

Wechselwirkungen des Gebäudesektors mit anderen Sektoren des Klimaschutzgesetzes

Endbericht

Forschungsprogramm

Zukunft Bau

Projektlaufzeit

01. Oktober 2022 bis 30. September 2023

Aktenzeichen

10.08.17.7-22.32 (ID 312)

im Auftrag

des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von

Jana Deurer
Dr. Nele Friedrichsen
Lennart Bunnenberg
Johannes Haller
Oliver Lösch

IREES – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH, Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Executive Summary	11
1 Hintergrund und Zielsetzung	16
2 Begrifflichkeiten und Abgrenzungen	18
2.1 Quellen- und Verursacherbilanz	18
2.2 Sektoren nach Klimaschutzgesetz	18
2.3 Volkswirtschaftliche Sektoren nach amtlicher Statistik	20
2.4 Bau- und Gebäudebereich	21
2.5 Handlungsfeld Industrie	25
2.6 Lebenszyklusanalyse	26
2.7 Umweltökonomische Gesamtrechnung	26
3 Analyse der Wechselwirkungen zwischen dem KSG-Gebäudesektor und anderen Sektoren des Klimaschutzgesetzes	27
3.1 Qualitative Analyse der Wechselwirkungen und Schnittstellen	27
3.2 Abschätzung der Treibhausgasminderungspotenziale von ausgewählten Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich	29
3.2.1 Berechnungsgrundlagen	29
3.2.2 Umgang mit importierten und exportierten Produkten	30
3.2.3 Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen	31
3.2.3.1 Methodik und Grundlagen	32
3.2.3.2 Statistische Daten und Prognose	33
3.2.3.3 Bilanz aus Angebot und Bedarf an Strom in der Nutzungsphase und Bewertung der resultierenden Treibhausgasemissionen	36
3.2.3.4 Exkurs: Bewertung der Treibhausgasemissionen aus dem Angebot und Bedarf von Strom unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs	38
3.2.3.5 Erweiterung um Herstellungsphase und End-of-Life	40
3.2.4 Veränderte Zusammensetzung im Dämmstoff-Markt	44
3.2.4.1 Methodik und Grundlagen	44
3.2.4.2 Statistische Daten und Prognose	45
3.2.4.3 Entwicklung von Szenarien zur Erhöhung des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen	47
3.2.4.4 Bewertung des Energieeinsatzes und der Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus der Dämmstoffe	49
3.2.4.6 Betrachtung weiterer Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen	53
3.2.5 Auswirkungen einer Dekarbonisierungsstrategie der Ziegelproduktion	55
3.2.5.1 Ziegelherstellung und Dekarbonisierungsoptionen	56

3.2.5.2	Methodik und Grundlagen.....	57
3.2.5.3	Statistische Daten und Prognose.....	57
3.2.5.4	Emissionsminderungswirkung im Bau- und Gebäudebereich.....	60
3.2.5.5	Emissionswirkung im KSG-Energiesektor.....	61
3.2.6	Zusammenfassung	61
4	Zurechnung der Treibhausgasreduzierungs­potenziale auf den Gebäudesektor im Klimaschutzgesetz.....	65
4.1	Zurechnung der Reduzierungspotenziale durch den Ausbau von Photovoltaik-Kapazität und Wärmepumpen.....	65
4.2	Zurechnung der Reduzierungspotenziale durch eine veränderte Zusammensetzung im Dämmstoff-Markt	66
4.3	Zurechnung der Reduzierungspotenziale durch Dekarbonisierung der Produktion von Ziegeln.....	66
4.4	Zusammenfassung.....	67
5	Analyse von Politikinstrumenten zur Erhöhung der Treibhausgasreduzierungs­potenziale	70
5.1	Übersicht über relevante politische Instrumente	70
5.2	Einschätzung der Wirkung von politischen Instrumenten auf die untersuchten Aktivitäten	71
5.2.1	Wirkung der politischen Instrumente auf den Ausbau der Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen	73
5.2.1.1	Ausbau der Photovoltaik-Kapazität.....	73
5.2.1.2	Nutzung von Wärmepumpen	76
5.2.2	Wirkung der politischen Instrumente auf die produzierten und abgesetzten Dämmstoffe	78
5.2.3	Wirkung der politischen Instrumente auf die Dekarbonisierung der Ziegelproduktion.....	79
5.3	Möglicher Bedarf an zusätzlichen Instrumenten, Forschung und Datenerhebung.....	80
5.4	Zusammenfassung.....	82
6	Fazit und Ausblick	85
7	Anhang.....	88
7.1	Informationen zum Primärenergieaufwand und Treibhauspotenzial über den Lebenszyklus von Dämmstoffen	88
7.2	Ergänzende Ergebnisse zu Kapitel 3.....	90
7.3	Modellbeschreibung Invert/ee-Lab.....	90
	Abkürzungsverzeichnis.....	95
	Abbildungsverzeichnis	96

Tabellenverzeichnis	98
Literaturverzeichnis	100

Kurzfassung

Ausgangslage und Ziel

Die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) in den im Klimaschutzgesetz (KSG) definierten Sektoren Energie, Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft erfolgt nach dem Quellenprinzip. Dieses besagt, dass THG-Emissionen am Ort des Entstehens bilanziert werden. Innerhalb der Systemgrenzen des KSG-Gebäudesektors werden nur die direkten THG-Emissionen, d.h. THG-Emissionen resultierend aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern, bilanziert. Indirekte THG-Emissionen aus Strom werden dem KSG-Energiesektor zugeordnet, Emissionen infolge der Herstellung von Bauprodukten u.a. dem KSG-Industriesektor. Damit bildet der Zuschnitt im KSG-Gebäudesektor die über den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden entstehenden THG-Emissionen nicht vollständig ab. Die Herstellung von Bauprodukten, die Errichtung von Gebäuden sowie deren Rückbau und das Recycling von Bauprodukten verursachen weitere Umweltwirkungen, die in anderen KSG-Sektoren auftreten. Diese Aufteilung hat Konsequenzen bei einer politischen Einschätzung des Beitrags von Gebäuden zu nationalen THG-Emissionen sowie zu Minderungspotenzialen im Kontext des Erreichens nationaler Klimaschutzziele. Der Beitrag von Gebäuden und damit ihre Bedeutung werden systematisch unterschätzt. Vor allem aber ignoriert eine solche Aufteilung, dass Entscheidungen von Gebäudeeigentümerinnen- und Gebäudeeigentümern, Bauträgerinnen- und Bauträger, Architekten und Architektinnen maßgeblich die THG-Emissionen in anderen Sektoren beeinflussen. Die Verlagerung von THG-Emissionen in andere KSG-Sektoren durch bspw. den zunehmenden Einbau von Wärmepumpen oder Minderungseffekte durch eine zunehmende Nachfrage nach emissionsarmen Bauprodukten werden bei einer Vorgehensweise gemäß KSG nicht erfasst.

Diese Wechselwirkungen könnten zum einem über eine Verrechnung zwischen den Sektoren des KSG, zum anderen über die Betrachtung des Bau- und Gebäudebereichs im Sinne eines eigenen Handlungsfelds und damit über die Veränderung der Perspektive berücksichtigt werden. Ziel einer möglichen Verrechnung sollte es dabei sein, die Anreize zur Emissionsminderung zu verbessern, indem die Minderungen stärker verursachungsgerecht zugeordnet werden. Dadurch geraten stärker die Akteure in den Fokus, die für die Minderung entscheidend sind. Eine solche Betrachtung darf jedoch die Zuordnung von bestehenden THG-Emissionen, bspw. für nachgefragte Bauprodukte, nicht ignorieren. Die Definition eines Bau- und Gebäudebereichs als Handlungsfeld und als Erweiterung des Bilanzraums gegenüber dem bisherigen KSG-Gebäudesektor würde dagegen alle Aktivitäten über den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden umfassen, einem sektorübergreifenden Ansatz entsprechen und die THG-Emissionen von Gebäuden nach dem Verursacherprinzip betrachten.

Die Relevanz einer sektorübergreifenden Betrachtung, bspw. im Kontext des Bau- und Gebäudebereichs, bleibt auch nach einer derzeit diskutierten Einführung einer sektorübergreifenden, mehrjährigen Gesamtrechnung erhalten. Dadurch wird zwar die Verbindlichkeit der bislang geltenden Sektorziele mit jahresscharfen Vorgaben für alle KSG-Sektoren gelockert und die Anrechnung von Emissionsminderungen in anderen KSG-Sektoren auf die Zielerreichung des KSG-Gebäudesektors obsolet. Die Entscheidungen von Gebäudeeigentümerinnen- und Gebäudeeigentümern, Bauträgerinnen- und Bauträger, Architekten und Architektinnen haben jedoch weiterhin einen großen Einfluss auf Emissionen in anderen Sektoren.

Aufgrund der Bedeutung der Wechselwirkungen zwischen den Sektoren des KSG wird in diesem Projekt analysiert, welche Schnittstellen zwischen dem Gebäudesektor und weiteren Sektoren des KSG bestehen (durch eingesetzte Materialien und politische Maßnahmen) und welche THG-Reduktionspotenziale sich im Bau- und Gebäudebereich als Handlungsfeld ergeben, die nach bisherigen Systemgrenzen in anderen KSG-Sektoren bilanziert werden.

Am Beispiel ausgewählter Bauprodukte in ausgewählten Aktivitäten – Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen, einer veränderten Produktstruktur auf dem Dämmstoff-Markt sowie des künftigen Einsatzes von emissionsreduzierten Ziegeln in Gebäuden – wird eine Bilanzierung des (Primär-) Energieaufwands und der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus nach dem Verursacherprinzip durchgeführt und das jeweilige (Netto-)Treibhausgasreduktionspotenzial ermittelt. Zur Verdeutlichung der Rolle von Entscheidungsträger:innen im Kontext von Gebäuden wird anschließend diskutiert und dargestellt, ob, wie und inwieweit diese THG-Emissionen bzw. THG - Minderungspotenziale dem KSG-Gebäudesektor zugeordnet werden könnten. Zudem werden bestehende und mögliche zukünftige politische Instrumente untersucht, die sektorübergreifend den Bau- und Gebäudebereich adressieren und direkt bzw. indirekt zu einer Emissionsminderung beitragen.

Arbeitsschritte und angewandte Methoden

Die Wechselwirkungen der KSG-Sektoren werden zunächst qualitativ betrachtet. Dafür werden die direkten Verflechtungen zwischen den Sektoren aus Sicht des KSG-Gebäudesektors vor dem Hintergrund der Systematik volkswirtschaftlicher Wirtschaftszweige analysiert. Dabei wird die Verursachung und Reduktion von THG-Emissionen durch Aktivitäten im KSG-Gebäudesektor betrachtet und jeweiligen Wirtschaftszweige und Sektoren aus volkswirtschaftlicher Sicht zugeordnet.

Anschließend werden Aktivitäten für ausgewählte Schnittstellen der KSG-Sektoren definiert und die daraus resultierenden THG-Minderungspotenziale abgeschätzt. Die Berechnung des (Primär-) Energieaufwands und der THG-Emissionen der relevanten Bauprodukte orientiert sich an der Lebenszyklusanalyse und basiert grundsätzlich auf einer Top-down-Betrachtung für den gesamten Bau- und Gebäudebereich anhand der benötigten bzw. produzierten Mengen bis 2045.

Zur Ermittlung des THG-Minderungspotenzials durch den Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen in Gebäuden wird das Angebot (Strom aus Photovoltaik) und der Bedarf von Strom (Wärmepumpen, Hilfsenergie, Beleuchtung und Kühlung) im Status Quo und bis 2045 ermittelt. Daraus wird eine Bilanz erstellt und sowohl die verfügbaren Strommengen abgeleitet, die sich im Bau- und Gebäudebereich ergeben, als auch die resultierenden bzw. vermiedenen THG-Emissionen durch produzierten bzw. genutzten Strom. Zur Abschätzung der THG-Emissionen aus Stromeinsatz und Strombereitstellung wird die Entwicklung des Strom-Mixes bzw. des Vermeidungsfaktors für Strom aus Photovoltaik berücksichtigt. Zur Verifikation der Vermeidungsfaktoren für erneuerbaren Strom und Erhöhung der Qualität der Abschätzung werden zusätzlich die THG-Emissionen aus Strombedarf und das THG-Minderungspotenzial durch erneuerbaren Strom auf stündlicher Basis berechnet. Da der Fokus auf dem Betrieb der technischen Anlagen liegt, wird die Betrachtung um die Herstellungsphase und das End-of-Life ergänzt.

Für die Analyse eines veränderten Absatzmarkts von Dämmstoffen hinsichtlich THG-Minderungspotenzial wird der derzeitige Absatz von Dämmstoffen aus der Statistik und die

Prognose bis 2045 verwendet. Anschließend werden mehrere Szenarien definiert, um unterschiedliche Anteile von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen zu betrachten. Mithilfe der Datenbank ÖKOBAUDAT werden dann für die verschiedenen Szenarien und Dämmstoffe der Primärenergieaufwand und die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus berechnet. Das THG-Minderungspotenzial ergibt sich als Differenz aus den Szenarien zum Status Quo.

Zur Abschätzung des mittelbaren Minderungspotenzials durch die Dekarbonisierung der Ziegelherstellung im Bau- und Gebäudebereich werden die Dekarbonisierungsszenarien der Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie (Geres et al., 2021) verwendet. Unter Annahme verschiedener Szenarien erfolgt eine Abschätzung des THG-Minderungspotenzials durch die Dekarbonisierung der Ziegelherstellung im Bau- und Gebäudebereich.

Die ermittelten Minderungspotenziale werden anschließend (anteilig) auf den KSG-Gebäudesektor verteilt, um zu verdeutlichen, dass Wechselwirkungen zwischen den Sektoren des KSG bestehen und es durch die im KSG-Gebäudesektor handelnden Akteure potenziell einen Hebel zum Erreichen von Emissionsminderungen gibt.

Abschließend werden konkrete Politikinstrumente untersucht, um die identifizierten Minderungspotenziale zu heben. Dafür werden die für den Bau- und Gebäudebereich relevanten politischen Instrumente und ihre direkte und indirekte Wirkung auf die Aktivitäten dargestellt und die Wirkung der Instrumente auf das THG-Minderungspotenzial, vor dem Hintergrund der KSG-Sektoren analysiert.

