Um die Wirkungskategorien miteinander vergleichbar zu machen, erfolgte eine Normierung auf die jeweiligen Gesamtemissionen im Jahr 2000 in EU 25+3.

Die Ergebnisse zeigen, dass beim Einsatz von Dämmstoffen die Wirkungskategorien EP und ODP im Vergleich zu den anderen Wirkungskategorien deutlich weniger relevant sind (s. Abb. 4.5).

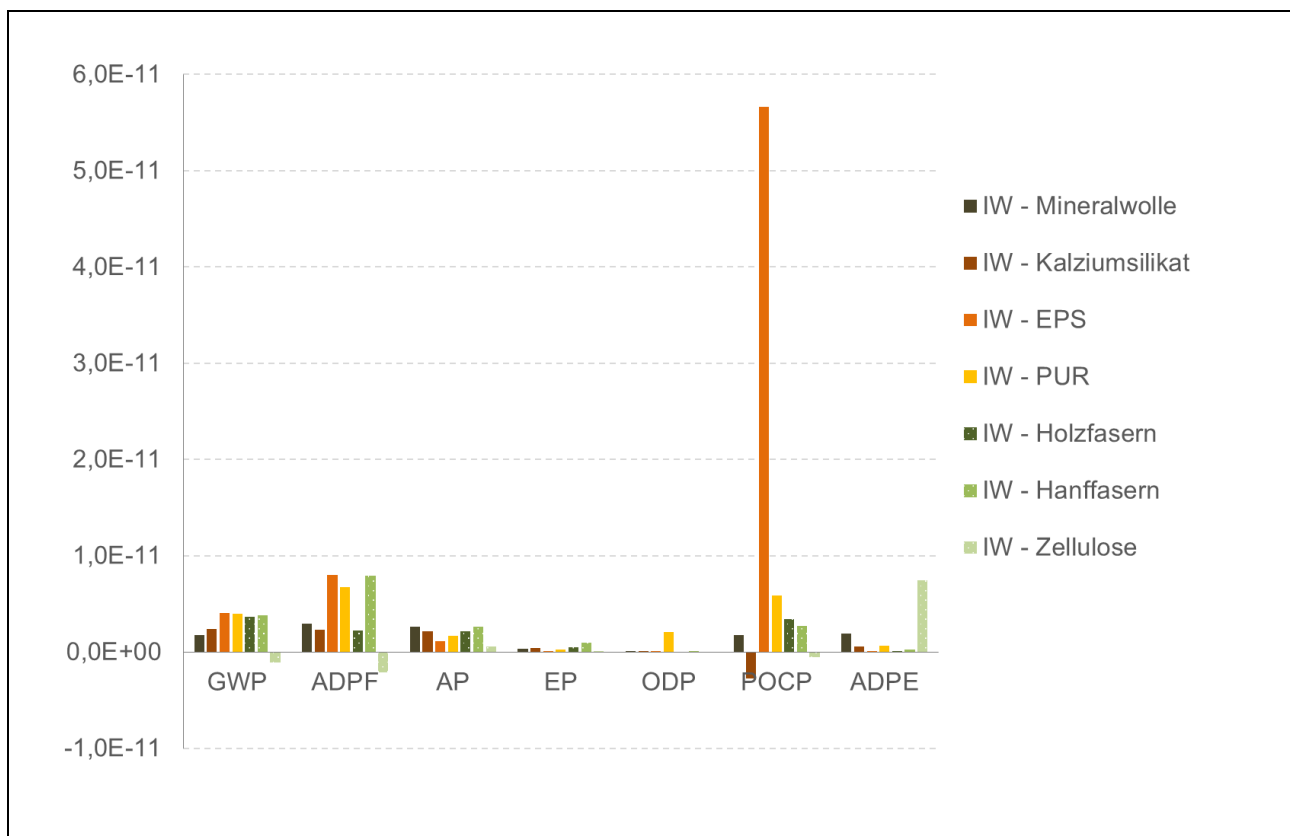


Abb. 4.5: Normierte Emissionen verschiedener Dämmmaterialien bei Einsatz zur Innendämmung

Erläuterung: Die Dämmdicken der Dämmmaterialien wurden basierend auf den WLG jeweils so angepasst, dass sie einer fünf cm dicken Dämmung mit EPS entsprechen. Es sind ausschließlich die Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL der Dämmmaterialien berücksichtigt, nicht die der Nutzungsphase (Reduktion des Endenergiebedarfs). Die Werte beziehen sich auf ein Gebäude des Gebäudeprototypen 1.

In der Wirkungskategorie ODP führt PUR zu einem verhältnismäßig hohen Wert. In der Wirkungskategorie AP schneiden die Dämmmaterialien recht ähnlich ab, EPS und Zellulose fallen mit verhältnismäßig geringen Werten auf. Die Werte der auf mineralischen Rohstoffen und der anderen auf NaWaRo basierenden Rohstoffe sind im Vergleich zu den anderen Dämmmaterialien tendenziell höher.

Deutliche Unterschiede bestehen vor allem in den Wirkungskategorien GWP, ADPF, POCP und ADPE. Ein Zusammenhang besteht zwischen den Wirkungskategorien GWP und ADPF. Erzielen Dämmmaterialien hohe Werte beim ADPF, so sind zumeist auch die CO_{2eq} -Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL hoch. Die auf Erdöl basierenden Dämmstoffe EPS und PUR weisen höhere Werte auf als Mineralwolle, Kalziumsilikat und die auf NaWaRo basierenden Materialien. Eine Ausnahme stellt hier Hanf dar - vermutlich aufgrund des relativ hohen Polyesterfaseranteils.

Bei der Wirkungskategorie POCP fällt auf, dass EPS einen sehr viel höheren Wert aufweist als die anderen Dämmmaterialien. Dies ist auf den Einsatz von Pentan als Treibmittel in der EPS-Herstellung zurückzuführen. Pentan zählt zu den VOC und stellt gemeinsam mit den Stickoxiden eine Vorläufersubstanz für die Bildung von Photooxidantien dar. In der Wirkungskategorie ADPE bestehen ebenfalls erkennbare Unterschiede. Während EPS, Holzfasern und Hanffasern nur sehr geringe Werte aufweisen, führen Mineralwolle, Kalziumsilikat, PUR und vor allem Zellulose zu etwas höheren Werten. Mineralwolle und Kalziumsilikat basieren auf mineralischen Ressourcen, so dass die hohen Werte selbsterklärend sind, PUR beinhaltet Mineralvliesdeckschichten, die unter anderem aus Kalziumkarbonat und Glasfaservlies bestehen. Der hohe Wert bei Zellulose kann nur über die Zugabe an Borsalzen (ca. 20 %) im Herstellungsprozess erklärt werden.

Im nachfolgenden Schritt erfolgte wie in Kapitel 2 beschrieben eine Zusammenführung und Gewichtung der verschiedenen Wirkungskategorien, wobei zwei unterschiedliche Sets für die Gewichtungsfaktoren herangezogen wurden, um die Robustheit der Ergebnisse zu überprüfen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Rangfolge der Dämmstoffe unabhängig von der Gewichtungsmethode weitgehend konstant ist (s. Abb. 4.6).

EPS erhält den aus ökologischer Perspektive schlechtesten Rang, es folgen PUR, Hanffasern, Holzfasern und Mineralwolle. Da Zellulose bei GWP und ADPF negative Werte erzielt, ist der gewichtete Wert bei hoher Gewichtung dieser Kategorien, wie es bei EPA und BEES der Fall ist, geringer als ohne Gewichtung, so dass

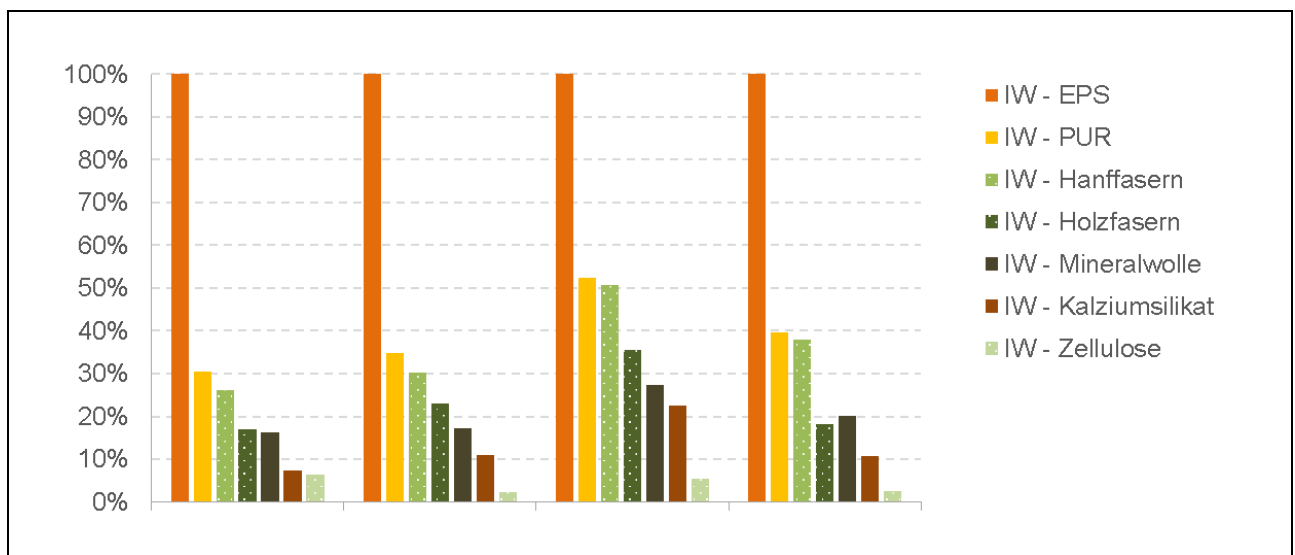


Abb. 4.6: Gewichtung der Wirkungskategorien für verschiedene Dämmstoffe (Innendämmung)

Erläuterung: Die Dämmdicken der Dämmmaterialien wurden basierend auf den WLK jeweils so angepasst, dass sie einer fünf cm dicken Dämmung mit EPS entsprechen. Zur Erläuterung der Gewichtungsfaktoren siehe Kapitel 2. Der Wert für EPS wurde mit 100 % festgesetzt und die anderen Dämmmaterialien hierzu ins Verhältnis gesetzt.

Zellulose dann besser abschneidet. Ohne Gewichtung liegen Zellulose und Kalziumsilikat nahezu gleich auf

und erhalten eine sehr günstige ökologische Gesamtbewertung. Bezüglich der Einordnung des Dämmstoffes Zellulose ist zu beachten, dass sich die Bilanzierung auf eine Zellulose-Einblasdämmung bezieht. Zellulosefaserplatten, die alternativ eingesetzt werden können, gehen den Datensätzen der Ökobaudat zufolge mit höheren Umweltwirkungen in allen Wirkungskategorien einher.

Im Zuge der Ökobilanzierung nicht erfasst sind die Wirkungskategorien Ökotoxizität und Humantoxizität. Auch die Problematik der Entsorgung ist nicht hinreichend abgedeckt. Daher wird an dieser Stelle kurz auf Besonderheiten der Dämmstoffe in Bezug auf diese Aspekte eingegangen. Hohe Öko- und Humantoxizitätswerte sind vor allem bei „altem“ EPS zu erwarten, das HBCD als Flammschutzmittel enthält, sowie bei PUR aufgrund des teilweise eingesetzten Flammschutzmittels TCEP. Für neue EPS-Platten, die das Flammschutzmittel Polymer-FR enthalten, gelten die ökotoxikologischen und gesundheitlichen Bedenken nicht in gleichem Maße. Für EPS mit HBCD als Flammschutzmittel kann außerdem die Entsorgung problematisch sein, da ein Recycling nicht möglich ist. Bei EPS und PUR kann es im Brandfall zur Freisetzung toxischer Stoffe kommen, dies ist bei mineralischen Dämmstoffen und in der Regel auch bei NaWaRo nicht der Fall. Bei Mineralwolle sind ebenfalls „alte“ und „neue“ Materialien zu unterscheiden. Während die Stäube „alter“ Mineralwolle als krebs-erzeugend gelten, ist dies für die „neuen“ Mineralwollen nicht der Fall. Auf NaWaRo basierende Dämmstoffe gehen den Ergebnissen der Literaturrecherche zufolge in der Regel mit geringeren Gesundheitsrisiken einher als EPS und PUR. Borsalz, welches in Zellulosedämmstoffen und teilweise in Holzfaserdämmplatten eingesetzt wird, gilt jedoch aus gesundheitlicher Perspektive ebenfalls als bedenklich und ist als schwach wasser-gefährdend eingestuft. Daher sollte bei der Produktwahl auf Borsalz-freie Dämmstoffe geachtet werden.

Die zusätzlichen Erkenntnisse aus der Literaturrecherche zu gesundheitlichen und ökotoxikologischen Aspekten betonen mit Ausnahme von Zellulosefaserdämmstoffen, die aufgrund des Einsatzes von Borsäure als Flammschutzmittel ein hohes Gefahrstoffpotenzial aufweisen (Bürger et al. 2016), die Vorteile der auf NaWaRo basierenden Dämmstoffe vor allem gegenüber EPS und PUR. Nach Einschätzung der Autorinnen sind daher auf NaWaRo basierende Dämmstoffe, vor allem Holzfasern, sofern aufgrund der realisierbaren Dämm-dicken machbar, insbesondere gegenüber synthetischen Dämmstoffen zu bevorzugen.

4.2 Heizungssysteme

4.2.1 CO_{2eq}-Emissionen

Ebenso wie bei den Maßnahmen an der Gebäudehülle erfolgte für die verschiedenen Wärmebereitstellungssysteme eine Differenzierung der freigesetzten CO_{2eq}-Emissionen nach Lebenszyklusphasen Herstellung, Transport, Nutzung und EoL. Anders als bei den Dämmmaßnahmen sind jedoch die CO_{2eq}-Emissionen aus Herstellung, Transport sowie EoL der Heizungssysteme im Vergleich zu den Emissionen während des Betriebs der Anlagen nahezu irrelevant (s. Abb. 4.7).

Die über den gesamten Lebenszyklus höchsten Emissionen verursachen Öl-BW, gefolgt von Gas-BW. Gaswärmepumpen führen ebenfalls zu etwas geringeren Emissionen als Gas-BW. Es folgen Luft-Wärmepumpen, Erdwärmepumpen (Sonden und Kollektoren) sowie zuletzt Pellets und Hackschnitzel-Heizungen. Die mit Erdsonden und Erdkollektoren verbundenen CO_{2eq}-Emissionen unterscheiden sich nicht.

Durch eine Ergänzung der fossil betriebenen Heizungssysteme (Öl-BW, Gas-BW, EWL, EWK und EWS) mit Solarthermieanlagen reduzieren sich die Emissionen um etwa 13 % bei Einsatz zur Trinkwassererwärmung (hier Flachkollektoren) und um etwa 22 % bei Einsatz zur Heizungsunterstützung (hier Vakuumröhrenkollektoren). Werden Pelletkessel um Solarthermieanlagen ergänzt, so ändern sich die Emissionen kaum, bei Hackschnitzelheizungen erhöhen sie sich sogar aufgrund der sehr geringen spezifischen CO_{2eq}-Emissionen dieser Heizungstechnologie. Die Emissionen aus der Herstellung und aus dem Betrieb der Solarthermieanlagen überwiegen hier den Nutzen des reduzierten Hackschnitzelbedarfs.

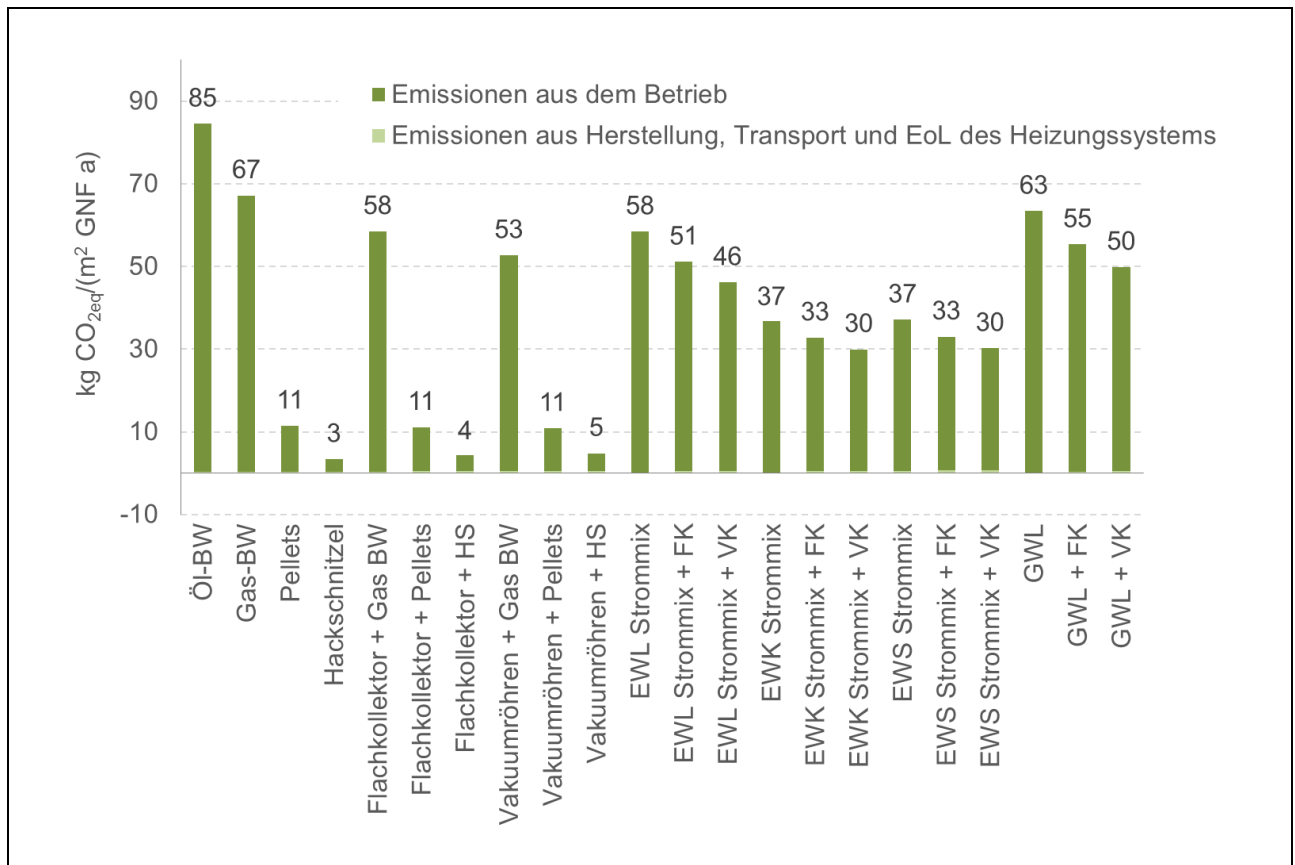


Abb. 4.7: CO_{2eq}-Emissionen verschiedener Heizungssysteme über den gesamten Lebenszyklus

Erläuterung: Dargestellt sind die CO_{2eq}-Emissionen pro Quadratmeter GNF und Jahr, die während der Lebenszyklusphasen Herstellung, Transport und EoL sowie durch den Betrieb der Heizung freigesetzt werden. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer des Hauses von 40 Jahren und der Heizungssysteme von 20 Jahren. Die Zahlen oberhalb der Säulen beziffern die Netto-CO_{2eq}-Emissionen. Gebäudeprototyp 1 weist einen Endenergiebedarf von 264 kWh/(m² GNF*a) auf.

Bezüglich der Wärmepumpen wurde bereits darauf hingewiesen, dass in der Realität teilweise geringere JAZ als COP-Werte erzielt werden (Auer und Schote 2014). Entsprechend ist es möglich, dass sich bei Berücksichtigung der tatsächlich gemessenen JAZ Veränderungen in der Rangfolge ergeben. Beispielsweise ist es aufgrund der Nähe der Emissionsfaktoren möglich, dass die Kombination Gas-BW + Solarthermie (Warmwasserunterstützung) einen geringeren CO_{2eq}-Emissionsfaktor aufweist als Luft-Wärmepumpen. Das bessere Abschneiden der Erd-Wärmepumpen im Vergleich zu Luft-Wärmepumpen bleibt jedoch bestehen, da die im Feldtest gemessenen JAZ der Erd- deutlich über denen der Luft-Wärmepumpen lagen (Auer und Schote 2014).

Üblicherweise werden zur Bewertung von Heizungssystemen aus Klimaschutzsicht die spezifischen CO_{2eq}-Emissionen pro kWh Endenergie herangezogen. Diese Werte finden sich in der folgenden Tabelle, wobei jeweils neben den Emissionen aus dem Betrieb der Anlagen die auf die Nutzungsdauer verteilten Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL einbezogen sind. Die ermittelten CO_{2eq}-Emissionen fallen über alle betrachteten Technologien geringfügig höher aus als in UBA (2013) (vgl. auch Tab. 3.1).

Tab. 4.3: Spezifische CO_{2eq}-Emissionen pro Kilowattstunde Endenergie

Erläuterung: Die Werte beinhalten die CO_{2eq}-Emissionen aus dem Betrieb sowie die auf die Nutzungsdauer verteilten Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL.