Zentrale Ergebnisse

Aus Sicht des KSG-Gebäudesektors werden THG-Emissionen im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Strom, Fernwärme sowie Baustoffen und Produkten der technischen Gebäudeausrüstung nicht erfasst. Es handelt sich jedoch um relevante Produkte an den Schnittstellen der Sektoren. Dabei sind mehrere Perspektiven auf diesen Sachverhalt möglich und zu beachten, da diese Produkte nicht nur THG-Emissionen in anderen KSG-Sektoren verursachen, sondern auch reduzieren können. So verursacht bspw. die Nutzung von Strom und Dämmstoffen, bestimmte THG-Emissionen im KSG-Energiesektor und KSG-Industriesektor. Durch den Aufbau von PV-Kapazitäten wiederum werden die THG-Emissionen im KSG-Energiesektor reduziert. Die Nachfrage nach Baustoffen mit verminderten THG-Emissionen führt zu einer Reduktion im KSG-Industriesektor.

Die anschließende quantitative Analyse von ausgewählten Aktivitäten des übergreifenden Bau- und Gebäudebereichs macht deutlich, dass es verschiedene Hebel gibt, um die THG-Emissionen zu reduzieren. Tabelle 1 zeigt die abgeschätzten THG-Minderungspotenziale der ausgewählten Aktivitäten in den Jahren 2030 und 2045.

Tabelle 1: Vergleich der THG-Minderungspotenziale von ausgewählten Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich für die Jahre 2030 und 2045 [in Mio. t CO₂äq]

Aktivität	2030	2045
Ausbau von Photovoltaik-Kapazität und Wärmepumpen	7,5	7
Veränderter Dämmstoff-Markt	0,05	0,1
Dekarbonisierung der Ziegelproduktion	0,42	0,78

Quelle: Eigene Darstellung

Für die Produktion von Solarstrom (EE-Strom) durch Photovoltaikanlagen auf bzw. an Gebäuden resultiert unter Berücksichtigung des zusätzlichen Strombedarfs durch die vermehrte Nutzung von Wärmepumpen sowie für Beleuchtung, Kühlung und Hilfsenergie bis 2045 ein deutlicher Überschuss an EE-Strom in der Bilanz aus Stromerzeugung und Stromnachfrage. Betrachtet man die potenziell vermiedenen THG-Emissionen unter Annahme eines Vermeidungsfaktors¹ für PV-Strom ergibt sich im Jahr 2030 ein THG-Minderungspotenzial von rund 7,5 Mio. t CO₂äq und im Jahr 2045 ein THG-Minderungspotenzial von rund 7 Mio. t CO₂äq.

Werden die THG-Minderungspotenziale auf einer stündlichen Basis ermittelt, resultieren höhere Potenziale, da diese Vorgehensweise die stündlichen Veränderungen in der Erzeugung und im Energiesystem berücksichtigt. Bei der Abschätzung eines Stromüberschusses durch Photovoltaikanlagen wird so der zeitliche Versatz von Stromerzeugung und Stromnutzung berücksichtigt. Der Überschuss entsteht durch die höhere Globalstrahlung insbesondere in den Sommermonaten, während in den Wintermonaten der Strombedarf für die Wärmepumpe die Menge an erzeugtem Solarstrom auf bzw. an Gebäuden übersteigt.

Bei einer veränderten Zusammensetzung des Dämmstoffmarkts zugunsten eines höheren Anteils von nachwachsenden Rohstoffen zeigt sich, dass bei einem erhöhten Einsatz von Holzfaser und Zellulose der Primärenergieaufwand insgesamt steigt, die THG-Emissionen allerdings sinken. Dies ist auf die energieintensive Herstellung von Holzfaserdämmplatten zurückzuführen, wobei zu beachten ist, dass ein Großteil des Primärenergieaufwands mit erneuerbaren Energien gedeckt wird. Die geminderten THG-Emissionen lassen sich durch den erhöhten Einsatz erneuerbarer Energien, den Wegfall von fossilen Rohstoffen und Zusatzstoffen mit Prozessemissionen erklären. Bei Annahme eines Marktanteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen von 25 % wird 2030 ein Minderungspotenzial von rund 51.000 t CO₂äq und 2045 ein Minderungspotenzial von 103.000 t CO₂äq erreicht. Wird der Marktanteil erhöht, resultiert ein höheres Minderungspotenzial.

Insgesamt können Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (nawaRo) aufgrund ihrer Eigenschaften und Verfügbarkeit (derzeit) mineralische und synthetische Dämmstoffe nicht vollständig ersetzen. Die (erhöhte) Nutzung von Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen, mit einem geringeren (erneuerbaren) Primärenergieaufwand in der Herstellung sowie einer zusätzlichen CO₂-Senkenleistung können jedoch eine wichtige Ergänzung des Dämmstoff-Marktes darstellen, um den Primärenergieaufwand und die THG-Emissionen zu reduzieren. Dabei ist zu beachten, dass in der Abschätzung aktuelle Produktionsprozesse berücksichtigt wurden und es neben den derzeit verwendeten Dämmstoffen aus nawaRo weitere biogene Dämmstoffe, wie bspw. Stroh und Hanf mit einem deutlich niedrigeren Primärenergieaufwand gibt.

Die Dekarbonisierung der Ziegelproduktion, durch den Einsatz biogener Porosierungsmittel, Elektrifizierung der Produktionsprozesse sowie Nutzung von Sekundärrohstoffen, führt zu einem THG-Minderungspotenzial von 0,42 Mio. t CO₂äq in 2030 und 0,78 Mio. t CO₂äq in 2045. Durch die Elektrifizierung von bspw. Brenn- und Trockenprozessen sinken die direkten

¹ Es wurde angenommen, dass der Vermeidungsfaktor ausgehend von 694 g CO₂äq pro kWh Strom in 2021 (Lewicki, 2023) auf 139 g CO₂äq pro kWh Strom in 2030 und 46 g CO₂äq pro kWh Strom in 2045 sinkt.

Emissionen der Ziegelherstellung. Dafür steigt der Strombedarf und je nach Kraftwerksmix entstehen zusätzliche Emissionen im Stromsektor bzw. es erhöht sich dort die Herausforderung, den nun erhöhten Strombedarf künftig CO₂-frei bereitzustellen. Werden weitere Technologien eingesetzt, wie Wasserstoff-Öfen, erhöht sich das THG-Minderungspotenzial.

Die identifizierten Minderungspotenziale basieren auf einer sektorübergreifenden Betrachtung (Bau- und Gebäudebereich). Es stellt sich die Frage, wie diese vor dem Hintergrund der derzeitigen Sektorzuschnitte im KSG adressiert werden können. Der KSG-Gebäudesektor umfasst ausschließlich die direkten THG-Emissionen aus dem fossilen Brennstoffeinsatz und nicht die indirekten Emissionen in Verbindung mit Bau, Errichtung, Erhalt und Abriss von Gebäuden. Nichtsdestotrotz haben die Gebäudeeigenümer:innen, Planer:innen und Architekturbüros, also die Akteure des KSG-Gebäudesektors maßgeblichen Einfluss auf die dargestellten Aktivitäten. Es wird deshalb diskutiert, ob und wie diese Minderungseffekte zwischen der Industrie (Veränderung der Industrie) und dem KSG-Gebäudesektor (Veränderung der Nachfrage) aufgeteilt werden können. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die Dekarbonisierung der industriellen Produktion durch die Industrie selbst vorangetrieben bzw. der Ausbau der erneuerbaren Energien auch durch Instrumente im KSG-Energiesektor adressiert werden. Bestehende politische Instrumente, wie das EEG, die Bundesförderung Energie- und Ressourceneffizienz Wirtschaft, der EU-ETS leisten einen wichtigen Beitrag zur THG-Minderung. Zusätzliche geplante Instrumente können zentrale Hebel zur Erreichung weiterer THG-Minderungen darstellen. Dabei sind insbesondere die Solardachpflicht und die Klimaschutzverträge als Förderprogramm zu nennen. Insgesamt sollte es darum gehen, im Zusammenspiel der Sektoren effektiv und zeitnah Minderungen zu erreichen. Der Bau- und Gebäudebereich als Verzahnung verschiedener Sektoren spielt dabei eine wichtige Rolle.

Fazit

In dieser Studie wurde gezeigt, dass relevante Wechselwirkungen und Schnittstellen zwischen den Sektoren des Klimaschutzgesetzes bestehen. Insbesondere der Ausbau von Photovoltaik-Kapazität und Wärmepumpen sowie die Nutzung von Baustoffen und technischer Gebäudeausrüstung in Gebäuden führt zur Verursachung, aber auch zur Reduktion von THG-Emissionen in verschiedenen Sektoren des KSG. Die Abschätzung des THG-Minderungspotenzials nach dem Verursacherprinzip für ausgewählte Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich als sektorübergreifendes Querschnittsthema bestätigt die Relevanz der Wechselwirkungen zwischen den Sektoren des KSG. Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung einer sektorübergreifenden Betrachtung, die den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden umfasst und die Dynamik der Entwicklung des Gebäudebestandes in seiner Parallelität aus Errichtung, Erhalt, Betrieb und Rückbau abbildet. Die bestehende Trennung von Nutzungs-, Herstellungs- und Entsorgungsphase von Gebäuden behindert die Transformation des Bau- und Gebäudebereichs aufgrund der mangelnden Adressierung des gesamten Bau- und Gebäudebereichs durch politische Instrumente.

Durch die Einführung einer sektorübergreifenden, mehrjährigen Gesamtrechnung mit der aktuellen Weiterentwicklung des KSG wird die Verbindlichkeit der bislang geltenden KSG-Sektorziele mit jahresscharfen Vorgaben für alle KSG-Sektoren gelockert, wodurch auch eine anteilige Verrechnung von Emissionsminderungen auf die Sektoren des KSG an Bedeutung verliert. Die Relevanz einer sektorübergreifenden Betrachtung bleibt aber

erhalten: durch Aktivitäten aus dem Bau- und Gebäudebereich können erhebliche Emissionsminderungen in verschiedenen Sektoren (mittelbar) erzielt werden.

Die Etablierung des Bau- und Gebäudebereichs als Handlungsfeld könnte zur Definition von CO₂- bzw. THG-Budgets und Transformationspfaden unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus führen. Bei der Planung von Einzelbauwerken gewinnt die Betrachtung des vollständigen Lebenszyklus unter Anwendung der Lebenszyklusanalyse bereits an Bedeutung. Parallel dazu steigt die Bedeutung eines zusätzlichen sektorübergreifenden Ansatzes in der jährlichen Statistik der nationalen THG-Emissionen, ihrer Quellen und Ursachen.

Executive Summary

Background

The accounting of greenhouse gas emissions (GHG emissions) in the sectors of energy, industry, buildings, transport and agriculture defined in the Climate Change Act is based on the source principle. This means that GHG emissions are accounted for at the point of origin. Within the system boundaries of the building sector, only direct GHG emissions, i.e., from the combustion of fossil fuels, are accounted for. Indirect GHG emissions from electricity are allocated to the energy sector, emissions resulting from the production of building products, etc. to the industry sector. Thus, the allocation to the buildings sector does not fully reflect the GHG emissions generated over the entire life cycle of buildings. The production of building products, the construction of buildings as well as their deconstruction and the recycling of building products cause further environmental impacts that occur in other sectors. This division only has not only consequences for a political assessment of buildings in the context of achieving national climate protection goals. Most importantly, such a division ignores the fact that decisions made by building owners, developers and architects have a significant impact on GHG emissions in other sectors. The shift of GHG emissions to other sectors through, for example, the increasing installation of heat pumps or reduction effects through an increasing demand for low-emission building products are not recorded.

These interactions could be considered, on the one hand, by allocating them between the sectors and, on the other hand, by considering the field of construction and building as a separate field of action. The aim of a possible allocation should be to improve the incentives to reduce emissions by allocating the reductions in a more cause-related approach. In this way, the focus will be more on the actors that are responsible for the reduction. However, such an approach must not ignore the allocation of existing GHG emissions, e.g., for building products in demand. In contrast, the definition of the field of construction and building as an extension of the accounting area of the building sector would include all activities over the entire life cycle of buildings, correspond to a cross-sectoral approach and consider the GHG emissions of buildings according to the polluter-pays principle.

The relevance of a cross-sectoral approach, e.g., in the context of the construction and building sector, remains even after the introduction of a cross-sectoral, multi-year overall accounting. Admittedly, the binding nature of the previously applicable sectoral targets with annual targets for all sectors in the Climate Change Act will be loosened and the allocation of emission reductions in other sectors in the Climate Change Act to the achievement of targets in the building sector will become obsolete. However, the decisions of building owners, developers and architects continue to have a major impact on emissions in other sectors.

Due to the importance of the interactions between the sectors, this project analyses which interfaces exist between the building sector and other sectors (through materials used and political measures) and which GHG reduction potentials arise in the field of construction and building that are accounted for in other sectors according to previous system boundaries.

Using the example of selected building products in selected activities - the expansion of photovoltaic capacities and heat pumps, a changed product structure on the insulation market and the future use of emission-reduced bricks in buildings - a balancing of the (primary) energy expenditure and the GHG emissions over the entire life cycle is carried out according to the polluter-pays principle and the respective (net) GHG reduction potential is

determined. To clarify the role of decision-makers in the context of buildings, it is then discussed and presented whether, how and to what extent these GHG emissions or GHG reduction potentials could be allocated to the building sector. In addition, existing and possible future policy instruments that address the building sector across sectors and contribute directly or indirectly to emission reductions are examined.

Procedure and methods applied

The interactions of the sectors are first examined qualitatively. For this purpose, the direct linkages between the sectors are analysed from the perspective of the building sector against the background of the classification of economic sectors. The generation and reduction of GHG emissions through activities in the building sector are considered and assigned to the respective economic sectors and industries from an economic perspective.

Subsequently, activities for selected interfaces of the sectors were defined and the resulting GHG reduction potentials were estimated. The calculation of the (primary) energy demand and the GHG emissions of the relevant building products is based on the life cycle analysis and basically on a top-down approach for the entire field of construction and building based on the required or produced quantities until 2045.

To determine the GHG reduction potential through the expansion of photovoltaic capacities and heat pumps in buildings, the supply (electricity from photovoltaics) and the demand for electricity (heat pumps, auxiliary energy, lighting, and cooling) are determined in the status quo and until 2045. From this, a balance sheet is drawn up and both the available electricity quantities resulting in the field of construction and building and the resulting or avoided GHG emissions from the electricity produced or used are derived. To estimate the GHG emissions from electricity use and electricity supply, the development of the electricity mix and the abatement factor for electricity from photovoltaics are taken into account. To verify the abatement factors for renewable electricity and increase the quality of the estimate, the GHG emissions from electricity demand and the GHG reduction potential from renewable electricity are also calculated on an hourly basis. Since the focus is on the operation of the technical facilities, the analysis is furthermore supplemented by the manufacturing phase and the end-of-life.