Heizungssystem	Ohne Solarthermie	Mit Solarthermie (FK)	Mit Solarthermie (VK)
	[g CO _{2eq} /kWh _{th}]	[g CO _{2eq} /kWh _{th}]	[g CO _{2eq} /kWh _{th}]
Öl-BW	320	278	248
Gas-BW	254	220	198
Pellet-Kessel	42	40	39
Hackschnitzelheizung	11	14	16
EWL	221	192	173
EWL mit PV	132		
EWK	139	123	112
EWK mit PV	77		
EWS	139	123	112
EWS mit PV	77		
GWL	240	208	187

4.2.2 Weitere Wirkungskategorien, Normierung und Gewichtung

Wie bei den Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle erfolgte im nächsten Schritt eine Auswertung aller Wirkungskategorien, inklusive Normierung und Gewichtung (vgl. Kapitel 2.1). Der Schritt der Normierung ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Wirkungskategorien. Die Werte in den einzelnen Wirkungskategorien wurden wiederum auf die jeweiligen Gesamtemissionen im Jahr 2000 in EU 25+3 normiert (s. Abb. 4.8).

Im Hinblick auf das Verhältnis zu den Gesamtemissionen in der EU relevante Wirkungskategorien sind neben ADPF und GWP bei den Heizungstechnologien vor allem POCP und AP. Die Wirkungskategorie ODP weist die geringste Relevanz auf. Die meisten Wärmebereitstellungstechnologien weisen in einigen Wirkungskategorien Vor- und in anderen Kategorien Nachteile auf. Technologien die durchweg positiv abschneiden gibt es kaum – Erd-Wärmepumpen, die zu einem hohen Anteil mit PV-Strom (45 %) betrieben werden, kommen dem am nächsten. Öl-Heizungen schneiden in nahezu allen Wirkungskategorien mit am schlechtesten ab.

Die aus Klimaschutzsicht sehr günstigen Systeme Pellets- und Hackschnitzelheizungen weisen Nachteile in den Wirkungskategorien AP, EP und POCP auf. Zudem führen sie zu hohen Feinstaubemissionen mit entsprechenden gesundheitlichen Risiken (vgl. Kapitel 3.2). Nicht in der Ökobilanzierung enthalten ist eine Bewertung der Potenziale. Diese sind insbesondere bei Pellets begrenzt, so dass ein umfassender Einsatz dieser Heizungstechnologie nicht sinnvoll ist. Außerdem besteht Konkurrenz zum Einsatz der Sägenebenprodukte zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen (FNR 2014). Mit Strom betriebene Wärmepumpen weisen ebenfalls hohe Werte in den Kategorien AP, EP und POCP auf – es sei denn, es kommt anteilig PV-Strom zum Einsatz. Das hohe Versauerungspotenzial ist auf den hohen Kohleanteil im Strommix zurückzuführen. Mit sinkendem Anteil des Kohlestroms im Strommix wird sich die Performance strombetriebener Heizungssysteme in dieser Wirkungskategorie sowie auch in den Wirkungskategorien GWP und ADPF verbessern.

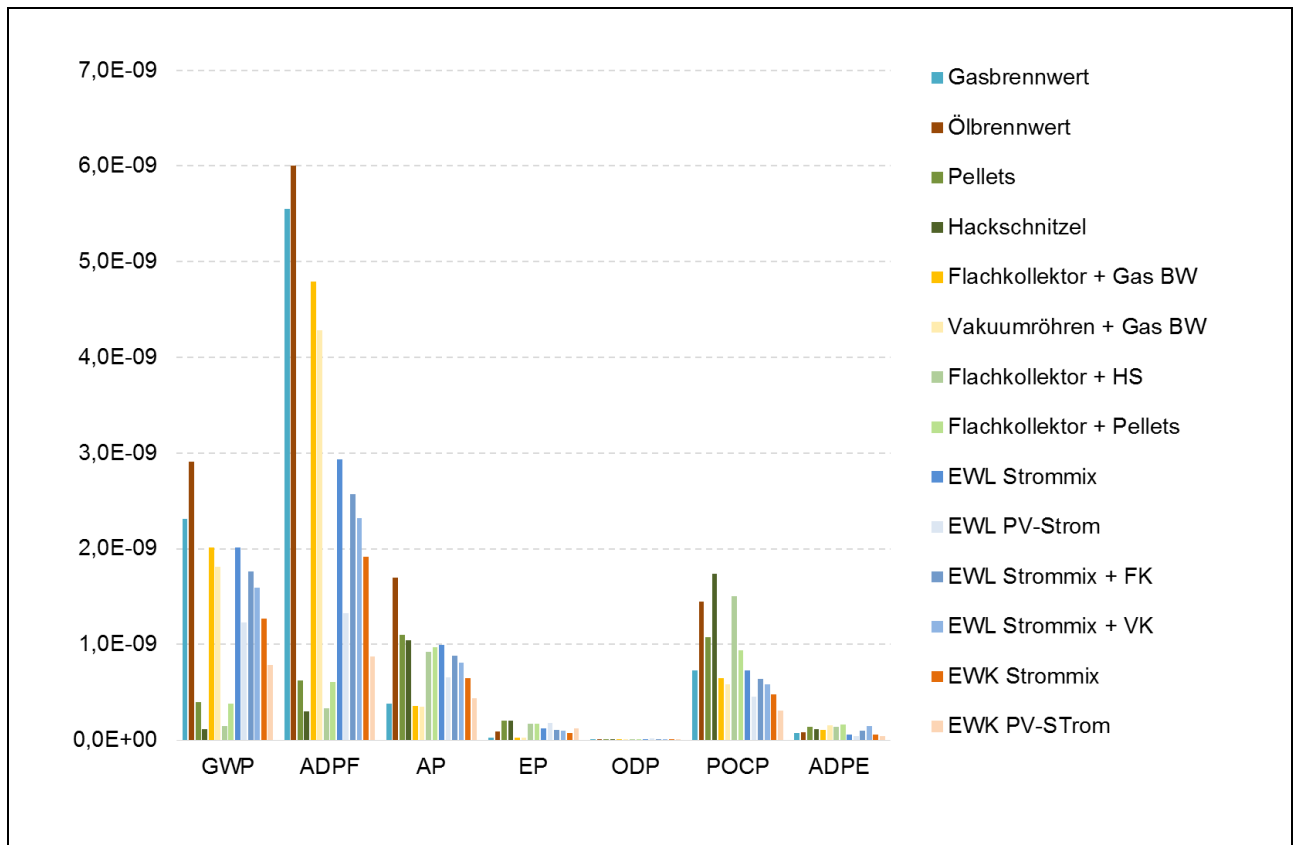


Abb. 4.8: Normierte Emissionen verschiedener Heizungssysteme

Erläuterung: Dargestellt sind die normierten Emissionen der jeweiligen Wirkungskategorien, die während der Lebenszyklusphasen Herstellung, Transport und EoL sowie durch den Betrieb der Heizung freigesetzt werden. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer des Hauses von 40 Jahren und der Heizungssysteme von 20 Jahren. Gebäudeprototyp 1 weist einen Endenergiebedarf von 264 kWh/(m²GNF*a) auf.

Solarthermieanlagen führen aufgrund des geringeren Brennstoffeinsatzes im ergänzenden Heizungssystem und aufgrund der sehr geringen Emissionen während des Betriebs der Solarthermieanlagen selbst zu geringeren Werten in GWP und ADPF als reine fossile Heizungssysteme. Wegen der begrenzten solaren Deckungsgrade liegen die Emissionen jedoch nur um etwa 15 bis 25 % niedriger als die rein fossilen Heizungssysteme. Ähnliches gilt für die Kombination von Solaranlagen mit Pelletkesseln und Hackschnitzelheizungen. Eine Reduktion von GWP und ADPF ist hier aufgrund der sehr niedrigen Werte von Pellets und Hackschnitzeln selbst nicht möglich, jedoch werden Verbesserungen in den Wirkungskategorien AP, EP und POCP erzielt.

Nach Zusammenführung und Gewichtung der Wirkungskategorien erhalten Öl-BW den aus ökologischer Perspektive schlechtesten Rang (s. Abb. 4.9), es folgen Gas-BW, mit Solarthermie ergänzte Gas-BW, die Luft-Wärmepumpen ohne und mit Kombination mit Solarthermie, Erd-Wärmepumpen, Pellet- und Hackschnitzelheizungen ohne und mit Solarthermie sowie zuletzt Erd-Wärmepumpen, die anteilig mit PV-Strom betrieben werden. Letztere erhalten den günstigsten Rang, obwohl die Biomasse-Heizungen in den stark gewichteten Kategorien GWP und ADPF klare Vorteile aufweisen. In allen anderen Kategorien schneiden jedoch die anteilig mit PV betriebenen Wärmepumpen besser ab. Ähnlich wie bei den Dämmstoffen ist die Rangfolge der Heizungstechnologien unabhängig von der Gewichtungsmethode relativ konstant.

In der Summe zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die auf erneuerbaren Energien basierenden Heizungssysteme den konventionellen, auf fossilen Brennstoffen basierenden Heizungssystemen in Hinblick auf die gesamtökologische Bewertung vorzuziehen sind. Insbesondere bei den Luft-Wärmepumpen ist zu beachten, dass die JAZ teilweise geringer ausfällt als der hier unterstellte COP von 3,1. Dies kann dazu führen, dass die

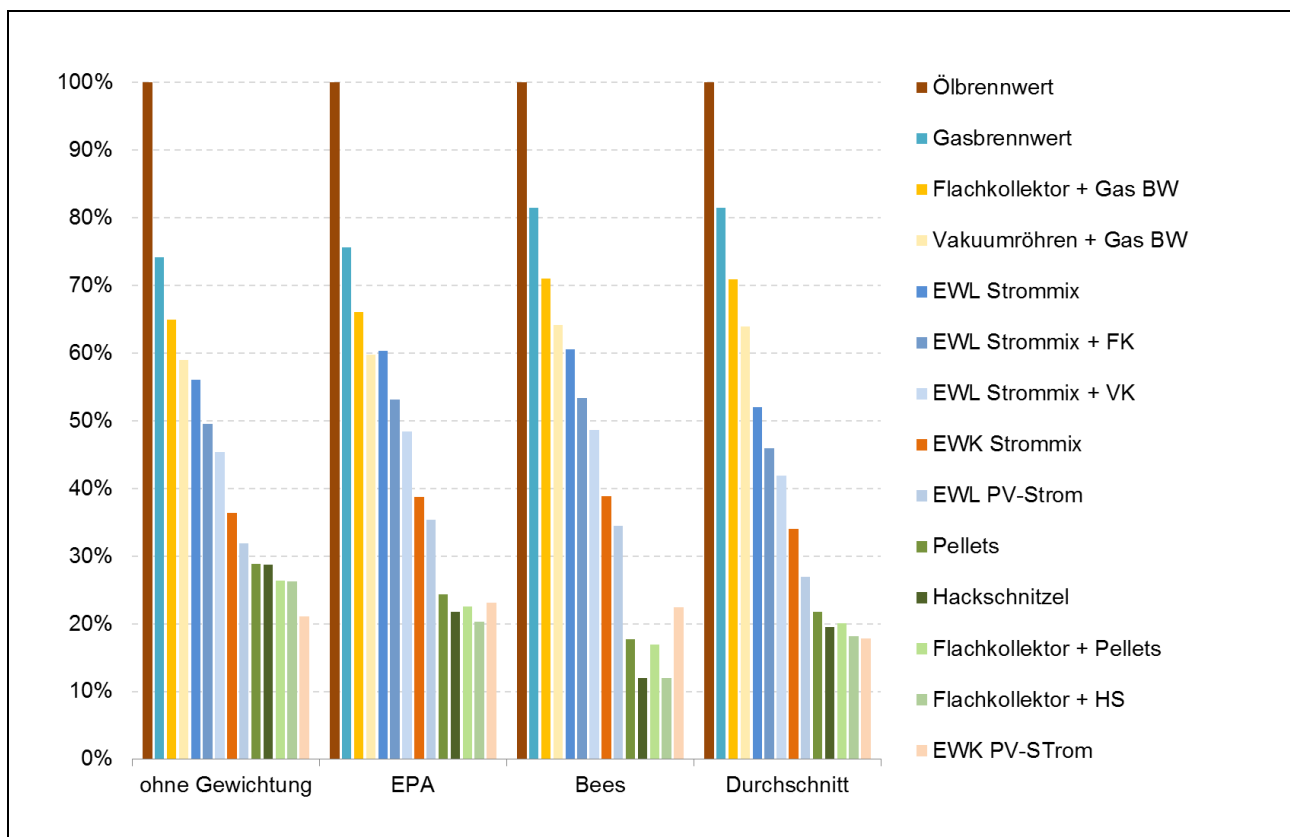


Abb. 4.9: Gewichtung der Wirkungskategorien für verschiedene Heizungssysteme

Erläuterung: Die Emissionen der jeweiligen Wirkungskategorien sind normiert und die Wirkungskategorien gewichtet. Zur Erläuterung der Gewichtungsfaktoren siehe Kapitel 2. Der Wert für Öl-BW wurde mit 100 % festgesetzt und die anderen Heizungssysteme hierzu ins Verhältnis gesetzt. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer des Hauses von 40 Jahren und der Heizungssysteme von 20 Jahren. Gebäudeprototyp 1 weist einen Endenergiebedarf von 264 kWh/(m² GNF*a) auf.

Kombination Gas-BW + Solarthermieanlage (Heizungsunterstützung) in der Summe aus ökologischer Perspektive besser zu bewerten ist als die mit dem aktuellen Strommix betriebene Luftwärmepumpe. Letztlich bestimmen an dieser Stelle die konkreten Rahmenbedingungen des Gebäudes und der Anlagen (erzielte solare Deckungsgrade, erreichte JAZ) über die ökologische Vorteilhaftigkeit des jeweiligen Heizungssystems.

Unterschiede in der ökologischen Qualität der technischen Anlagen bestehen selbstverständlich nicht nur zwischen unterschiedlichen Heizungstechnologien sondern auch innerhalb der Technologien. Der Blaue Engel bietet hier eine gute Orientierung, um besonders emissionsarme, effiziente Geräte zu identifizieren.

4.3 Vergleich der Maßnahmen an der Gebäudehülle und der Heizung sowie Maßnahmenkombinationen

Um die ökologischen Wirkungen von Sanierungspaketen zu ermitteln, wurden am Beispiel des Gebäudeprototypen 1 neben den Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle und am Heizungssystem die folgenden Maßnahmenkombinationen betrachtet: Dämmung an der Außenwand mit 12 cm EPS, Dämmung der obersten Geschossdecke mit 16 cm EPS, Dämmung der Kellerdecke mit 10 cm EPS jeweils in Kombination mit einer Solarthermieanlage (Vakuumröhrenkollektor, 25 % Heizungsunterstützung eines Gas-BW), einem Pelletkessel und einer strombetriebenen Erd-Wärmepumpe (Kollektor). Für ein weiteres Maßnahmenpaket „Dämmung

Kombination plus“ wurden dickere Dämmstärken (AW: 20 cm, oberste Geschossdecke: 24 cm, Kellerdecke: 10 cm) angenommen.

Ein Vergleich der Einzeldämmmaßnahmen mit der Kombi-Dämmmaßnahme verdeutlicht, dass die Kombination der Dämmungen eine höhere $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Vermeidung erzielt als die Summe der Einzelmaßnahmen. Dies kann über eine Verlagerung der Wärmeverluste bei einzelnen gedämmten Bauteilen auf die nicht gedämmten Bauteile erklärt werden. Das Ergebnis betont die Sinnhaftigkeit umfassender Dämmungen.

Die Höhe der Vermeidung von $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen durch die energetische Sanierung der Gebäudehülle hängt maßgeblich vom vorliegenden Heizungssystem, dessen spezifischen $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen und von der erzielten Reduktion des Endenergiebedarfs ab. Gleiches gilt auch für die anderen Wirkungskategorien. Die Kombination der Dämmung von Außenwand, oberster Geschossdecke und Kellerdecke führt beispielsweise zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs und entsprechend auch der $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen um etwa 50 %. Liegt bereits ein auf erneuerbaren Energien basierendes Heizungssystem wie eine Erd-Wärmepumpe oder ein Pelletkessel mit geringen spezifischen $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen vor, so fallen die durch die Dämmung zusätzlich vermiedenen Emissionen in Absolutwerten deutlich geringer aus als bei fossilen Heizungssystemen. Wird beispielsweise ein Pelletkessel anstelle des bestehenden Gas-BW installiert, so reduzieren sich die $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen bereits um 80 % ($10 \text{ t CO}_{2\text{eq}}/(\text{Gebäude} \cdot \text{a})$), eine weitere Dämmung der genannten Bauteile erzielt nur eine Reduktion um weitere 10 % (ca. $1 \text{ t CO}_{2\text{eq}}/(\text{Gebäude} \cdot \text{a})$). Eine Dämmung der genannten Bauteile bei Nutzung eines Gas-BW hingegen führt zu einer Vermeidung von $6 \text{ t CO}_{2\text{eq}}/(\text{Gebäude} \cdot \text{a})$.

Gleichzeitig betonen diese Ergebnisse erstens, dass eine auf erneuerbaren Energien basierende Wärmebereitstellung für das Erreichen der Klimaschutzziele insbesondere in Fällen wichtig ist, in denen eine energetische Sanierung der Gebäudehülle aus baulich-technischen oder ökonomischen Gründen nicht umsetzbar ist und zweitens, dass sehr hohe $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Reduktionen nur durch die Kombination der energetischen Sanierung der Gebäudehülle mit einem auf erneuerbaren Energien basierendem Heizungssystem erzielbar sind.

Wie bei den Einzelmaßnahmen wurden weitere Wirkungskategorien berücksichtigt. Um die Wirkungskategorien vergleichbar zu machen, erfolgte eine Normierung auf die jeweiligen Gesamtemissionen im Jahr 2000 in EU 25+3 (s. Abb. 4.10). In allen Wirkungskategorien spiegelt die Rangfolge der Einzeldämmmaßnahmen und der Kombinationen aller Dämmmaßnahmen die jeweils erzielte Endenergieeinsparung wider – sprich die Kombination aller Dämmmaßnahmen mit dickeren Dämmstärken (Dämmung Kombi plus) geht mit den insgesamt geringsten $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen einher und die Dämmung der obersten Geschossdecke mit den höchsten.

Die Unterschiede zwischen den Einzelmaßnahmen und den Maßnahmenpaketen sind in den Wirkungskategorien jedoch unterschiedlich deutlich ausgeprägt. In der Wirkungskategorie POCP beispielsweise liegen die Werte für Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpakete aufgrund der verhältnismäßig hohen Emissionen aus der Herstellung des EPS näher beieinander als in der Wirkungskategorie GWP, da der Vorteil durch die höhere Endenergiebedarfsreduktion durch den größeren Massenbedarf an Dämmmaterial gemindert wird.

Im Vergleich der Dämmmaßnahmen mit den Heizungssystemen führt die Kombination der betrachteten Dämmmaßnahmen bei dem Beispielgebäude des Prototypen 1 zu insgesamt geringeren $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen als die Solarthermieanlage + Gas-BW und die Erd-Wärmepumpe, aber zu höheren als die zu 45 % mit PV-Strom betriebene Erd-Wärmepumpe und der Pelletkessel. Diese Reihenfolge gilt sowohl für die dickeren als auch die weniger dicken Dämmstärken (Vergleich Dämmung Kombi und Dämmung Kombi plus). Beim ADPF schneidet nur die Solarthermieanlage schlechter ab als die Kombination aller Dämmmaßnahmen. In den Wirkungskategorien AP, EP und ADPE schneiden die Dämmmaßnahmen besser ab als die hier betrachteten Heizungssysteme. In der Wirkungskategorie POCP verursachen vor allem Pelletkessel hohe Emissionen im Vergleich zu den anderen betrachteten Heizungssystemen und auch den Dämmmaßnahmen.

Die Ergebnisse nach Normierung und Gewichtung verdeutlichen, dass die Kombination aller Dämmmaßnahmen mit einer zu 45 % mit PV betriebenen Erd-Wärmepumpe oder einem Pelletkessel aus ökologischer Perspektive insgesamt am besten abschneidet, gefolgt von der Kombination aller Dämmmaßnahmen mit einer Erd-Wärmepumpe, die mit dem deutschen Strommix betrieben wird (s. Abb. 4.11). Die Unterschiede, die sich