For the analysis of a changed sales market of insulation materials regarding GHG reduction potential, the current sales of insulation materials from the statistics and the forecast until 2045 are used. Subsequently, several scenarios are defined in order to consider different shares of insulating materials made from renewable raw materials. With the help of the ÖKOBAUDAT database, the primary energy demand and the GHG emissions over the entire life cycle are calculated for the different scenarios and insulation materials. The GHG reduction potential is the difference between the scenarios and the status quo.

The decarbonisation scenarios of the Roadmap for a Greenhouse Gas Neutral Brick and Tile Industry (Geres et al., 2021) are used to estimate the indirect reduction potential through the decarbonisation of brick and tile production in the construction and building sector. Assuming different scenarios, the GHG reduction potential through decarbonisation of brick production in the field of construction and building is estimated.

The identified reduction potentials are then distributed (proportionally) to the building sector in order to illustrate that interactions exist between the sectors in the Climate Change Act and that there is potential leverage for achieving emission reductions through the actors acting in the KSG building sector.

Finally, concrete policy instruments are examined in order to raise the identified reduction potentials. For this purpose, the policy instruments relevant for the field of construction and building and their direct and indirect impact on the activities are presented and the effect of the instruments on the GHG reduction potential is analysed against the background of the sectors.

Main results

From the perspective of the building sector, GHG emissions related to the provision of electricity, district heating and building materials and products of technical building equipment are not recorded. However, these are relevant products at the interfaces of the sectors. Several perspectives on this issue are possible and should be considered, as these products not only cause GHG emissions in other sectors but can also reduce them. For example, the use of electricity and insulation materials causes certain GHG emissions in the energy and industry sector. In turn, the development of PV capacity reduces GHG emissions in the energy sector. The demand for building materials with reduced GHG emissions leads to a reduction in the industrial sector.

The subsequent quantitative analysis of selected activities of the overarching field of construction and building makes clear that there are different levers to reduce GHG emissions. The following table shows the estimated GHG reduction potentials of the selected activities in 2030 and 2045.

Table 1: Comparison of GHG reduction potentials of selected activities in the construction and building sector for the years 2030 and 2045 [in Mt CO₂eq].

Activity	2030	2045
Expansion of photovoltaic capacities and heat pumps	7,5	7
Changed product structure on the insulation market	0,05	0,1
Use of emission-reduced bricks in buildings	0,42	0,78

The production of solar electricity by photovoltaic systems on buildings results in a significant surplus of solar electricity in the balance of electricity generation and electricity demand. The additional electricity demand due to the increased use of heat pumps and for lighting, cooling and auxiliary power until 2045 was taken into account. Considering the potentially avoided GHG emissions under the assumption of an abatement factor for PV electricity, there is a GHG reduction potential of about 7.5 Mt CO₂eq in 2030 and a GHG reduction potential of about 7 Mt CO₂eq in 2045. If the GHG reduction potentials are determined on an hourly basis, higher potentials result, as this approach takes into account the hourly changes in generation and in the energy system. When estimating an electricity surplus from photovoltaic systems, the temporal offset of electricity generation and electricity use is thus taken into account. The surplus arises from the higher global radiation, especially in the summer months, while in the winter months the electricity demand for the heat pump exceeds the amount of solar electricity generated on buildings.

A change in the composition of the insulation market in favour of a higher share of renewable raw materials shows that the overall primary energy demand increases with an increased use of wood fibre and cellulose, but the GHG emissions decrease. This is due to the energy-intensive production of wood fibre insulation boards, although it should be noted that a large part of the primary energy input is covered by renewable energies. The reduced GHG emissions can be explained by the increased use of renewable energies, the elimination of

fossil raw materials and additives with process emissions. Assuming a market share of insulation materials from renewable raw materials of 25%, a reduction potential of about 51,000 t CO₂eq is achieved in 2030 and a reduction potential of 103,000 t CO₂eq in 2045. If the market share is increased, results a higher reduction potential.

Overall, insulation materials from renewable raw materials cannot (currently) completely replace mineral and synthetic insulation materials due to their properties and availability. However, the (increased) use of insulation materials from renewable resources, with a lower (renewable) primary energy input in the production as well as an additional CO₂ sink performance can be an important addition to the insulation market to reduce primary energy input and GHG emissions. It should be noted that current production processes were taken into account in the assessment and that there are other biogenic insulating materials, such as straw and hemp, with a significantly lower primary energy input in addition to the currently used insulating materials made from renewable raw materials.

The decarbonisation of brick production by biogenic porosity agents, electrification of production processes and the use of secondary raw materials leads to a GHG reduction potential of 0.42 million t CO₂eq in 2030 and 0.78 million t CO₂eq in 2045. The electrification of firing and drying processes, for example, reduces direct emissions from brick production. On the other hand, the electricity demand increases and, depending on the power plant mix, additional emissions arise in the electricity sector or the challenge increases there to provide the now increased electricity demand CO₂-free in the future. If additional technologies are used, such as hydrogen furnaces, the GHG reduction potential increases.

The identified reduction potentials are based on a cross-sectoral approach (construction and building sector). The question arises as to how these can be addressed against the background of the current sectoral breakdown in the Climate Change Act. The building sector only includes the direct GHG emissions from fossil fuel use and not the indirect emissions associated with the construction, erection, maintenance, and demolition of buildings. Nevertheless, the building owners, planners and architects, i.e., the actors in the building sector, have a significant influence on the activities described.

It is therefore discussed whether and how these mitigation effects can be divided between industry (change in industry) and the KSG building sector (change in demand). At the same time, it must be considered that the decarbonisation of industrial production is driven by industry itself or the expansion of renewable energies is also addressed by instruments in the energy sector. Existing policy instruments, such as the Renewable Energy Sources Act (EEG), the federal promotion of energy and resource efficiency in the economy, and the EU ETS make an important contribution to GHG reduction. Additional planned instruments can represent central levers for achieving further GHG reductions. In particular, the solar roof obligation and the climate protection contracts as a support programme should be mentioned. Overall, the aim should be to achieve effective and fast reductions through the interaction of the sectors. The field of construction and building as an interlocking of different sectors plays an important role in this.

Conclusion

This study has shown that there are relevant interactions and interfaces between the sectors of the Climate Change Act. In particular, the use and generation of electricity as well as the use of building materials and technical building equipment in buildings leads to the causation, but also to the reduction of GHG emissions in different sectors of the Climate Change Act.

The estimation of the GHG reduction potential according to the polluter-pays principle for selected activities in the field of construction and building as a cross-sectoral topic confirms the relevance of the interactions between the sectors of the Climate Change Act. The results show the importance of a cross-sectoral approach that covers the entire life cycle of buildings and reflects the dynamics of the development of the building stock in its parallelism of construction, maintenance, operation and deconstruction. The existing separation of the use, production and disposal phases of buildings hinders the transformation of the field of construction and building due to the lack of addressing the entire field of construction and building through political instruments.

The introduction of a cross-sectoral, multi-year overall accounting with the current further development of the Climate Change Act loosens the binding nature of the previously applicable sectoral targets with annual targets for all sectors, which also makes a proportional allocation of emission reductions to the sectors of the Climate Change Act less meaningful. However, the relevance of a cross-sectoral consideration remains: significant emission reductions can be (indirectly) achieved in various sectors through activities from the construction and building sector.

The establishment of the field of construction and building as a field of action could lead to the definition of CO₂ or GHG budgets and transformation paths taking into account the entire life cycle. In the planning of individual buildings, the consideration of the complete life cycle using life cycle analysis is already gaining in importance. In parallel, the importance of an additional cross-sectoral approach in the annual statistics of national GHG emissions, their sources and causes are increasing.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Mit der Verabschiedung des Klimaschutzplans in 2016 und dem Klimaschutzgesetz (KSG) in 2019 sowie dessen Novelle in 2021 wurden nicht nur ein Gesamtziel, sondern auch sektorspezifische Zielmarken für die Reduktion von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) in einzelnen Jahren festgelegt (BMUV, 2016; Bundesministerium für Justiz, 2019). Die Bilanzierung der THG-Emissionen in den im Klimaschutzgesetz definierten Sektoren Energie, Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft erfolgt nach dem Quellenprinzip, welches besagt, dass THG-Emissionen am Ort des Entstehens bilanziert werden.

Da im KSG-Gebäudesektor deshalb ausschließlich direkte THG-Emissionen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe in Gebäuden bilanziert werden, adressieren auch die derzeitigen Politikinstrumente vor allem die Reduktion des Energieverbrauchs von Gebäuden durch energetische Modernisierung und energieeffiziente Neubaustandards sowie die Nutzung erneuerbarer Energien. Jedoch werden durch die Transformation des KSG-Gebäudesektors die THG-Emissionen oftmals in andere Sektoren verlagert oder auch dort gemindert. Darüber hinaus lässt die Betrachtung des KSG-Gebäudesektors im Quellenprinzip die über den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden entstehenden THG-Emissionen außer Acht. Die Herstellung von Bauprodukten, die Errichtung von Gebäuden sowie deren Rückbau und das Recycling von Bauprodukten verursachen weitere Umweltwirkungen, die, wie in der Kurzstudie zum Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland (Ramseier and Frischknecht, 2020) gezeigt wird, in anderen KSG-Sektoren anfallen. Somit werden auch durch Maßnahmen mit Gebäudebezug in anderen KSG-Sektoren erzielte Minderungen nicht dem Ziel des Gebäudesektors angerechnet. Beispielsweise werden aufgrund des Quellenprinzips die durch die Produktion der eingesetzten Bauprodukte verursachten THG-Emissionen dem Industriesektor zugerechnet. Dies ist insofern korrekt, als dass der Gebäudesektor keinen Einfluss auf die eingesetzten Energieträger und die Produktionsprozesse des Industriesektors hat. Auf der anderen Seite gibt es hinsichtlich der Minderung von THG-Emissionen im KSG-Gebäudesektor durch den sektoralen Zuschnitt auch keinen Anreiz für den Einsatz von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen bzw. den Einsatz emissionsarmer Produktionsverfahren in der Industrie, ausgedrückt durch die Nachfrage nach emissionsreduzierten Bauprodukten.

Zur sektorübergreifenden und ganzheitlichen Betrachtung von Gebäuden bietet sich deshalb eine Erweiterung des Bilanzraums des KSG-Gebäudesektors auf den Bau- und Gebäudebereich an. Der Bau- und Gebäudebereich umfasst alle Aktivitäten über den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden und stellt eine Betrachtung der THG-Emissionen nach dem Verursacherprinzip dar.

Vor dem Hintergrund mehrfach verfehlter Klimaschutzziele wurde im März 2023 von der Bundesregierung beschlossen das Klimaschutzgesetz weiterzuentwickeln: „Die Einhaltung der Klimaschutzziele soll zukünftig anhand einer sektorübergreifenden und mehrjährigen Gesamtrechnung überprüft werden. Basis dafür ist das jährliche Monitoring.“ (Koalitionsausschuss, 2023) Die Verbindlichkeit der bislang geltenden Sektorziele, die jahresscharfe Vorgaben für alle KSG-Sektoren enthalten, wird damit gelockert, Überschreitungen werden weniger streng verfolgt.

Mit dem Wegfall von bindenden Sektorzielen wird zwar die Anrechnung von Emissionsminderungen auf die Sektoren obsolet, allerdings ändert dies nichts an der Relevanz einer sektorübergreifenden Betrachtung in Bezug auf den Bau- und

Gebäudebereich. Die Bedeutung eines ressort- und sektorübergreifenden Ansatzes, der sich am Verursacherprinzip orientiert und Gebäude ganzheitlich betrachtet, würde dadurch sogar gestärkt.

In diesem Projekt wird analysiert, welche Wechselwirkungen zwischen dem Gebäudesektor und weiteren Sektoren des KSG bestehen (durch eingesetzte Materialien und politische Maßnahmen), welche THG-Reduktionspotenziale sich im Bau- und Gebäudebereich ergeben und wie diese THG-Emissionen bzw. -Minderungen sektorübergreifend bilanziert werden könnten.

Nach einer einleitenden Definition von verwendeten Begrifflichkeiten und notwendigen Abgrenzungen in Kapitel 2 werden in Kapitel 3 die Wechselwirkungen zunächst qualitativ und anschließend betrachtet. Am Beispiel ausgewählter Bauprodukte in ausgewählten Aktivitäten – Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen, einer veränderten Produktstruktur auf dem Dämmstoff-Markt sowie des künftigen Einsatzes von emissionsreduzierten Ziegeln in Gebäuden – wird eine Bilanzierung des (Primär-)Energieaufwands und der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus nach dem Verursacherprinzip durchgeführt und das jeweilige (Netto-)Treibhausgasminderungspotenzial ermittelt

Zur Verdeutlichung der Rolle von Entscheidungsträger:innen im Kontext von Gebäuden wird in Kapitel 4 anschließend diskutiert und dargestellt, ob, wie und inwieweit diese THG-Emissionen bzw. THG -Minderungspotenziale dem KSG-Gebäudesektor zugeordnet werden könnten.

Abschließend werden in Kapitel 5 bestehende und mögliche zukünftige politische Instrumente untersucht, die sektorübergreifend den Bau- und Gebäudebereich adressieren. Es wird dargestellt, welche Instrumente direkt oder indirekt auf die untersuchten Aktivitäten wirken und welche Wirkung diese auf das identifizierte THG-Minderungspotenzial entfalten können.

2 Begrifflichkeiten und Abgrenzungen

In diesem Kapitel werden für ein besseres Verständnis der erarbeiteten Ergebnisse und zur Einordnung zunächst die verwendeten Begriffe definiert und voneinander abgegrenzt.

2.1 Quellen- und Verursacherbilanz

Grundsätzlich wird zwischen zwei Methoden der Berechnung bzw. Anrechnung von THG-Emissionen unterschieden – der Quellen- und der Verursacherbilanz. Die Quellenbilanz umfasst direkte THG-Emissionen aus dem Verbrauch von Primärenergieträgern sowie, im Industriesektor, die sogenannten nicht-energiebedingten Prozessemissionen und bilanziert diese am Ort des Entstehens. Die Quellenbilanz entspricht dem Territorialprinzip im Rahmen des United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) und ist damit die international gängige Methode der Erfassung und Zuordnung der THG-Emissionen der Vertragsparteien bzw. teilnehmenden Staaten. Dagegen umfasst die Verursacherbilanz die THG-Emissionen, die der Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen zugerechnet werden, weshalb diese am Ort der Nachfrage bilanziert werden. Die Verursacherbilanz entspricht damit dem Product Carbon Footprint (IPCC, 2006; Kander *et al.*, 2015).

2.2 Sektoren nach Klimaschutzgesetz

Das Klimaschutzgesetz (KSG) der Bundesregierung verankert das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 und sieht bis 2030 bereits eine Reduktion der THG-Emissionen um 65 % vor. Dabei wurden mit der Verabschiedung des Klimaschutzplans im Jahr 2016, dem Klimaschutzgesetz im Jahr 2019 und dessen Novelle in 2021 nicht nur ein Gesamtziel, sondern sektorspezifische jährliche Zielmarken für die Reduktion von THG-Emissionen festgelegt (BMUV, 2016; Bundesministerium für Justiz, 2019). Die Bilanzierung der THG-Emissionen in den Sektoren Energie, Industrie, Gebäude, Verkehr, Abfallwirtschaft und Landwirtschaft erfolgt im Rahmen der Berichterstattung des UNFCCC nach dem Quellenprinzip.

Die nachfolgenden Definitionen der Sektoren im KSG entstammen dem Projektionsbericht der Bundesregierung (Repenning, Harthan and Blanck, 2021), wobei die Angaben in Klammern den Quellgruppen des Common Reporting Format entsprechen:

- ▶ **Energie:** Der Sektor Energie umfasst öffentliche Kraftwerke und Heizwerke (1.A.1.a), Raffinerief Feuerungen und -kraftwerke (1.A.1.b) sowie Kokereien und andere Anlagen des Umwandlungssektors einschließlich deren Kraftwerke (1.A.1.c). Darüber hinaus umfasst der Sektor Energie den Erdgaspipelinetransport (1.A.3.e) sowie diffuse Emissionen aus der Energienutzung (1.B). Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- ▶ **Industrie:** Neben industriellen Prozessfeuerungen und Wärmeerzeugungsanlagen sowie Industriekraftwerken (1.A.2) sind im Sektor Industrie auch die Emissionen aus Industrieprozessen und Produktverwendung (2) enthalten. Da der Sektor Industrie genauer als „Verarbeitendes Gewerbe und Bauwirtschaft“ definiert ist, sind auch die Emissionen des bauwirtschaftlichen Sonderverkehrs (1.A.2.g.vii) enthalten. Nicht enthalten hingegen sind Raffinerien (1.A.1.b), Kokereien und andere Anlagen des

Umwandlungssektors (1.A.1.c). Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen zur Emissionsminderung in der Industrie ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

- ▶ **Gebäude:** Der Sektor Gebäude umfasst neben der Gebäudewärme auch den Brennstoffeinsatz für die Warmwasserbereitung² sowie weiteren Brennstoffeinsatz in Haushalten (1.A.4.b) und im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (1.A.4.a). Energieverbräuche landwirtschaftlicher Gebäude (z.B. Gewächshäuser) (1.A.4.c) sind nicht im Sektor Gebäude enthalten, sondern im Sektor Landwirtschaft. Federführende Ressorts für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen sind das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- ▶ **Verkehr:** Dieser Sektor umfasst den inländischen Straßen- (1.A.3.b), Schienen- (1.A.3.c) und Luftverkehr (1.A.3.a) sowie die Binnen- und Küstenschifffahrt (1.A.3.d). Der internationale Luftverkehr (1.D.1.a) und die Hochseeschifffahrt (1.D.1.b) werden hier auch behandelt, allerdings werden deren THG-Emissionen nicht auf die inländischen Emissionen angerechnet, sondern lediglich nachrichtlich ausgewiesen. Sonderverkehre sind teilweise in anderen Sektoren enthalten, so ist der bauwirtschaftliche Verkehr im Industriesektor (1.A.2.g.vii), der landwirtschaftliche Verkehr (1.A.4.b.ii) und die Fischereischifffahrt (1.A.4.b.iii) im Sektor Landwirtschaft und Erdgaspipelinetransport (1.A.3.e) im Sektor Energie enthalten. Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV).
- ▶ **Landwirtschaft:** Neben den biologisch-chemischen Emissionen von Tieren und landwirtschaftlichen Böden (3) umfasst dieser Sektor auch die energetischen Emissionen der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei (1.A.4.c). Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
- ▶ **Abfallwirtschaft und Sonstiges:** Dieser Sektor umfasst die Emissionen, die aus der Behandlung und Lagerung von Abfall (Deponien und andere) sowie von Abwasser entstehen (5). Federführendes Ressort für die Erarbeitung von Maßnahmenvorschlägen ist das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).
- ▶ **Landnutzung und Forstwirtschaft:** Dieser Sektor umfasst die Emissionen von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (englisch: Land use, land-use change and forestry) (4).³ Federführendes Ressort für die Erarbeitung von

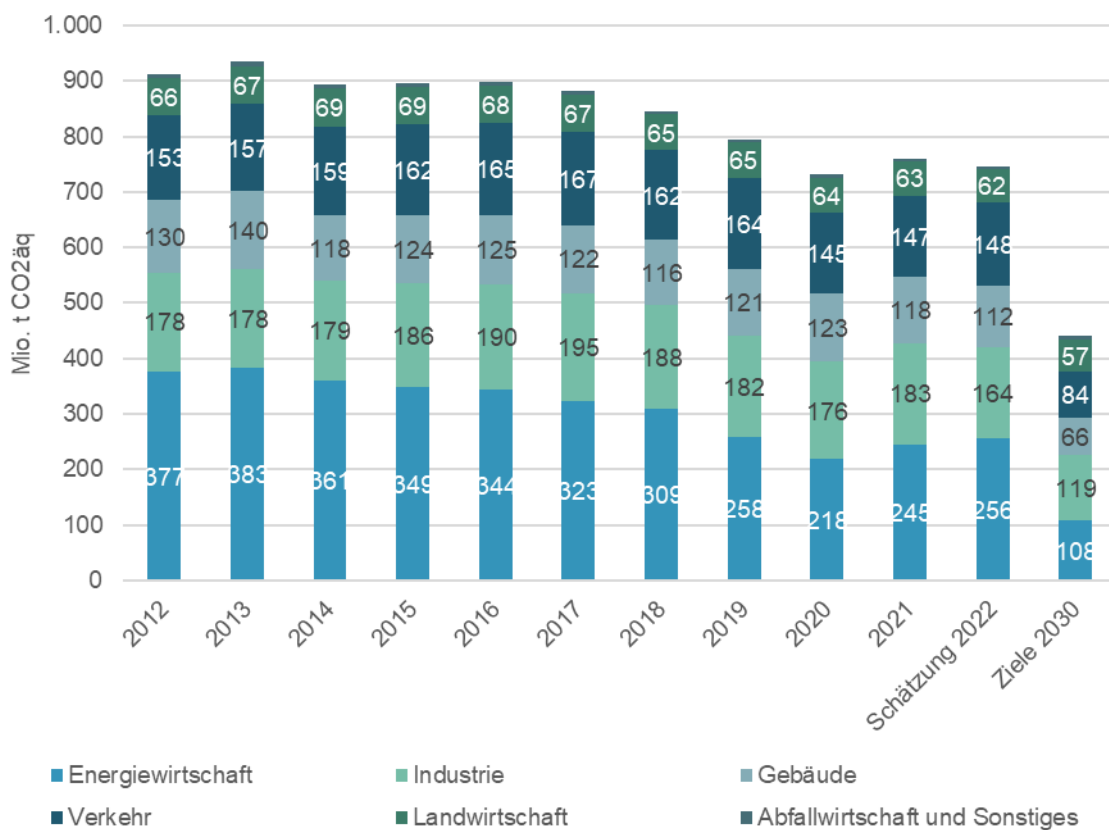
² Emissionen in Bezug auf den Stromverbrauch für Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung werden im Sektor Energie bilanziert

³ Gegenüber den anderen KSG-Sektoren weist dieser Sektor zwei Besonderheiten auf: Zum einen gibt es kein Emissionsminderungsziel wie in den anderen Sektoren, gleichwohl das klare Ziel, die Nettosenke zu erhalten. Zum anderen wird er bei der Berechnung der Gesamtemissionen nicht miteinbezogen. Daher werden die

Maßnahmenvorschlägen ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der THG-Emissionen der Sektoren des KSG von 2012 bis 2021, mit den zu erreichenden Zielen in den Jahren 2022 und 2030. Im Jahr 2021 wurden die Ziele in den Sektoren Verkehr und Gebäude verfehlt, so dass je ein Sofortprogramm zur Erreichung der Klimaschutzziele aufgelegt wurde. Auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität werden im Jahr 2024 die jährlichen Minderungsziele für die Sektoren ab 2031 festgelegt.

Abbildung 1: Entwicklung der THG-Emissionen der Sektoren des Klimaschutzgesetz



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (UBA, 2023)

2.3 Volkswirtschaftliche Sektoren nach amtlicher Statistik

In der deutschen nationalen Statistik werden die wirtschaftlichen Aktivitäten in Wirtschaftszweige (WZ) klassifiziert. Die aktuelle Klassifikation ist die aus dem Jahr 2008 (WZ 2008) und konsistent mit der Systematik der europäischen Statistik der

Emissionen dieses Sektors nur nachrichtlich ausgewiesen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Entnahme von Biomasse zur energetischen Nutzung sich in der Kohlenstoffbilanz im Bereich Landnutzung und Forstwirtschaft widerspiegelt. Die Treibhausgasemissionen der energetischen Biomassennutzung werden in dem Sektor berichtet, in dem die Nutzung stattfindet (wobei CO₂-Emissionen aufgrund des nachwachsenden Rohstoffs lediglich nachrichtlich ausgewiesen werden).

Wirtschaftszweige NACE Rev. 2⁴. Dieses wiederum beruht auf der internationalen Systematik der Wirtschaftszweige ISIC Rev. 4.

Die Klassifikation WZ 2008 unterscheidet 21 Abschnitte. Diese Abschnitte sind weiterhin untergliedert in Abteilungen, Gruppen, Klassen und Unterklassen. Dadurch sind Daten auf verschiedenen Aggregationsebenen auswertbar (*Klassifikation der Wirtschaftszweige*, 2008)

Tabelle 2: Klassifikation der Wirtschaftszweige

A	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei
B	Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden
C	Verarbeitendes Gewerbe
D	Energieversorgung
E	Wasserversorgung; Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen
F	Baugewerbe
G	Handel; Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen
H	Verkehr und Lagerei
I	Gastgewerbe
J	Information und Kommunikation
K	Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen
L	Grundstücks- und Wohnungswesen
M	Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen
N	Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen
O	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung; Sozialversicherung
P	Erziehung und Unterricht
Q	Gesundheits- und Sozialwesen
R	Kunst, Unterhaltung und Erholung
S	Erbringung von sonstigen Dienstleistungen
T	Private Haushalte mit Hauspersonal; Herstellung von Waren und Erbringung von Dienstleistungen durch Private Haushalte für den Eigenbedarf ohne ausgeprägten Schwerpunkt
U	Exterritoriale Organisationen und Körperschaften

Quelle: (*Klassifikation der Wirtschaftszweige*, 2008)

2.4 Bau- und Gebäudebereich

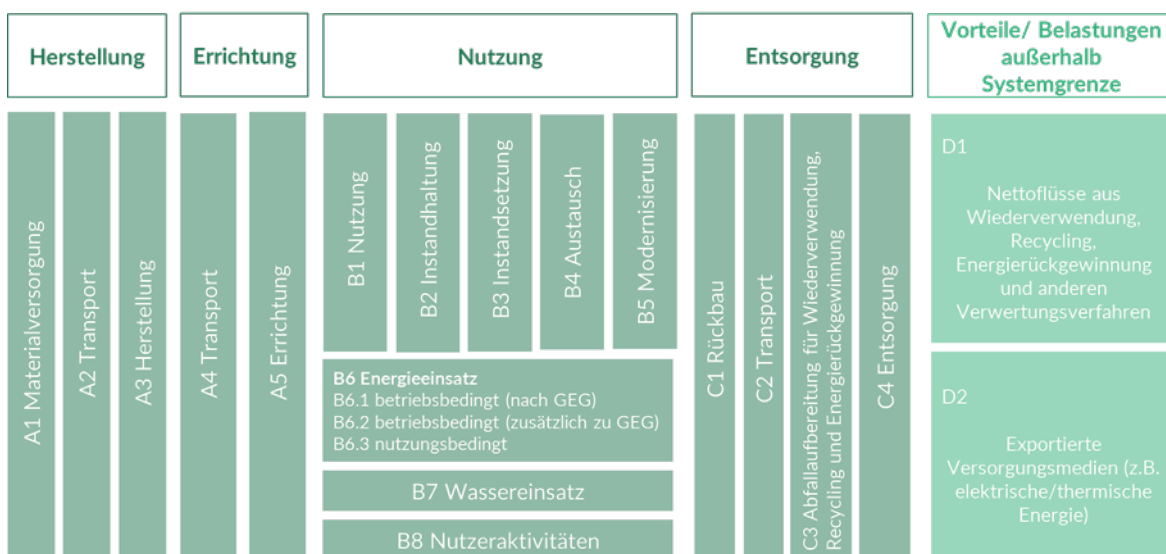
Wie zuvor dargestellt wurde, adressiert der Gebäudesektor im KSG die direkten THG-Emissionen aus dem Betrieb von Gebäuden, während im Industriesektor die THG-Emissionen aus Verarbeitendem Gewerbe und Bauwirtschaft und im Energiesektor die Energiebereitstellung (u.a. Strom und Fernwärme) bilanziert werden. Diese deutliche Abgrenzung erschwert jedoch eine ganzheitliche Betrachtung von Gebäuden und den damit verbundenen Prozessen, Auswirkungen und Entscheidungen, die von

⁴ Veröffentlicht in der Verordnung (EG) Nr. 1893/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 2006.

Gebäudeeigentümerinnen und Gebäudeeigentümern, von Architektinnen und Architekten sowie von Investorinnen und Investoren getroffen werden. Durch die im gesamten Gebäudelebenszyklus in anderen Sektoren nachgefragten Bauprodukte und Prozesse besteht physikalisch und logistisch eine enge Verflechtung zwischen den genannten Sektoren des KSG. Bei der Transformation des Gebäudesektors werden THG-Emissionen deshalb z.T. auch in andere Sektoren verlagert. Wird beispielsweise eine Wärmepumpe als Ersatz einer gasbetriebenen Heizung installiert, reduzieren sich die direkten THG-Emissionen, die im Gebäudesektor bilanziert werden. Allerdings erhöht sich die Nachfrage nach Strom, dessen THG-Emissionen im Energiesektor bilanziert werden. Durch diese Verflechtungen werden auch Minderungen, die durch Investitionsentscheidungen im Gebäude ausgelöst werden, aber in anderen Sektoren erzielt werden, nicht der Zielerreichung des KSG-Gebäudesektors angerechnet, wie beispielsweise der Einsatz von emissionsreduzierten Bauprodukten aus dem Industriesektor. Gleichmaßen werden jedoch auch die Emissionen, die durch die Nachfrage nach Bauprodukten aus dem KSG-Gebäudesektor verursacht werden, nicht in diesem, sondern im KSG-Industriesektor bilanziert.