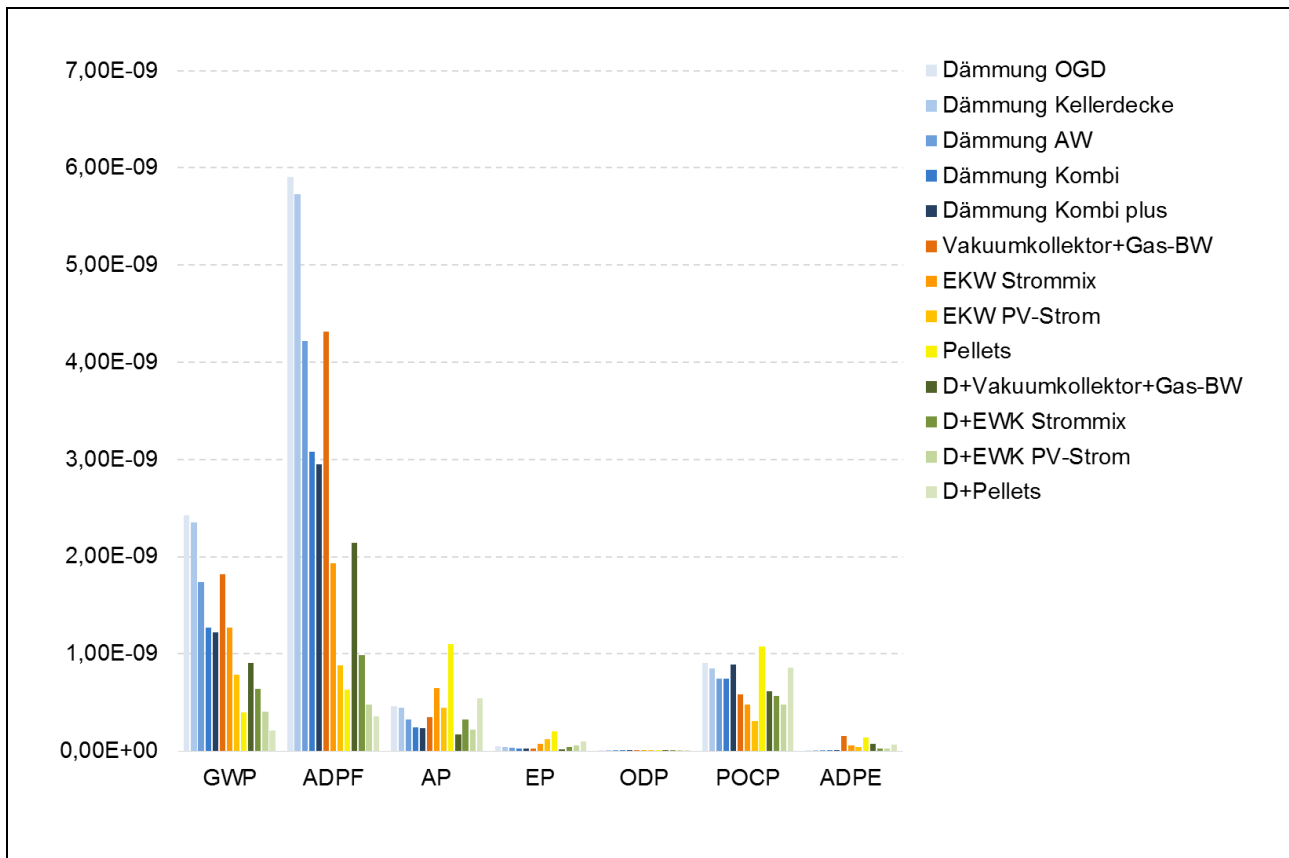


Abb. 4.10: Normierte Emissionen verschiedener Sanierungsmaßnahmen und -pakete

Erläuterung: Dargestellt sind die normierten Emissionen der jeweiligen Wirkungskategorien, die während der Lebenszyklusphasen Herstellung, Transport, Nutzung und EoL der Dämmmaßnahmen und Heizungssysteme freigesetzt werden. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer des Hauses von 40 Jahren und der Heizungssysteme von 20 Jahren. Gebäudeprototyp 1 weist einen Endenergiebedarf von $264 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{GNF} \cdot \text{a})$ auf. Bei den Dämmmaßnahmen wurde als Heizungssystem ein Gas-Niedertemperaturkessel unterstellt ($282 \text{ g CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$).

durch die Anwendung unterschiedlicher Sets an Gewichtungsfaktoren ergeben, sind verhältnismäßig gering, entscheiden jedoch darüber, ob im konkreten Beispiel der Pelletkessel oder die zu 45 % mit PV-Strom betriebene Erd-Wärmepumpe besser bewertet werden.

Jeweils noch günstigere Rangfolgen als die Kombination aller Dämmmaßnahmen mit einer Solarthermieanlage + Gas-BW erzielen der Einsatz einer teils mit PV-Strom betriebenen Erd-Wärmepumpe oder eines Pelletkessels jeweils ohne Dämmung der Gebäudehülle. Es folgen die Erd-Wärmepumpe, die ausschließliche Dämmung aller Bauteile, die Dämmung der Außenwand, der Kellerdecke, der Einsatz einer Solarthermieanlage und die Dämmung der obersten Geschossdecke.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich die Rangfolge der Maßnahmen und Maßnahmenpakete ändern kann, wenn die erzielbare Reduktion des Endenergiebedarfs beispielsweise aufgrund des Baujahrs geringer ausfällt, als für das Referenzgebäude des Prototypen 1 berechnet. In der Tendenz weisen auf erneuerbaren Energien basierende Wärmebereitstellungstechnologien bei geringeren Energieeinsparpotenzialen ökologische Vorteile gegenüber umfassenden Dämmungen mit hohen Dämmdicken auf. Beispielsweise ist im Gegensatz zum betrachteten Beispielgebäude (Ausgangszustand: $264 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{GNF} \cdot \text{a})$), Reduktion durch Dämmkombi: $136 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{GNF} \cdot \text{a})$) bei einem Endenergiebedarf im Ausgangszustand von $160 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{GNF} \cdot \text{a})$ und einer Reduktion um nur $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{GNF} \cdot \text{a})$ nach Normierung und Gewichtung der Wirkungskategorien der Einsatz einer mit dem deutschen Strommix betriebenen Erdwärme-

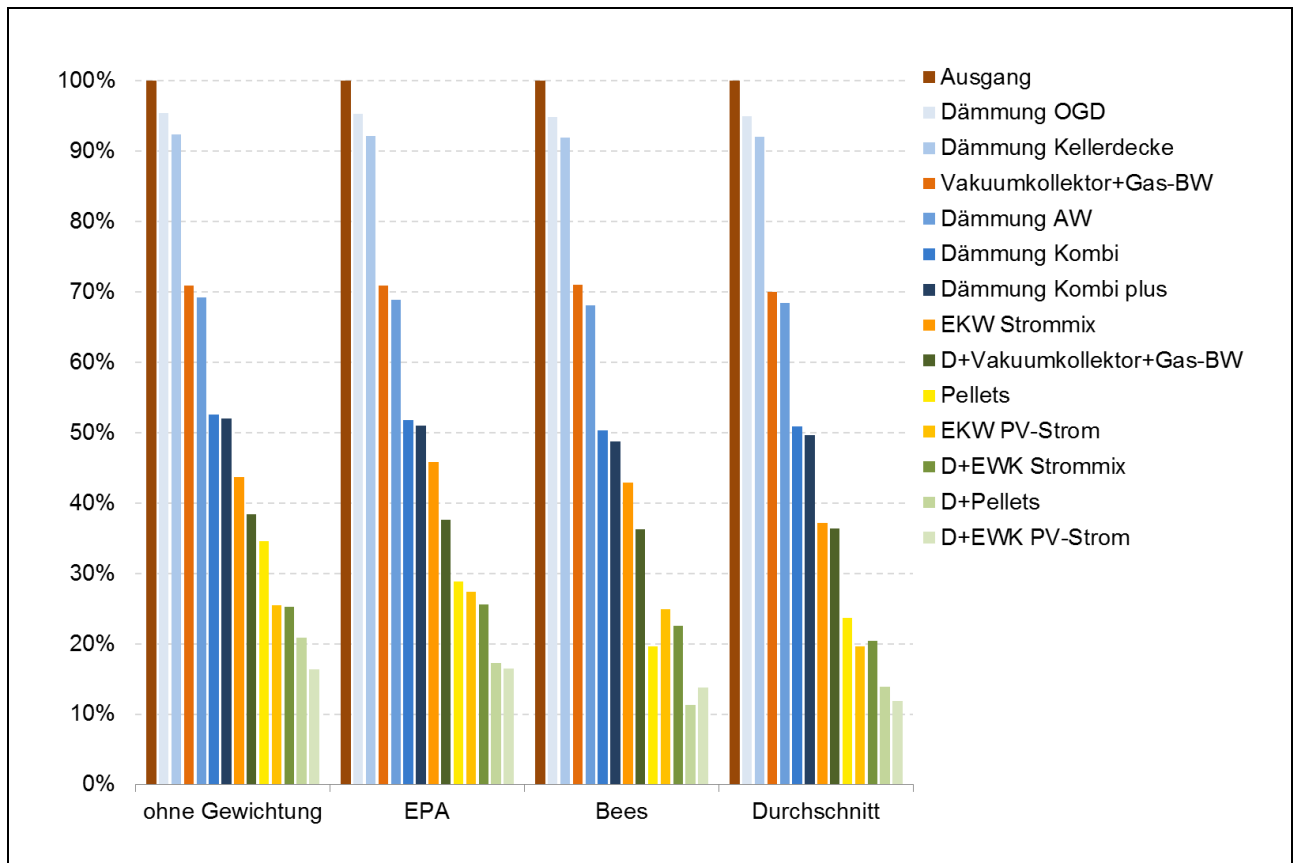


Abb. 4.11: Gewichtung der Wirkungskategorien für Sanierungsmaßnahmen und -pakete

Erläuterung: Die Emissionen der Wirkungskategorien sind normiert und die Wirkungskategorien gewichtet. Zur Erläuterung der Gewichtungsfaktoren siehe Kapitel 2. Der Wert für den Ausgangszustand des Gebäudes wurde mit 100 % festgesetzt und die nach Sanierung erzielten Endzustände hierzu ins Verhältnis gesetzt. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer des Hauses von 40 Jahren und der Heizungssysteme von 20 Jahren. Gebäudeprototyp 1 weist einen Endenergiebedarf von 264 kWh/(m² GNF*a) vor der Sanierung auf. Als Heizungssystem vor der Sanierung ist ein Gas-Niedertemperaturkessel unterstellt.

pumpe eindeutig der Kombination aller Dämmmaßnahmen mit einer Solarthermieanlage + Gas-BW vorzuziehen (s. Abb. 4.12). Ebenso schneidet bei geringerer Endenergiebedarfsreduktion die Solathermieanlage + Gas-BW besser ab als die Kombination der Dämmmaßnahmen. Die Unterschiede in der Rangfolge lassen sich zum einen durch die geringere Endenergiebedarfsreduktion durch die Dämmung und zum anderen durch das insgesamt niedrigere Niveau des Endenergiebedarfs erklären. Letzteres führt dazu, dass die hohen Werte einiger auf erneuerbaren Energien basierender Heizungssysteme in bestimmten Wirkungskategorien, wie beispielsweise das hohe Versauerungspotenzial strombetriebener Wärmepumpen, weniger stark ins Gewicht fallen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass auf NaWaRo basierende Dämmstoffe und auf erneuerbaren Energien basierende Heizungstechnologien den synthetischen Dämmstoffen und den auf fossilen Brennstoffen basierenden Heizungstechnologien vorzuziehen sind. Auch bei erneuerbaren Energien bestehen allerdings Ressourcenrestriktionen und – insbesondere bei Anbaubiomasse – teils hohe Nutzungskonkurrenzen. Während bei Anbaubiomasse Nutzungskonkurrenzen zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion, zur stofflichen Nutzung, zu Alternativen der energetischen Nutzung (Biokraftstoffe, Strom) sowie zum Naturschutz bestehen, begrenzt sich die Konkurrenz bei Solarthermie auf die alternative Nutzung der Dachflächen für PV-Anlagen. Bei Erd-Wärmepumpen existieren Restriktionen durch den Grundwasserschutz und die Nutzung der Flächen

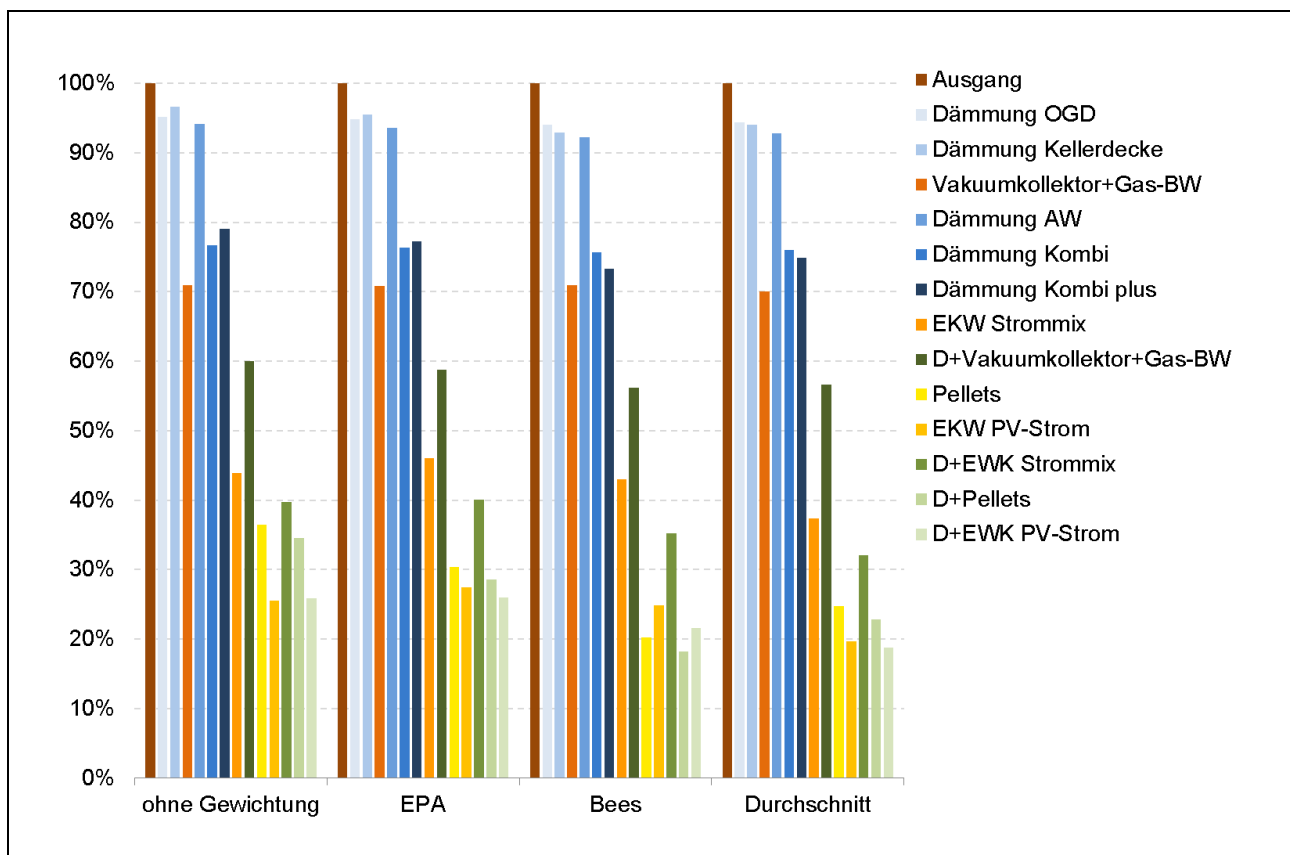


Abb. 4.12: Gewichtung der Wirkungskategorien für Sanierungsmaßnahmen und -pakete (geringe Energiebedarfsreduktion)

Erläuterung: Die Emissionen der Wirkungskategorien sind normiert und die Wirkungskategorien gewichtet. Zur Erläuterung der Gewichtungsfaktoren siehe Kapitel 2. Der Wert für den Ausgangszustand des Gebäudes wurde mit 100 % festgesetzt und die nach Sanierung erzielten Endzustände hierzu ins Verhältnis gesetzt. Die Angaben beziehen sich auf eine Nutzungsdauer des Hauses von 40 Jahren und der Heizungssysteme von 20 Jahren. Das Gebäude weist einen Endenergiebedarf von 160 kWh/(m² GNF*a) vor der Sanierung auf. Als Heizungssystem vor der Sanierung ist ein Gas-Niedertemperaturkessel unterstellt.

für Nachverdichtung und Bauvorhaben (vgl. Bürger und Hesse 2015). Die hohe Nutzungskonkurrenz bei Biomasse sollte dazu führen, dass gebäudebezogene, dezentrale Biomasse-Heizungsanlagen dort eingesetzt werden, wo Alternativen wie Wärmepumpen nicht umgesetzt werden können.

Aufgrund der genannten Restriktionen müssen Transformationsstrategien für die Sektoren Wärme, Strom, Verkehr und Bioökonomie zudem untereinander abgestimmt und mit Zielsetzungen im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Naturschutz gekoppelt werden.

5 Fazit und Schlussfolgerungen

Die energetische Gebäudesanierung als zentraler Baustein zur Erreichung der Klimaschutzziele umfasst energieverbrauchsreduzierende **Maßnahmen an der Gebäudehülle** (Dämmung von Fassaden, Innenwänden, Dächern, obersten Geschossdecken, Kellerdecken sowie Einbau neuer Fenster) sowie den Einsatz effizienter und auf erneuerbaren Energie basierenden **Wärmebereitstellungstechnologien**.

Ziel dieses Hintergrundpapiers ist es, Informationen zur ökologischen Bewertung der zahlreichen energetischen Sanierungsmaßnahmen sowie unterschiedlicher Dämmmaterialien zur Verfügung zu stellen. Die ökologische Bewertung gibt Auskunft über einzelne Wirkungskategorien – neben dem Treibhausgaseffekt, die Verknappung fossiler Energieträger, Verknappung von abiotischen Ressourcen (Stoffe), Versauerung von Boden und Wasser, Ozonabbau, globale Erwärmung, Eutrophierung und photochemische Ozonbildung. Darüber hinaus ermöglicht sie es, durch eine Gewichtung der Wirkungskategorien Rangfolgen abzuleiten. Da Daten zu den Wirkungskategorien Human- und Ökotoxizität fehlen, wurden gesundheitliche und ökotoxikologische Aspekte in dieser Arbeit über eine Literaturrecherche und -auswertung qualitativ bewertet.

In der Ökobilanzierung wurden außerdem die Lebenszyklusphasen **Herstellung, Transport, Nutzung und EoL** differenziert, um die Herkunft der Emissionen nachvollziehen zu können. Die Ergebnisse zu den Heizungssystemen zeigen, dass die Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL im Vergleich zur Nutzungsphase vernachlässigbar sind. Bei den Dämmmaßnahmen sind die $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Amortisationszeiten, sprich der Zeitraum, nachdem sich die Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL durch die infolge des geringeren Endenergiebedarfs reduzierten $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen während der Nutzung amortisiert haben, mit wenigen Monaten bzw. Jahren ebenfalls kurz. Eine Dämmung lohnt sich aus Klimaschutzperspektive demnach meist auch bei kurzen Nutzungsdauern von Gebäuden in schrumpfenden Regionen. Eine Ausnahme stellen die Maßnahme Fensteraustausch sowie neue Gebäude dar, die bereits Dämmungen aufweisen. Zusätzliche Dämmungen amortisieren sich bei diesen Gebäuden erst nach mehreren Jahren. Neue Fenster amortisieren sich ebenfalls – auch bei älteren Gebäuden – erst nach mehreren Jahren, wobei berücksichtigt ist, dass bei alten Gebäuden in den vergangenen Jahren bereits mehrheitlich ein Fensteraustausch erfolgte.

Insgesamt lässt sich im Vergleich der verschiedenen Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle mittels Fassadendämmung die höchste Endenergieeinsparung und somit auch die höchste $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Vermeidung erreichen, es folgen die Innenwanddämmung, der Einsatz von Dämmputz, die Dämmung der obersten Geschossdecke bzw. des Daches und der Kellerdecke sowie zuletzt der Einsatz neuer Fenster.

Bei der **Wahl der Dämmmaterialien** spielen diverse Materialeigenschaften eine Rolle. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung erlauben für die Auswahl der betrachteten Materialien (Mineralwolle, Kalziumsilikat, EPS, PUR, Holzfasern, Hanffasern, Zellulose) einige Schlussfolgerungen aus ökologischer Perspektive. Die Wirkungskategorien EP und ODP sind im Vergleich zu den anderen Wirkungskategorien weniger relevant. In der Wirkungskategorie AP fallen EPS und Zellulose mit verhältnismäßig geringem Versauerungspotenzial auf, wohingegen die mineralischen Rohstoffen, Holz- und Hanffasern Rohstoffe Nachteile aufweisen. Deutliche Unterschiede bestehen vor allem in den Wirkungskategorien GWP, ADPF, POCP und ADPE. Die synthetischen Dämmstoffe EPS und PUR weisen die höchsten Werte in den Kategorien GWP und ADPF auf. Bei EPS ist das hohe Potenzial zur photochemischen Ozonbildung hervorzuheben, das auf den Einsatz von Pentan als Treibmittel in der Herstellung zurückzuführen ist. In der Wirkungskategorie ADPE haben vor allem Mineralwolle, Kalziumsilikat, PUR und Zellulose vergleichsweise hohe Potenziale zur Ressourcenverknappung. Nach Gewichtung der Wirkungskategorien nimmt EPS den aus ökologischer Perspektive schlechtesten Rang ein, es folgen PUR, Hanffasern, Holzfasern, Mineralwolle, Kalziumsilikat und Zellulose. Der Einsatz verschiedener Sets an Gewichtungsfaktoren und der Vergleich der Ergebnisse führt zu kaum abweichenden Schlussfolgerungen. Ausschließlich Zellulose und Kalziumsilikat tauschen die Rangfolge. Die aus der Literaturrecherche stammenden Erkenntnisse zu den gesundheitlichen und ökotoxikologischen Effekten betonen die Vorteile von

Dämmstoffen auf Basis von NaWaRo (mit Ausnahme von Dämmstoffen auf Basis von Zellulose) insbesondere im Vergleich zu EPS und PUR.