Zur ganzheitlichen Betrachtung dieser Verflechtungen und der gegenseitigen Rückkopplungen wird deshalb der Begriff *Bau- und Gebäudebereich* verwendet. Der Bau- und Gebäudebereich betrachtet den gesamten Lebenszyklus der Gebäude des Immobilienbestandes und entspricht in Bezug auf das Klimaschutzgesetz einer sektorübergreifenden Betrachtung. Wie in der Kurzstudie zum Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland (Ramseier and Frischknecht, 2020) gezeigt wird, verursachen die Herstellung von Bauprodukten, die Errichtung von Gebäuden sowie deren Betrieb und die Modernisierung insgesamt ca. 40 % der in Deutschland entstehenden THG-Emissionen. Abbildung 2 zeigt den Gebäudelebenszyklus nach DIN EN 15804.

Abbildung 2: Lebenszyklus von Bauwerken nach DIN EN 15804



Quelle: (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022)

Der Lebenszyklus umfasst die Herstellung, Errichtung, Erhalt und Nutzung sowie Rückbau, Aufbereitung und Entsorgung von Gebäuden. Darüber hinaus werden im Modul D die Vorteile bzw. Belastungen außerhalb der Systemgrenze bilanziert. Das Modul D1 kann als Recyclingpotenzial interpretiert werden, D2 beschreibt u.a. Art, Menge und Effekte der an

Dritte gelieferten Energie, die gebäudeintegriert oder gebäudenah erzeugt wird. Die Herstellungsphase umfasst die Beschaffung der Materialien, den Transport sowie die Produktion der Bauprodukte und Anlagen. Die Errichtungsphase umfasst den Transport und die eigentliche Errichtung des Gebäudes, inklusive Baulanderschließung, Rückbau vorhandener Bauwerke sowie Installationsprozesse. In der Nutzungsphase werden sowohl die Nutzung und der Betrieb (Energieeinsatz, Wassereinsatz und Nutzeraktivitäten) des Gebäudes als auch Instandhaltung und Austausch von Bauprodukten, bilanziert. Werden über die Lebensdauer des Gebäudes bauliche Veränderungen vorgenommen oder Bauteile ausgetauscht, werden diese neu produziert. Die daraus resultierenden Umweltwirkungen werden in Modul B4 berücksichtigt. Die Entsorgungsphase umfasst den Rückbau, Transport und die Abfallaufbereitung sowie Entsorgung der Bauteile nach Abriss des Gebäudes (Beuth, 2021). In Bezug auf den Gebäudelebenszyklus umfasst der KSG-Gebäudesektor ausschließlich die direkten Energieverbräuche und Emissionen im Modul B6.1, also den Einsatz von Endenergieträgern während der Nutzungsphase. Der Bau- und Gebäudebereich erweitert die Systemgrenzen auf den gesamten Gebäudelebenszyklus.

Die Aktivitäten im Lebenszyklus des Gebäudes finden sich in zahlreichen Wirtschaftszweigen der amtlichen Statistik (siehe Abschnitt 2.3) wieder. Die Zuordnung ausgewählter Wirtschaftszweige zu den Phasen des Gebäudelebenszyklus ist in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt.

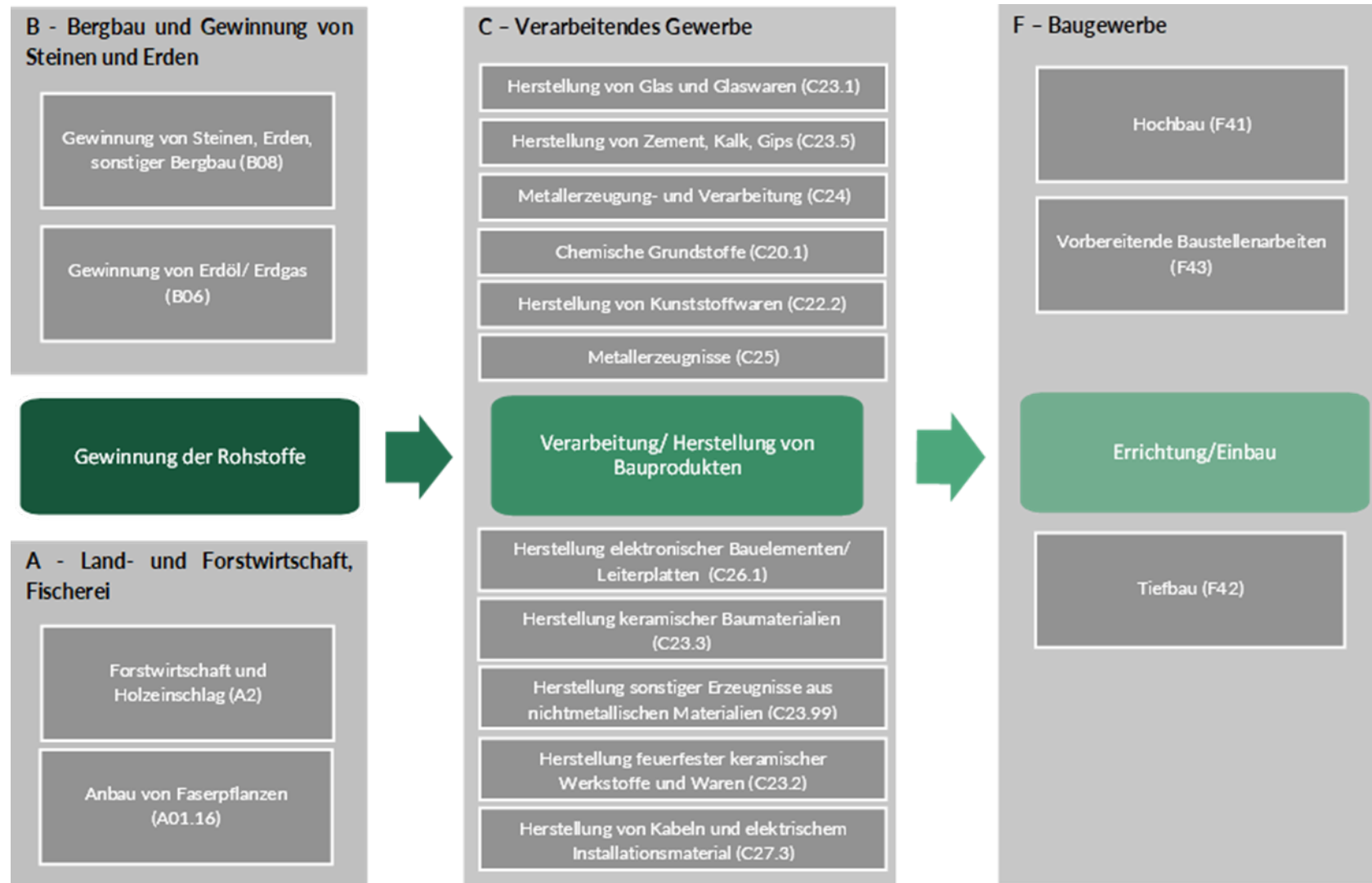
Im Bau- und Gebäudebereich sind von der Gewinnung der Rohstoffe, über die Herstellung von Bauprodukten, die Errichtung, den Erhalt und den Betrieb sowie Rückbau des Gebäudes bis zur Aufbereitung und ggf. Deponierung der Baustoffe verschiedene Wirtschaftszweige beteiligt. Bei der Darstellung ist zu beachten, dass Maschinen, Fahrzeuge und Anlagen zur Herstellung sowie Dienstleistungen (wie bspw. Planung in Wirtschaftszweig M71) vernachlässigt werden. Die Gewinnung der Rohstoffe ist sowohl mit dem Bereich B, also Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden, als auch mit Bereich A, Land- und Forstwirtschaft und Fischerei verbunden.

Neben der Gewinnung von Steinen und Erden (B08) für die Herstellung von bspw. Ziegelsteinen ist der Zweig Gewinnung von Erdöl und Erdgas (B06) sowohl für den Gebäudebetrieb als auch für die Herstellung synthetischer Baustoffe, insbesondere von Dämm- und Dichtstoffen, relevant. Durch den Einsatz von Holzprodukten und faserbasierten Dämmstoffen ist der Bau- und Gebäudebereich auch mit den Wirtschaftszweigen A2 und A01.16 verbunden.

Daneben berührt der Bau- und Gebäudebereich vor allem das Verarbeitende Gewerbe (Zweig C). Die im Gebäude eingesetzten Produkte und Baustoffe (Baustoffe, Bauteile und technische Systeme) entstammen verschiedensten Industrien und Prozessen.

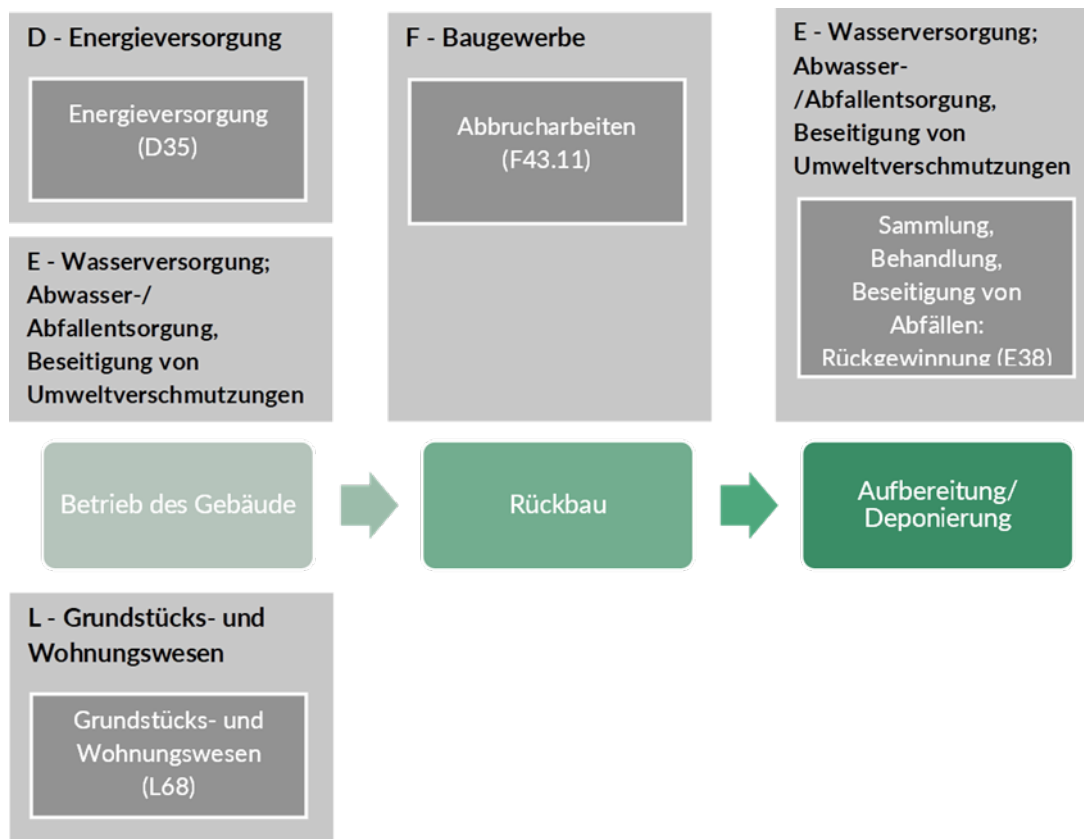
An der Errichtung von Gebäuden ist das Baugewerbe (Zweig F) mit dem Hochbau (F41), vorbereitenden Baustellenarbeiten (F43) sowie Tiefbau (F42) beteiligt. Im Betrieb selbst sind die Wasser-, Abwasser-, und Energieversorgung (E36, E37 und D35) sowie die Abfallwirtschaft (E39) und das Grundstücks- und Wohnungswesen (L68) relevant. Beim Rückbau des Gebäudes ist der Wirtschaftszweig der Abbrucharbeiten (F43.11) im Bereich F beteiligt. Im Anschluss werden die ausgebauten Bauprodukte gesammelt, behandelt, aufbereitet und ggf. deponiert, was dem Zweig E38 zugeordnet wird.

Abbildung 3: Sektoren nach amtlicher Statistik im Bau- und Gebäudebereich – Teil 1



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (*Klassifikation der Wirtschaftszweige*, 2008) und (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022)

Abbildung 4: Sektoren nach amtlicher Statistik im Bau- und Gebäudebereich – Teil 2



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (*Klassifikation der Wirtschaftszweige*, 2008) und (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022)

2.5 Handlungsfeld Industrie

Je nach Kontext umfasst „Industrie“ unterschiedliche Aktivitäten oder Sektoren. Ausgehend von der Statistik der wirtschaftlichen Aktivitäten wird der Industriesektor, z.B. für den Projektionsbericht, zusammengesetzt aus Abschnitt C Verarbeitendes Gewerbe und Teilen des Abschnitts B (Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden).

Im **Common Reporting Framework der UNFCCC** hingegen erfolgt eine getrennte Betrachtung der industriellen Prozessemissionen (Sektor 2). Die Emissionen aus industriellen Prozessfeuerungen und Wärmeerzeugungsanlagen der Industrie sowie Industriekraftwerken (1.A.2) werden im Sektor 1 „Energie“ erfasst (siehe auch Abschnitt 2.2). Darüber hinaus werden auch klimawirksame technische Gase dem Industriesektor zugeschlagen.

Der EU-Emissionshandel (EU-ETS) umfasst erhebliche Teile der Industrie, der Energiewirtschaft sowie den innereuropäischen Flugverkehr. Unter den Emissionshandel fallen dabei große Energieanlagen (ab 20 MW Feuerungswärmeleistung) und energieintensive Industrieanlagen wie zum Beispiel Hochöfen zur Stahlerzeugung, Raffinerien, Zementwerke oder Aluminiumhütten.

Etwa 1/3 der handelspflichtigen THG-Emissionen in Deutschland entstehen in der energieintensiven Industrie, davon wiederum fast 50% in Anlagen zur Herstellung und Verarbeitung von Eisen und Stahl sowie Anlagen der Zementklinkerherstellung (DEHSt, 2022)

Maßnahmen im Bau- und Gebäudebereich beeinflussen über die Nachfrage nach Bauprodukten die Emissionen des Industriesektors, der diese herstellt.

2.6 Lebenszyklusanalyse

Die Lebenszyklusanalyse bzw. das Life Cycle Assessment (LCA), ist eine Methodik zur systematischen Ermittlung und Analyse der Umweltwirkungen eines Produkts, Systems oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebensweg. Dies bedeutet, dass die Umweltauswirkungen von der Gewinnung der Rohstoffe über Herstellung und Nutzung bis zur Entsorgung erfasst und analysiert werden. Durch die systematische Betrachtung entlang des kompletten Lebenszyklus wird sichergestellt, dass auch indirekte Umweltauswirkungen eines Produktes erfasst werden. Die LCA-Methodik und -Vorgehensweise beruht auf DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Diese Normen sind dementsprechend der Leitfaden für die Erstellung von Ökobilanzen. Gemäß diesen Normen werden Ökobilanzen in vier Phasen unterteilt: die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Auswertung und Interpretation. Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden besteht daneben die DIN EN 15978. Den Rahmen liefert DIN EN 15643.

2.7 Umweltökonomische Gesamtrechnung

Die umweltökonomische Gesamtrechnung ist ein Berechnungsansatz, um die Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Wirtschaft zu quantifizieren. Im Unterschied zur Ökobilanzierung steht hier die gesamte Volkswirtschaft im Fokus der Betrachtung und nicht nur einzelne Produkte.

Über eine Input-Output-Analyse werden der Endnachfrage Produktionsfaktoren (wie bspw. der Energieeinsatz) zugerechnet. Daraus ergibt sich der gesamte Produktionsaufwand zur Produktion einer Endnachfrageeinheit. Durch Multiplikation des Energieeinsatzes mit THG-Emissionsfaktoren lassen sich die Emissionen der Endnachfrage ermitteln. Im Vergleich zur Ökobilanzierung eignet sich die umweltökonomische Gesamtrechnung eher für Analysen mit der Zielsetzung, einen Überblick über die gesamte Volkswirtschaft oder größere Teile dieser zu erhalten, während die Ökobilanz sehr spezifische Informationen zu bestimmten Produkten liefern kann (Klann and Schulz, 2001).

3 Analyse der Wechselwirkungen zwischen dem KSG-Gebäudesektor und anderen Sektoren des Klimaschutzgesetzes

Dieses Kapitel analysiert und beschreibt die Wechselwirkungen zwischen dem KSG-Gebäudesektor und anderen Sektoren nach KSG. Dafür werden im ersten Schritt qualitativ die Schnittstellen zwischen dem Gebäudesektor und anderen Sektoren, insbesondere Industrie und Energie, betrachtet und anschließend für konkrete Produkte an diesen Schnittstellen die Stoff- und Energieflüsse sowie THG-Emissionen analysiert. Die betrachteten Produkte sind Teil der ausgewählten Aktivitäten des Bau- und Gebäudebereichs und werden sektorübergreifend analysiert.

Zement bzw. Beton wird in diesem Projekt nicht betrachtet, da dazu im Rahmen von DEKARB I⁵ bereits Untersuchungen durchgeführt werden. Stattdessen wird der Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten auf bzw. an Gebäuden, eine veränderte Absatzstruktur im Dämmstoff-Markt hin zu mehr Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, sowie die Auswirkungen einer Dekarbonisierungsstrategie der Ziegelproduktion analysiert.

3.1 Qualitative Analyse der Wechselwirkungen und Schnittstellen

Abbildung 5 zeigt vor dem Hintergrund der Wirtschaftszweige die direkten Verflechtungen zwischen den Sektoren des Klimaschutzgesetzes in drei Dimensionen. Zum einen werden die Produkte dargestellt, die ausgehend vom KSG-Gebäudesektor nachgefragt werden, aber THG-Emissionen in anderen Sektoren *verursachen* (grau). Eine weitere Dimension bilden Produkte, die vom KSG-Gebäudesektor angeboten werden, aber THG-Emissionen in anderen Sektoren *reduzieren* (grün). Die dritte Dimension bildet diejenigen Produkte ab, die vom KSG-Gebäudesektor nachgefragt werden, aber die THG-Emissionen in anderen Sektoren *reduzieren* (hellgrün).

Produkte, die ausgehend vom KSG-Gebäudesektor nachgefragt werden, aber THG-Emissionen in anderen KSG-Sektoren *verursachen*:

- Energie: In Gebäuden wird Strom für den Betrieb von Wärmepumpen oder sonstige Anwendungen wie Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und Weiße Ware, eingesetzt. Aus dem Energiesektor wird darüber hinaus noch Fern- und Nahwärme an Gebäude übergeben.
- Industrie: Dem Industriesektor können die im Gebäudebereich eingesetzten Bauprodukte, wie beispielsweise Ziegel, Glas, Kalksandstein, Zement und Dämmstoffe, zugeordnet werden. Daneben wird im Verarbeitenden Gewerbe auch die gesamte Technische Gebäudeausrüstung (TGA), wie unter anderem Photovoltaikanlagen (PV) und Wärmepumpen, produziert.
- Land- und Forstwirtschaft: Diesen Sektoren entstammen organische Dämmstoffe, darunter Flachs, Hanf und Stroh sowie Holzprodukte.

⁵ Prognose und Zuordnung von THG-Minderungspotenzialen, Berichtsteil Grundlagen und Angaben zur Zement- und Stahlindustrie; Ressortforschungsprogramm Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) betreut von Juliane Jäger (Referat WB 5); 2023; unveröffentlichter Endbericht

Abbildung 5: Direkte Verflechtungen der Sektoren des Klimaschutzgesetzes unter Berücksichtigung der Wirtschaftszweige

	A Land- u. Forstwirtschaft	B Bergbau, Steine u. Erden	C Verarbeitendes Gewerbe	D Energieversorgung	E Wasserversorgung, Abfallentsorgung	F Baugewerbe
Energie				EE-Strom aus PV WP-Strom Sonst. Stromnachfrage Fernwärmefachfrage		
Verkehr				Nutzung eines E-Auto durch Anschaffung einer Wallbox		
Industrie		Baustoffe	Ziegel			Ziegel
			Glas			Glas
			Kalksandstein			Kalksandstein
			Beton/Zement			Beton/Zement
			Mineralische Dämmstoffe			Mineral. Dämmstoffe
		TGA	Photovoltaik			
			Wärmepumpe			
Landwirtschaft/ LULUCF	Holzbaasierte Baustoffe					
	Organ. Dämmstoffe					
Abfallwirtschaft					Holzbaasierte Baustoffe	
					Sekundärbaustoffe	
	Verursachung von THG-Emissionen in anderen Sektoren		Reduktion von THG-Emissionen in anderen Sektoren durch Angebot		Reduktion von THG-Emissionen in anderen Sektoren durch Nachfrageveränderung	

Quelle: Eigene Darstellung

Produkte, die vom Gebäudesektor angeboten werden, aber THG-Emissionen in anderen Sektoren *reduzieren*:

- Energie: Im Gebäude produzierter Strom aus Erneuerbaren Energien (EE), z.B. durch Photovoltaikanlagen, kommt dem Energiesektor beim Erreichen der Klimaziele zugute.

Zusätzlich zu diesen beiden Dimensionen, bei denen eine (Produkt-)Nachfrage aus dem Gebäudesektor Emissionen verursacht und ein Angebot des Gebäudesektors THG-Emissionen in anderen KSG-Sektoren reduziert, bildet die dritte Dimension Produkte ab, die vom Gebäudesektor nachgefragt werden und die THG-Emissionen in anderen Sektoren reduzieren. Somit stellt diese Dimension ebenfalls einen Emissionsminderungsbeitrag zur Minderung in anderen KSG-Sektoren dar und verdeutlicht die umfassendere Bedeutung des Bau- und Gebäudebereichs im Vergleich zu einer sektoralen Betrachtung nach KSG.

- Energie: Werden in Gebäuden effiziente Geräte betrieben, reduziert sich der Energieverbrauch insgesamt, was sich auf die Zielerreichung im Energiesektor auswirkt. Zudem wirken Sanierungsmaßnahmen sowohl im Gebäudesektor als auch im Energiesektor. Solange fossile Energien zum Betrieb des Gebäudes eingesetzt werden, wirken energetische Sanierungsmaßnahmen auf die Zielerreichung im Gebäudesektor. Wird ein Gebäude allerdings mit Fernwärme oder Strom versorgt, wirken sich Effizienzmaßnahmen am Gebäude auf den Energiesektor aus.
- Industrie: Durch die Nachfrage nach Produkten mit reduzierten THG-Emissionen, wie beispielsweise „grünem Stahl“, der mit Wasserstoff produziert wird, reduzieren sich die THG-Emissionen im Industriesektor.
- Land- und Forstwirtschaft: Die Nutzung organischer Dämmstoffe erhöht zum einen die Senkenleistung der Landwirtschaft (durch Anbau von Faserpflanzen). Zum anderen findet im besten Fall eine Verschiebung der Nachfrage von synthetischen, energieintensiven Dämmstoffen hin zu organischen Materialien statt. Dadurch reduziert sich ceteris paribus die Nachfrage nach energieintensiven Dämmstoffen, deren Produktion und somit die mit der Herstellung verbundenen Emissionen. Im Bereich der Forstwirtschaft wird die Senkenleistung durch die Entnahme von Holz allerdings reduziert.

3.2 Abschätzung der Treibhausgasreduzierungsbeiträge von ausgewählten Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich

3.2.1 Berechnungsgrundlagen

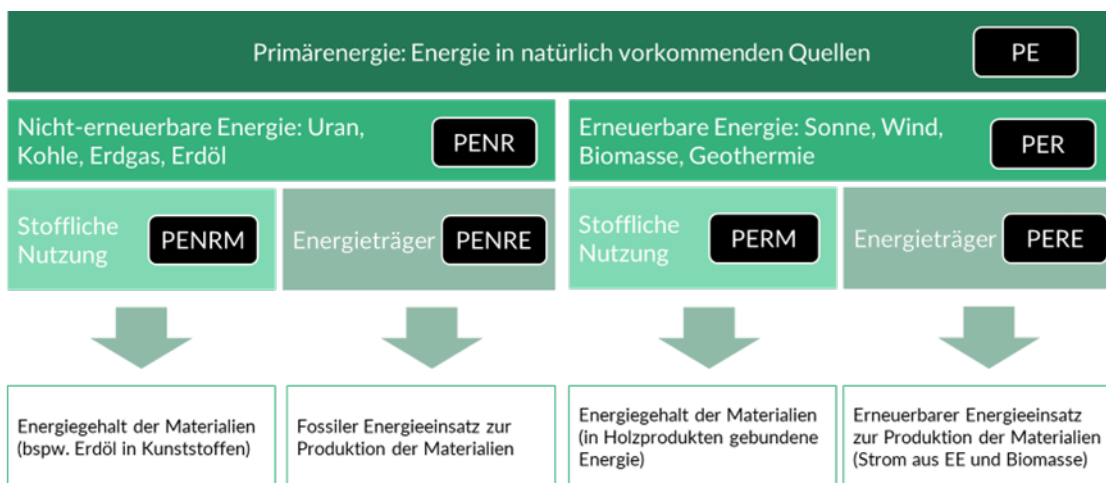
Zur Berechnung des Primärenergieaufwands und der THG-Emissionen in der Herstellung, Nutzung, Entsorgung und im Recycling von Wärmepumpen, Photovoltaik-Anlagen und Dämmstoffen wird die ÖKOBAUDAT verwendet. Die ÖKOBAUDAT ist eine Datenbasis zur Ökobilanzierung von Bauwerken. Sie wird vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) betrieben und vom BBSR inhaltlich betreut.

Die in der ÖKOBAUDAT enthaltenen Lebenswegmodule sind bereits in Abbildung 2 dargestellt. In der Datenbank sind prinzipiell Informationen hinsichtlich der Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungsphase- und Entsorgungsphase sowie zum Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recyclingpotenzial enthalten. In jeder Phase des Lebenszyklus finden weitere Kategorisierungen statt.

In Bezug auf den Energieaufwand wird zwischen Endenergie und Primärenergie unterschieden. Primärenergie ist die zur Verfügung stehende Energie in natürlich vorkommenden Quellen. Nicht-erneuerbare Primärenergie umfasst die fossilen Energieträger Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran. In Bezug auf den Primärenergieaufwand wird in der DIN EN 15804 zum einen in erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergie und zum anderen in stoffliche und energetische Nutzung der Primärenergie unterschieden. Abbildung 6 zeigt die unterschiedlichen Kategorien des Primärenergieaufwands PENRM, PENRE, PERM und PERE. Primary Energy Non Renewable Material (PENRM) und Primary Energy Renewable Material (PERM) geben Auskunft über den Energiegehalt von Materialien, insbesondere die in Holzprodukten gebundenen Energie. Primary Energy Non Renewable Energy (PENRE) und Primary Energy Renewable Energy (PERE) umfassen den Energieaufwand zur Produktion der Materialien.

Endenergie ist dagegen diejenige Energie, die unmittelbar zur Erzeugung von beispielsweise Raumwärme und Licht eingesetzt wird. Endenergie ist demnach Primärenergie abzüglich aller Aufwendungen zur Bereitstellung (energie-experten, 2022).

Abbildung 6: Unterscheidung des Energieaufwands in die Kategorien der Primärenergie



Quelle: Eigene Darstellung nach (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022)

Neben dem Primärenergieaufwand ist die Betrachtung des Treibhauspotenzials zentral. Das Treibhauspotenzial wird in der Ökobilanzierung unter dem Indikator Global Warming Potential (GWP) berücksichtigt. Verwendet wird GWP 100.

Im aktuellen Standard EN 15804 + A2 wird in biogenes und fossiles GWP sowie Treibhausgase aus Landnutzung (luluc) unterschieden. Insbesondere bei Holzprodukten wird zusätzlich biogener Kohlenstoff wirksam gebunden. Wird das Produkt am Lebensende jedoch energetisch verwertet, oxidiert der Kohlenstoff wieder zu CO₂ und wird an die Atmosphäre abgegeben (-1/+1 Regel). Aus diesem Grund werden das fossile und das biogene GWP der Produkte und Gebäude gesondert ausgewiesen (siehe DIN EN 16449:2014-06).