Entscheidend für die ökologische Bewertung der **Wärmebereitstellungstechnologien** sind die spezifischen CO_{2eq}-Emissionen pro Kilowattstunde (inkl. Emissionen aus Herstellung, Transport und EoL). Die höchsten Emissionen weisen Öl-Brennwertkessel auf, gefolgt von Gas-Brennwertkesseln, Gaswärmepumpen, Luft-Wärmepumpen, Erd-Wärmepumpen (Sonden und Kollektoren) sowie zuletzt Pellets und Hackschnitzel-Heizungen. Solarthermieanlagen tragen jeweils zu einer Reduktion der Emissionen um etwa 10 bis 25 % bei, je nachdem ob sie zur Trinkwassererwärmung oder Heizungsunterstützung eingesetzt werden. Werden Pelletkessel oder Hackschnitzelheizungen um Solarthermieanlagen ergänzt, so ändern sich die Emissionen aufgrund der sehr geringen spezifischen CO_{2eq}-Emissionen der Biomasse-Heizungen kaum. Ob Luft-Wärmepumpen oder die Kombination Gas-BW + Solarthermie zu geringeren CO_{2eq}-Emissionen führen, hängt letztlich auch von den konkreten Rahmenbedingungen an den Gebäude und Anlagen (erzielbare solare Deckungsgrade, erreichte Jahresarbeitszahl) ab und kann nicht pauschal bewertet werden.

Die anschließende Normierung verdeutlicht, dass relevante Wirkungskategorien neben ADPF und GWP bei den Heizungstechnologien vor allem POCP und AP sind. Die meisten Wärmebereitstellungstechnologien weisen in einigen Wirkungskategorien Vor- und in anderen Kategorien Nachteile auf. Eine Technologie, die in nahezu allen Wirkungskategorien positiv abschneidet, sind Erd-Wärmepumpen, die teilweise mit PV-Strom (hier 45 % des Strombedarfs) betrieben werden. Die aus Klimaschutzsicht sehr günstigen Systeme Pellets- und Hackschnitzelheizungen weisen Nachteile in den Wirkungskategorien AP, EP und POCP auf. Zudem führen sie zu hohen Feinstaubemissionen mit entsprechenden gesundheitlichen Risiken. Eine ergänzende Solarthermieanlage kann die Potenziale in diesen Kategorien um etwa 10 bis 25 % reduzieren. Mit Strom betriebene Wärmepumpen weisen ebenfalls hohe Werte in den Kategorien AP, EP und POCP auf – es sei denn, es kommt anteilig PV-Strom zum Einsatz. Mit sich änderndem Strommix wird sich die Ökobilanz dieser Technologien ändern – z. B. ist ein geringeres Versauerungs- und Treibhauspotenzial bei sinkendem Kohlestromanteil zu erwarten. Nach **Zusammenführung und Gewichtung der Wirkungskategorien** erhalten Öl-Brennwertkessel den aus ökologischer Perspektive schlechtesten Rang, es folgen Gas-Brennwertkessel, mit Solarthermie ergänzte Gas-Brennwertkessel, Luft-Wärmepumpen ohne und mit Solarthermie, Erd-Wärmepumpen, Pellet- und Hackschnitzelheizungen ohne und mit Solarthermie sowie mit der besten ökologischen Gesamtpformance Erd-Wärmepumpen, die zu einem großen Anteil mit PV-Strom betrieben werden.

Insgesamt betonen die Ergebnisse die Vorteilhaftigkeit der auf erneuerbaren Energien basierender Heizungstechnologien im Vergleich zu fossil betriebenen Wärmebereitstellungstechnologien. Nicht in der Ökobilanzierung enthalten ist jedoch eine Bewertung der **Verfügbarkeit der Energieträger und Nutzungskonkurrenzen**. Die Potenziale sind insbesondere bei Pellets begrenzt und die Konkurrenz zur stofflichen Nutzung – auch bezüglich der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen – ist hoch, so dass ein umfassender Einsatz dieser Heizungstechnologie trotz günstigem Abschneiden im Rahmen der Ökobilanzierung nicht sinnvoll ist, sondern ausschließlich dort erfolgen sollte, wo auf erneuerbaren Energien basierende Alternativen fehlen. Unterschiede in der ökologischen Qualität der technischen Anlagen bestehen selbstverständlich nicht nur zwischen unterschiedlichen Heizungstechnologien sondern auch innerhalb der Technologien. Der Blaue Engel bietet eine gute Orientierung, um besonders emissionsarme, effiziente Geräte zu identifizieren.

Durch die **Kombination verschiedener Maßnahmen** ändert sich deren Ökobilanz. Die ökologischen Wirkungen von Sanierungspaketen wurden am Beispiel Dämmung an der Außenwand mit 12 cm EPS plus Dämmung der obersten Geschossdecke mit 16 cm EPS plus Dämmung der Kellerdecke mit 10 cm EPS jeweils in Kombination mit einer Solarthermieanlage (Vakuumröhrenkollektor, Heizungsunterstützung eines Gas-Brennwertkessels), einem Pelletkessel und einer strombetriebenen Erd-Wärmepumpe (Kollektor) untersucht. Die potenzielle CO_{2eq}-Vermeidung durch die energetische Sanierung der Gebäudehülle hängt maßgeblich vom vorliegenden Heizungssystem, dessen spezifischen CO_{2eq}-Emissionen und der erzielbaren Reduktion des Endenergiebedarfs ab. Gleiches gilt auch für die anderen Wirkungskategorien.

Die Dämmung von Außenwand, oberster Geschossdecke und Kellerdecke führt an dem betrachteten Beispielgebäude zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs und entsprechend auch der $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen um etwa 50 %. Aufgrund der geringeren spezifischen $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen beträgt die Reduktion infolge einer Dämmung der genannten Bauteile bei einem Pelletkessel nur etwa $1 \text{ t CO}_{2\text{eq}}/(\text{Gebäude} \cdot \text{a})$, bei einem Gas-Brennwertkessels dagegen $6 \text{ t CO}_{2\text{eq}}/(\text{Gebäude} \cdot \text{a})$. Das Ziel eine möglichst hohe $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Vermeidung zu erreichen und geringe negative ökologische Effekte zu erzielen, lässt sich insbesondere bei Gebäuden mit hohen Energieeinsparpotenzialen allerdings nur über die Kombination der Maßnahmen an Gebäudehülle und Heizungstechnik erreichen. In der Summe liegt die erzielte $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Vermeidung durch die Kombination der Maßnahme Pelletkessel und umfassende Dämmung bei $11 \text{ t CO}_{2\text{eq}}/(\text{Gebäude} \cdot \text{a})$ im Vergleich zum Ausgangszustand. Nach Normierung und Gewichtung der Wirkungskategorien schneidet die Kombination aller Dämmmaßnahmen mit einer zu 45 % mit PV-betriebenen Erd-Wärmepumpe oder einem Pelletkessel ökologisch insgesamt am besten ab, gefolgt von der Kombination aller Dämmmaßnahmen mit einer Erd-Wärmepumpe.

Die **Rangfolge der Maßnahmenpakete hängt** außerdem von den **Gebäudeeigenschaften ab**. Sie kann sich ändern, wenn die erzielbare Reduktion des Endenergiebedarfs beispielsweise aufgrund des Baujahrs geringer ausfällt als für das Referenzgebäude alten Baujahrs berechnet. In der Tendenz schneiden auf erneuerbaren Energien basierende Wärmebereitstellungstechnologien bei geringeren Energieeinsparpotenzialen in der ökologischen Gesamtbewertung besser ab als umfassende Dämmungen mit hohen Dämmdicken. Beispielsweise ist im Gegensatz zum betrachteten Beispielgebäude (Ausgangszustand: $264 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ GNF} \cdot \text{a})$, Reduktion durch Dämmkombination: $136 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ GNF} \cdot \text{a})$) bei einem Endenergiebedarf im Ausgangszustand von $160 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ GNF} \cdot \text{a})$ und einer Reduktion um nur $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ GNF} \cdot \text{a})$ nach Normierung und Gewichtung der Wirkungskategorien der Einsatz einer Solathermieanlage + Gas-BW günstiger zu bewerten als die Kombination der Dämmmaßnahmen. Das Auftreten von Vorteilen erneuerbarer Energien im Vergleich zu umfassenden Dämmungen betrifft insbesondere neuere Gebäude, die aufgrund der Bausubstanz bereits geringere Endenergiebedarfe aufweisen.

6 Literaturverzeichnis

- Al-Hamad, Al-Hamad, V. Nassehi und A.R. Khan (2010): Methane and Other Hydrocarbon Gas Emissions Resulting from Flaring in Kuwait Oilfields. *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 2, Nr. 1: 53–61.
- ASEW [Arbeitsgemeinschaft für sparsame Energie- und Wasserverwendung im VKU] (2008): Wärmedämmung im Überblick.
- Auer, Falk und Herbert Schote (2014): Wärme aus der Umwelt auch gut für die Umwelt?
- BBS [Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.] (2015): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012. Berlin.
- BBSR [Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung] (2010): Wachsende und schrumpfende Gemeinden.
- BBSR [Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)] (2011): Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB).
- BDEW [Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.] (2013): Erdgas-Brennwertheizung: Stand der Technik. <https://www.bdew.de>.
- Beilicke, G. (2010): *Bautechnischer Brandschutz: Brandlastberechnung*. Leipzig: BBV Beilicke Brandschutz Verlag.
- BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2009): Energierohstoffe 2009. Hannover.
- BMVBS [Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung] (2012): Vergleichswerte für Verbrauch bei Wohngebäuden. BMVBS-Online-Publikation, Nr. 11/2012. Berlin.
- Boogman, Philipp und Markus Wurm (2013): Neue methodische natureplus-bestimmungen für Ökobilanzen. *IBOmagazin* 2/13.
- Breitschopf, Barbara (2012): Ermittlung vermiedener Umweltschäden - Hintergrundpapier zur Methodik - im Rahmen des Projekts „Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien“. Fraunhofer ISI.
- Brown, Lawrence S. und Thomas A. Holme (2015): *Chemistry for Engineering Students*. 3. Aufl. Cengage Learning.
- BSB [Bauherren Schutz Bund e.V.] (2014): Solarthermie im Überblick. Ratgeber aktuell, Nr. 16.
- BTE [Bund Technischer Experten] (2008): Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte.
- Bürger, V., T. Hesse, D. Quack, A. Palzer, B. Köhler, S. Herkel und P. Engelmann (2016): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. *Climate Change* 06/2016. Umweltbundesamt.
- Bürger, Veit (2014): Daten im Cluster „Gebäude/Siedlungen“.
- Bürger, Veit und Tilman Hesse (2015): Entwicklungsperspektiven des Gebäudesektors Entwicklungsportfolio im Rahmen der Wissenschaftlichen Koordination des BMBF-Förderprogramms „Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems“. Freiburg: Öko-Institut.
- BWP [Bundesverband Wärmepumpe e.V.] (2012): Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern. Berlin.
- Danner, Herbert (2010): Ökologische Wärmedämmstoffe im Vergleich 2.0. München: Bauzentrum München.
- DEPI [Deutsches Pelletinstitut] (2015): Produktion und Herkunft von Pellets. <http://www.depi.de>.
- DEPI [Deutsches Pelletinstitut] (2016): Pelletmarkt 2015 und Prognose 2016.
- DERA [Deutsche Rohstoffagentur] (2014): Zinn - Angebot und Nachfrage bis 2020.
- Deutsches Kupferinstitut (2006): Die fachgerechte Installation von thermischen Solaranlagen. Düsseldorf.
- DGUV [Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung] (2009): Umgang mit Mineralwolle-Dämmstoffen (Glaswolle, Steinwolle). Handlungsanleitung. Berlin.
- DIN EN 15804:2014-07 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013.
- DIN EN ISO 14040ff Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen sowie Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.
- Döring, Stefan (2011): *Pellets als Energieträger. Technologie und Anwendung*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Drewer, Andreas, Hanne Paschko, Kerstin Paschko und Markus Patschke (2013): *Wärmedämmstoffe: Kompass zur Auswahl und Anwendung*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co.
- DUH [Deutsche Umwelthilfe] (2016): Naturdämmstoffe. Wider die falschen Mythen. Berlin.
- Dunkelberg, Elisa und Astrid Aretz (2013): Ökobilanzen technischer Optionen zur Bioenergiebereitstellung und -nutzung. Schriftenreihe des IÖW 203/13.
- Dunkelberg, Elisa, Steven Salecki, Julika Weiß, Stefan Rothe und Georg Böning (2015): Biomethan im Energiesystem. Ökologische und ökonomische Bewertung von Aufbereitungsverfahren und Nutzungsoptionen. IÖW-Schriftenreihe 207/15. Berlin.

- Dunkelberg, Elisa und Julika Weiß (2015): Energetischer Zustand von Wohngebäuden in zwei Regionen mit unterschiedlicher Wachstumsdynamik. Gebäudeeigenschaften, Sanierungszustand und Energieverbrauch von Wohngebäuden in den Regionen Lausitz-Spreewald und Potsdam/Potsdam-Mittelmark. Gebäude-Energiewende Arbeitspapier 3. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
- DVFG [Deutscher Verband Flüssiggas e.V.] (2011): Sicherheitsdatenblatt Propan (nach DIN 51622).
- Ebert, Marcel und Johannes Gansler (2013): Gaswärmepumpen – Zwischen technologischen Optionen und Chancen der Marktentwicklung. *energie | wasser-praxis*, Nr. 10/2013.
- EC [European Commission] (2014): Working Document on Thermal Insulation Products (Lot 36) – Results from exploratory study and suggested way forward. Brüssel: Directorate-General for Energy. Directorate C - Renewables, Research and Innovation, Energy Efficiency C.3 - Energy efficiency.
- Feuerwehr Frankfurt a. M. (2015): Zusammenstellung von Brandereignissen in Verbindung mit WDVS im Auftrag von AGBF-Hessen, AGBF-Bund, Deutscher Feuerwehrverband e.V..
- FIW München [Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München] (2013): Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen.
- FNR [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.] (2012a): Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Gülzow.
- FNR [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.] (2012b): Hackschnitzelheizungen. Marktübersicht.
- FNR [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.] (2014): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe.
- Fraunhofer ISE (2011): Wärmepumpen Effizienz. Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Freiburg.
- Gähns, Swantje, Evelin Wieckowski, Jonas von Braunmühl, Andreas Wolfmaier und Bernd Hirschl (2015): Private Haushalte als neue Schlüsselakteure einer Transformation des Energiesystems. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).
- Großmann, Doreen (2015): Soziodemografische Untersuchung von zwei Regionen mit unterschiedlicher Wachstumsdynamik. Charakterisierung der Regionen sowie von selbstnutzenden Ein- und Zweifamilienhaus-Eigentümer-Haushalten am Beispiel der Regionen Lausitz-Spreewald und Potsdam / Potsdam-Mittelmark. Gebäude-Energiewende Arbeitspapier 2. Senftenberg.
- Guinée, Jeroen B., Marieke Gorrae, Reinout Heijungs, Gjalt Huppes, René Kleijn, Arjan de Koning, Laurant van Oers, Anneke Wegener Sleeswijk, Sangwon Suh und Helias A. Udo de Haes (2002): *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards*. 7. Aufl. Kluwer Academic Publishers.
- Hochrein, J. (2013): Energetische Sanierung der Außenwand unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte und des Gefahrstoffpotentials. Masterthesis im Studiengang Zukunftssicher Bauen an der Fachhochschule Frankfurt.
- Houwald, Bernd von, Patrick Wortner, Johannes Kreißig und Hans Peters (2012): *Entwicklung von Umweltproduktdeklarationen für transparente Bauelemente – Fenster und Glas – für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Huppes, Gjalt und Laurant van Oers (2011): Evaluation of weighting methods for measuring the EU-27 overall environmental impact. Ispra: Joint Research Centre (JRC).
- IBU [Institut für Bauen und Umwelt e.V.] (2012a): Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025. Mineralische Werkmörtel Putzmörtel - Dämmputze.
- IBU [Institut Bauen und Umwelt e.V.] (2012b): Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025. Steinwolle-Dämmstoffe im niedrigen Rohdichtebereich.
- IFEU und WI (2008): MINI-Technologiefolgenabschätzung Gas-Wärmepumpe.
- ift Rosenheim (2012): EPD Holzfenster. Environmental Product Declaration nach DIN EN ISO 14025 und prEN15804. Holzfenster HAMA-Alu+Holzbauwerk GmbH.
- ITOPF [The international tanker owners pollution federation limited] (2010): Oil tanker spill statistics 2010.
- Jochum, Patrick und Peter Mellwig (2014): Grenzen der Dämmung opaker Bauteile. *Bauphysik* 36, Nr. 6: 289–297.
- LfU [Bayerisches Landesamt für Umwelt] (2011): Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen. Ein Leitfaden (Auszug Teil III).
- LfU [Bayerisches Landesamt für Umwelt] (2015): Sonnenenergie.
- Lippiat, Barbara C. (2007): BEES 4.0. Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- LLUR (2011): Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes Erdwärmekollektoren – Erdwärmesonden. Empfehlungen für Planer, Ingenieure und Bauherren. Flintbek.
- Lundie, Sven (2013): *Ökobilanzierung und Entscheidungstheorie: Praxisorientierte Produktbewertung auf der Basis gesellschaftlicher Werthaltungen*. Springer Verlag.

- Mack, Rudol (2002): Fensterkonstruktion aus ökologischen Baustoffen entsprechend den Anforderungen der Niedrigenergie- und Passivhausbauweise sowie der neuen Energieeinsparverordnung EnEV.
- Mäurer, Andreas und Martin Schlummer (2014): Recyclingfähigkeit von Wärmedämmverbundsystemen mit Styropor. In: *Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.) (2014): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen; Berliner Konferenz, 30.6-1.7.-2014, Berlin*. TK Verlag.
- Müller, Anette (2010): Dämmstoffe - Was wird danach? Veranstaltung: Vorlesung „Recycling von Baustoffen“.
- van Oers, Lauran (2015): CML-IA database, characterisation and normalisation factors for midpoint impact category indicators. Version 4.7. <http://cml.leiden.edu/research/industrialecology/>.
- PE International AG und BBSR [Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung] (2013): Erläuterungsdokument ÖKOBAU.DAT 2013.
- Schick Gruppe (2007): Sicherheit beim Transport und Umgang mit Kältemitteln in Druckgasflaschen.
- Schifter, I., C. González-Macías, A. Miranda und E. LÓpez-Salinas (2005): Air Emissions Assessment from Offshore Oil Activities in Sonda de Campeche, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment* 109, Nr. 1–3 (Oktober): 135–145.
- Schmiedel, Sarah (2013): Untersuchung von neuen Technologien für die energetische Sanierung der Gebäudeaußenwand im Hinblick auf Energieeffizienz. Karlsruhe.
- Schomann, Carin, Silke Lüder, Manfred Lotze und Winfried Kahlke (2014): Gesundheitsgefahren durch Fracking. *Hamburger Ärzteblatt* 05/2014: 36–37.
- SMUL [Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie] (2001): Nachwachsende Rohstoffe (Hanf, Flachs, Salbei und Kamille) – Anbau und Bedeutung für den Lebensraum Acker. Dresden.
- Stadt Heidelberg (2009): Ratgeber Energieeffizientes Bauen und Sanieren.
- Statistisches Bundesamt (2011): Zensus 2011. Gebäude und Wohnungen sowie Wohnverhältnisse der Haushalte. Wiesbaden.
- SWM (2015): Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), § 5 GefStoffV Erdgas, getrocknet.
- Thrän, Daniela und Diana Pfeiffer (2013): Methodenhandbuch - Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte.
- Toonen, Marcel (2007): Ökologischer Hanfanbau und Anwendungsmöglichkeiten im Textilbereich. In: *Faserpflanzen aus ökologischem Anbau, Grundmann, Eckart (Hrsg.)*. Schriftenreihe IBDF Band 20. Kassel.
- Total (2011): Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006.
- UBA [Umweltbundesamt] (1999): Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043.
- UBA [Umweltbundesamt] (2011): Heizen mit Holz. Ein Ratgeber zum richtigen und sauberen Heizen. Dessau-Roßlau.
- UBA [Umweltbundesamt] (2012): Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten.
- UBA [Umweltbundesamt] (2013): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012. *Climate Change* 15/2013.
- UBA [Umweltbundesamt] (2015): Wärmepumpen.
- UBA [Umweltbundesamt] (2016): Hexabromcyclododecan (HBCD). Antworten auf häufig gestellte Fragen. Hintergrundpapier Stand Januar 2016.
- UNEP IE [UNEP Industry and Environment] (1997): Environmental management in oil and gas exploration and production. An overview of issues and management approaches.
- VBZ NRW [Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen e.V.] (2012): Solaranlagen für Warmwasser und Heizung. Eine Verbraucherinformation. Düsseldorf.
- VDI 2067 (2012): Richtlinie VDI 2067. Blatt 1 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung“.
- Vohrer, Philipp, Jörg Mühlenhoff, Alena Müller und Clemens Nawroth (2013): Erneuerbare Wärme. Klimafreundlich, wirtschaftlich, technisch ausgereift. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e. V.
- Vrijders, Jeroen und Laetitia Delem (2010): Economical and environmental impact of low energy housing renovation. BBRI, Belgian Building Research Institute.
- VSI [Verband Schmierstoff-Industrie e.V.] (2010): Borsäure und Kühlschmierstoffe.
- Wenker, Jan L. und Sebastian Rüter (2015): Ökobilanz-Daten für holzbasierte Möbel. Thünen-Report 31.
- WI [Wuppertal Institut] (2014): KRESSE – Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter Mitarbeit von Karin Arnold, Jonas Friege, Christine Krüger, Arjuna Nebel, Michael Ritthoff, Sascha Samadi, Ole Soukup, Jens Teubler, Peter Viebahn, Klaus Wiesen. Wuppertal.

www.gebaeude-energiewende.de