3.2.2 Umgang mit importierten und exportierten Produkten

Da in der Analyse mit Datensätzen der ÖKOBAUDAT gearbeitet wird, wird angenommen, dass die Herstellung der betrachteten Produkte ausschließlich in Deutschland erfolgt. Die

ÖKOBAUDAT bildet die Umweltauswirkungen und Primärenergieaufwände von generischen Produkten unter inländischen Produktionsbedingungen ab. Das bedeutet, dass auch die Förderung der Rohstoffe und die Stromgewinnung auf die landesspezifische Situation parametrisiert wird.

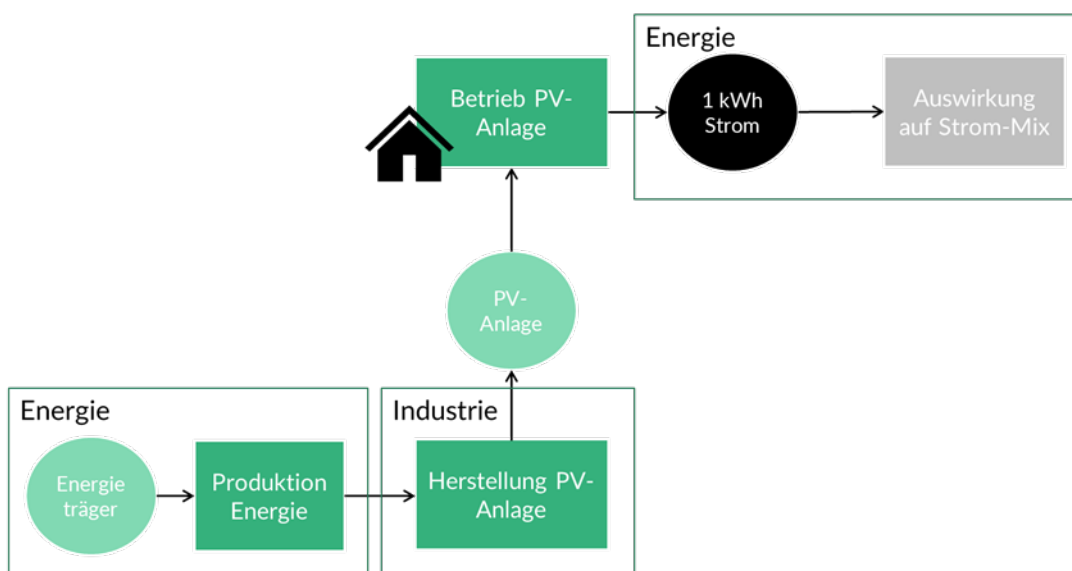
Es ist allerdings anzumerken, dass dies nicht der Realität entspricht. Viele Bauteile und Rohstoffe von Photovoltaik-Anlagen, Wärmepumpen, Dämmstoffen und Ziegeln werden nicht in Deutschland gewonnen oder gefertigt.

3.2.3 Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen

Von Photovoltaik-Anlagen (PV) auf bzw. an Gebäuden wird EE-Strom produziert (Gebäude als Prosumer) und die damit verbundenen Treibhausgasersparungen im KSG-Energiesektor bilanziert. Allerdings wird durch die zunehmende Elektrifizierung mit Wärmepumpen die Nachfrage nach Strom aus dem KSG-Energiesektor durch den KSG-Gebäudesektor erhöht. Daneben wirken sich auch Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle auf den Energie- und damit auch Stromverbrauch von Gebäuden aus, was wiederum auf den Energiesektor wirkt. Aus Sicht des Bau- und Gebäudebereichs stellt der Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten also eine relevante Aktivität dar, um den Anteil erneuerbarer Energie zu erhöhen und die THG-Emissionen zu reduzieren.

Abbildung 7 zeigt schematisch den Lebenszyklus von Photovoltaikanlagen im Kontext der zugehörigen KSG-Sektoren. Die Produktion der PV-Anlage ist im Industriesektor verortet. Die dafür benötigte Energie wird wiederum im Energiesektor bilanziert.

Abbildung 7: Schematische Darstellung des Lebenszyklus von Photovoltaikanlagen im Kontext der Sektoren des Klimaschutzgesetzes

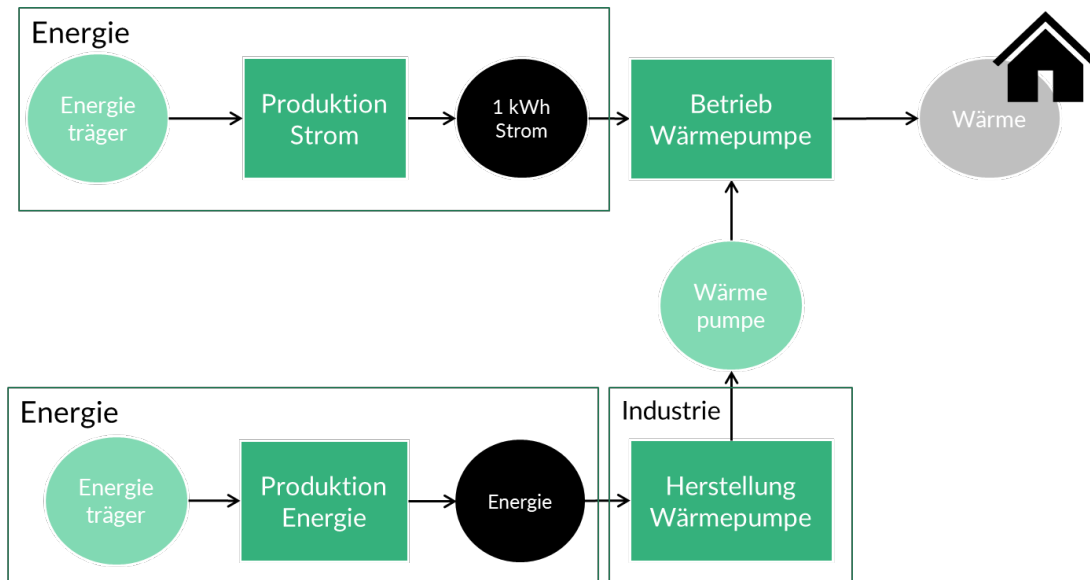


Quelle: Eigene Darstellung

Der von der PV-Anlage produzierte Strom kann entweder im Gebäude eingesetzt oder in das Stromnetz eingespeist werden. In beiden Fällen ergeben sich Auswirkungen auf den KSG-Energiesektor. Wird der Strom direkt im Gebäude genutzt, dann reduziert sich die Nachfrage nach Strom aus der allgemeinen Versorgung. Wird der Strom eingespeist, dann erhöht sich das Angebot an EE-Strom, womit sich der Strom-Mix verändert.

In Abbildung 8 ist exemplarisch für alle Anwendungen von Strom in Gebäuden schematisch der Lebenszyklus von Wärmepumpen dargestellt. Analog zu den Photovoltaikanlagen wird die Herstellung der Wärmepumpen im KSG-Industriesektor, der dafür eingesetzte Strom allerdings im KSG-Energiesektor bilanziert. Der für den Betrieb der Wärmepumpe eingesetzte Strom wird hinsichtlich seiner Emissionen ebenfalls im KSG-Energiesektor bilanziert. Im Gebäude wird Wärme durch die Wärmepumpe bereitgestellt.

Abbildung 8: Schematische Darstellung des Lebenszyklus von Wärmepumpen im Kontext der Sektoren des Klimaschutzgesetzes



Quelle: Eigene Darstellung

3.2.3.1 Methodik und Grundlagen

Die Ermittlung der Energiebilanz und der Treibhausgasminderung basiert auf einer top-down Betrachtung. Zunächst wird das Angebot (EE-Strom aus Photovoltaik) und der Bedarf von Strom (Wärmepumpen, Hilfsenergie, Beleuchtung und Kühlung) in Gebäuden im Status Quo und bis 2045 ermittelt. Daraus wird eine Bilanz erstellt und die verfügbaren Strommengen abgeleitet, die sich im Bau- und Gebäudebereich ergeben. Zusätzlich werden die THG-Emissionen der genutzten bzw. produzierten Strommengen bilanziert. Anschließend werden die durch den Zubau an Wärmepumpen vermiedenen THG-Emissionen berechnet. Abschließend wird die Betrachtung um Herstellungsphase der Anlagen und End-of-Life (Abriss und Recycling) erweitert.

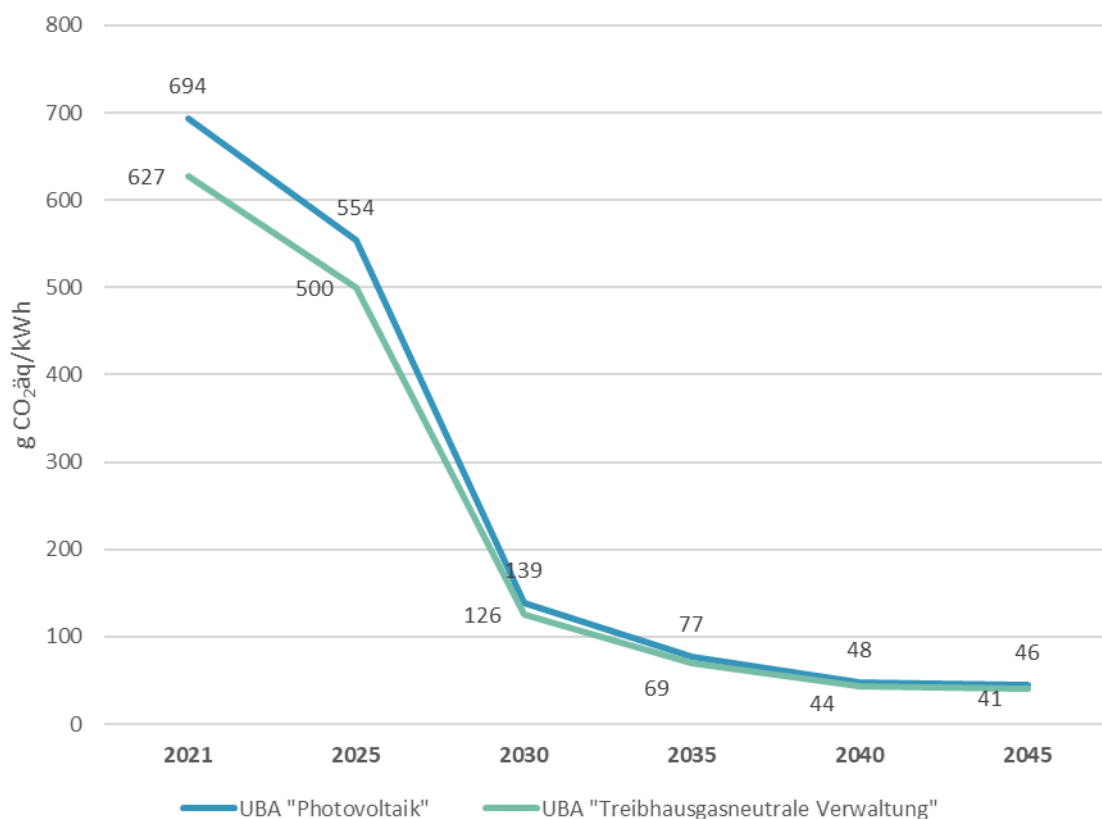
Zur Bewertung der THG-Emissionen aus Stromeinsatz und Strombereitstellung wird die Entwicklung des Strom-Mixes bzw. des Vermeidungsfaktors für Strom aus Photovoltaik benötigt. Für die Abschätzung wird angenommen, dass der Strombedarf von Gebäuden, aus dem Betrieb von Wärmepumpen, der Beleuchtung und Kühlung sowie für Pumpen (Hilfsenergie) mit Strom aus dem Netz gedeckt wird. Der eingespeiste EE-Strom aus PV wird mit dem Vermeidungsfaktor bewertet, da durch die Produktion andere Energieträger aus dem Strom-Mix verdrängt werden (Hawkes, 2010). In Bezug auf den Strom-Mix werden die Emissionsfaktoren aus dem Projektionsbericht 2023 verwendet. Im Projektionsbericht wird eine zügige Dekarbonisierung des Netzstroms bis 2030 angenommen, weshalb der Emissionsfaktor ausgehend von 444 g/kWh in 2022 bis 2030 auf 288 g/kWh und bis 2045

auf 29 g/kWh sinkt. Der zugehörige Primärenergiefaktor von Strom reduziert sich von 2 im Jahr 2022 auf 1,29 in 2030 und 1,15 in 2045.

Da der Vermeidungsfaktor mit hohen Unsicherheiten verbunden ist, werden Faktoren aus zwei unterschiedlichen Studien herangezogen. In einer Untersuchung zu Photovoltaik-Anlagen hat das Umweltbundesamt (UBA) einen Vermeidungsfaktor von 694 g CO₂äq/kWh Strom ausgewiesen. Dieser Faktor ist deutlich höher als der Emissionsfaktor für Netzstrom, wird allerdings damit begründet, dass durch PV vor allem durch Steinkohle und Erdgas verdrängt wird (Lewicki, 2023). In einer weiteren Studie des UBA wird für Photovoltaik ein Vermeidungsfaktor von 627 g CO₂äq/kWh genannt (Huckestein, 2021).

In Bezug auf die Entwicklung der Vermeidungsfaktoren wird mangels vorhandener Daten die relative Entwicklung des Strom-Mixes aus dem Projektionsbericht 2023 unterstellt. Die tatsächliche Entwicklung des Vermeidungsfaktors ist von der Entwicklung des Stromsystems abhängig. Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der verschiedenen Vermeidungsfaktoren bis 2045.

Abbildung 9: Entwicklung verschiedener Szenarien für den Vermeidungsfaktor von Strom aus Photovoltaik



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von (Huckestein, 2021; Lewicki, 2023)

3.2.3.2 Statistische Daten und Prognose

Photovoltaik auf Gebäuden

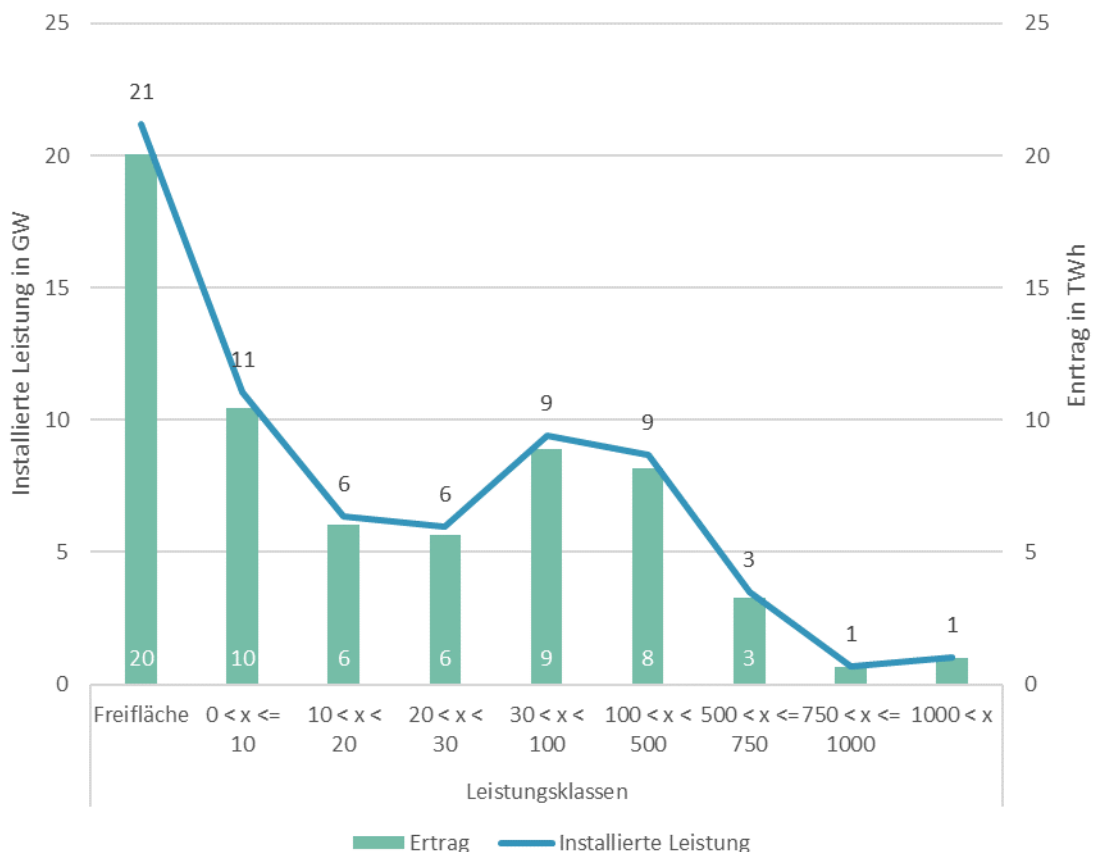
Aufgrund der Datenverfügbarkeit fließen in die Betrachtung ausschließlich Dachanlagen und keine fassaden-integrierten oder gebäudenahen PV-Anlagen ein. Freiflächen-Anlagen

sind ebenfalls von der Untersuchung ausgeschlossen, da sie nicht dem Bau- und Gebäudebereich zugeordnet werden können.

Ende des Jahres 2022 waren in Deutschland insgesamt 2,68 Mio. PV-Anlagen mit einer Leistung von 68 GW installiert, davon rund 15.000 Freiflächen-Anlagen und 2,67 Mio. Dachanlagen. Abbildung 10 zeigt die installierte Leistung und den Ertrag von Dachanlagen nach Leistungsklassen im Jahr 2022⁶.

Für die Berechnung des Ertrags wurden 945 Jahresvolllaststunden unterstellt. Dies entspricht den durchschnittlichen Volllaststunden in den Jahren 2020 und 2021 (BDEW, 2022). Für den prognostizierten Zubau bis 2045 werden Szenariodaten aus einer Studie des Fraunhofer ISE verwendet und die relative Entwicklung bis 2045 auf die statistischen Daten des Jahres 2022 angewandt. Das Szenario entspricht einer Referenzentwicklung auf Basis aktueller politischer Instrumente (Sterchele *et al.*, 2021). Die Verteilung auf die Leistungsklassen wurde bis 2045 als konstant angenommen.

Abbildung 10: Installierte Leistung und Ertrag von Dachanlagen nach Leistungsklassen im Jahr 2022

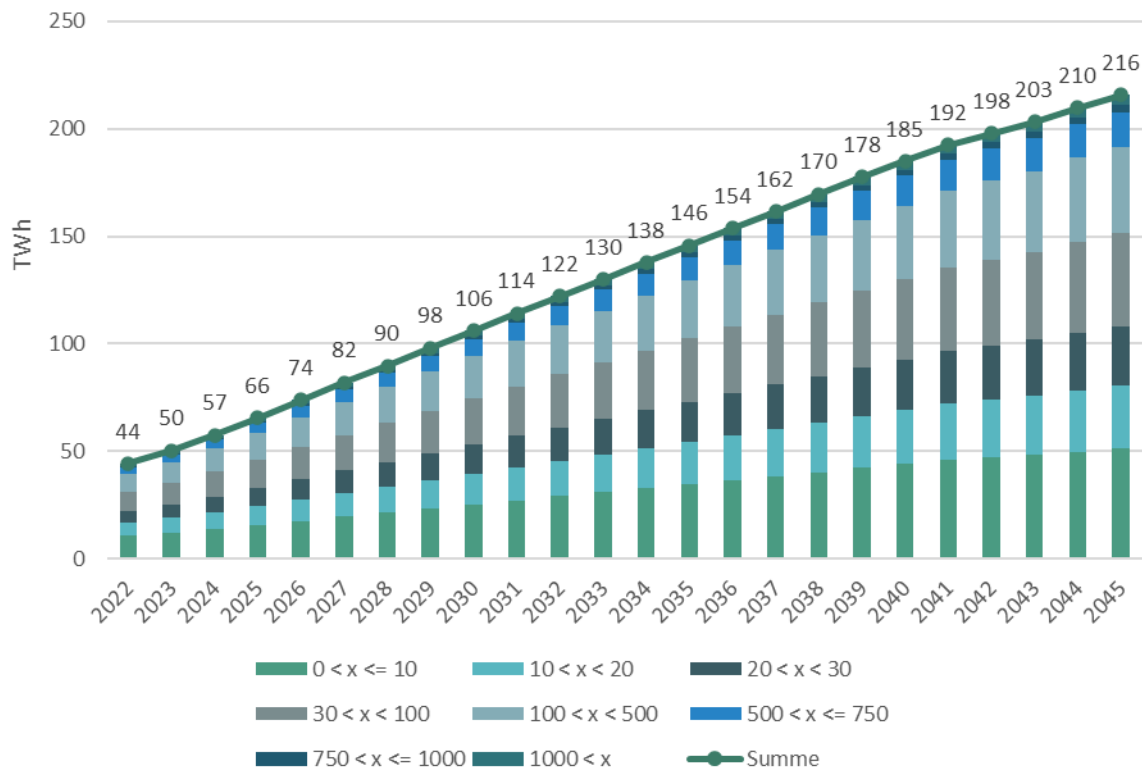


Quelle: Marktstammdatenregister

Abbildung 11 zeigt den prognostizierten Zubau der installierten Leistung von Dachanlagen bis 2045. Ausgehend von 44 TWh im Jahr 2022 steigert sich der Ertrag aus Dachanlagen bis 2045 auf 216 TWh.

⁶ Angaben aus dem Marktstammdatenregister mit Stand Januar 2023

Abbildung 11: Prognostizierter Zubau der installierten Leistung von Dachanlagen bis 2045



Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von Sterchele et al., 2021

Wärmepumpen, Hilfsenergie, Beleuchtung und Kühlung

Nach Informationen der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE) waren mit Stand 2021 in Deutschland rund 1,2 Mio. Wärmepumpen installiert, überwiegend Luft-Wärmepumpen⁷. Bei einem Strombedarf von 7,5 TWh und genutzter Umweltenergie von 17,5 TWh resultiert eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von etwa 3. Die JAZ beschreibt das Verhältnis von eingesetzter Umweltenergie und Strom und spiegelt damit die Effizienz von Wärmepumpen wider. Der Strombedarf entspricht hier dem Endenergiebedarf.

Für den prognostizierten Strombedarf von Wärmepumpen und für Hilfsenergie bis 2045 werden eigene Abschätzungen mit dem Modell Invert/ee-Lab des IREES⁸ durchgeführt. Abbildung 12 zeigt die Entwicklung des Strombedarfs von Wärmepumpen unter Berücksichtigung der aktuellen Rahmenbedingungen und politischen Instrumente. Die Entwicklung entspricht somit einer Referenzentwicklung. Der Strombedarf steigt bis 2040 auf 38 TWh bzw. bis 2045 auf 37 TWh. Dabei werden Sanierungsmaßnahmen und Effizienzsteigerungen im Anlagenbetrieb berücksichtigt. Im Jahr 2045 wären demnach rund 8,4 Mio. Wärmepumpen installiert. Der Bedarf an Hilfsenergie für die Peripherie der Wärmeversorgung steigt ausgehend von 13 TWh in 2022 auf 16 TWh in 2030 und 19 TWh in 2045.

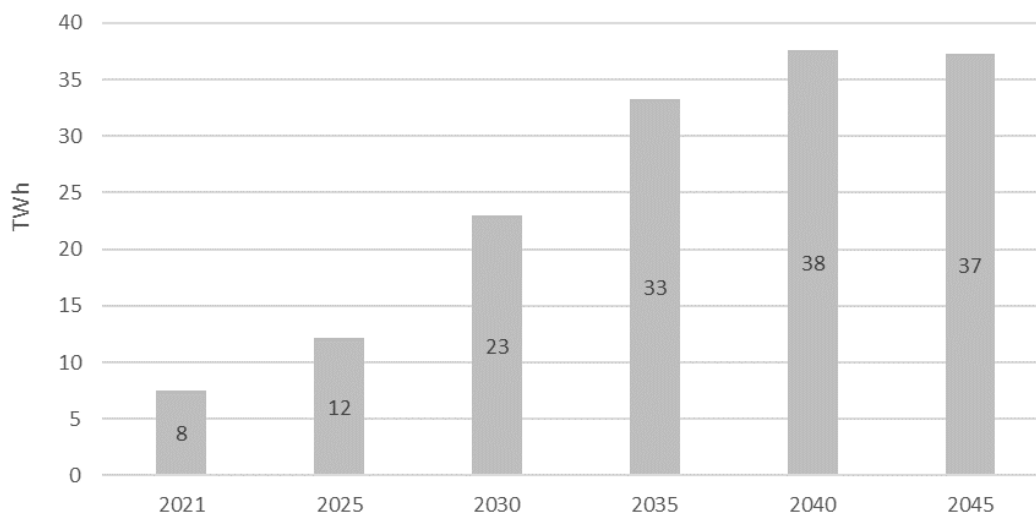
Für den Gebäudebetrieb notwendig sind zudem Beleuchtung, Kühlung, Gebäudeautomation und Personenaufzüge. Weitere Anwendungen, die nicht unmittelbar

⁷ Persönliche Information im Rahmen von (Harthan et al., 2023)

⁸ Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich in Abschnitt 7.2

für den Betrieb des Gebäudes notwendig sind, wie Informations- und Kommunikationstechnologie, werden deshalb nicht betrachtet. Nach Abschätzungen des Fraunhofer ISI⁹ beträgt der Strombedarf für Beleuchtung und Kühlung im Jahr 2021 etwa 54 TWh und sinkt durch Effizienzsteigerungen bis 2045 auf 41 TWh. Für Gebäudeautomation und Personenaufzüge liegen keine Informationen vor, weshalb der Strombedarf nicht abgeschätzt werden kann.

Abbildung 12: Entwicklung des Strombedarfs von Wärmepumpen bis 2045



Quelle: Eigene Darstellung

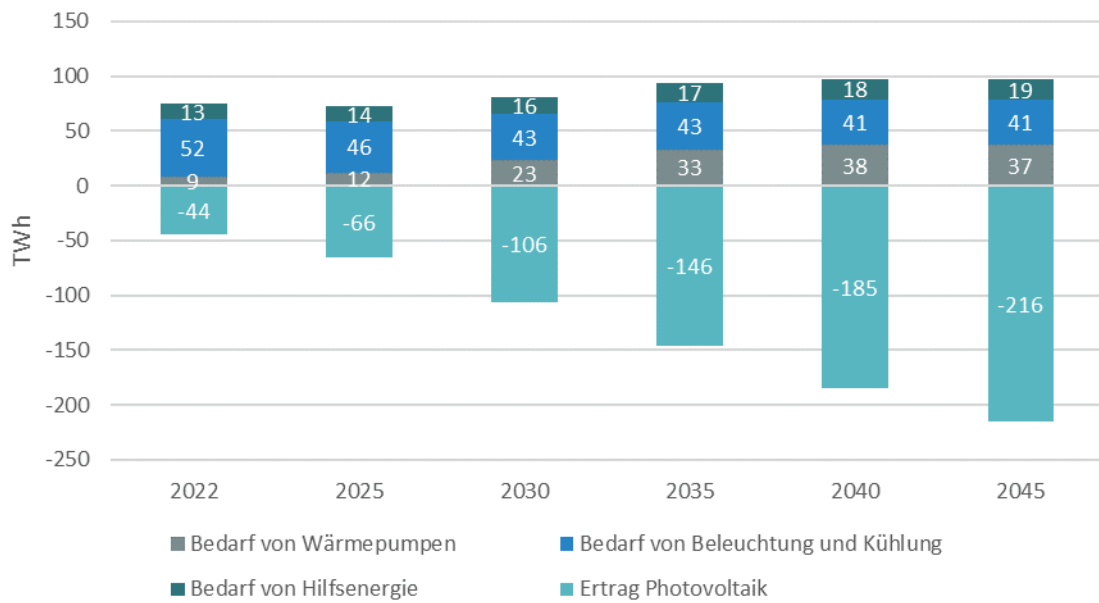
3.2.3.3 Bilanz aus Angebot und Bedarf an Strom in der Nutzungsphase und Bewertung der resultierenden Treibhausgasemissionen

In diesem Abschnitt werden nun das Angebot und der Bedarf von Strom zusammengeführt und die Auswirkungen auf die THG-Emissionen bewertet. Abbildung 13 zeigt den Strombedarf von Wärmepumpen, Beleuchtung und Kühlung sowie das Stromangebot durch PV-Anlagen auf Gebäuden (Endenergie). Im Jahr 2022 überstieg der Bedarf von Wärmepumpen, Kühlung und Beleuchtung noch das verfügbare Angebot von EE-Strom aus PV. Bis 2030 und 2045 steigt das Angebot jedoch deutlich an, während die Nachfrage auf gleichbleibendem Niveau liegt. Es ergibt sich also ein deutlicher Überschuss an Strom aus erneuerbaren Energien im Bau- und Gebäudebereich. Im Jahr 2030 beträgt dieser Überschuss bei den unterstellten Rahmenbedingungen 25 TWh, in 2045 119 TWh.

Werden die in Abschnitt 3.2.3.1 dargestellten Emissionsfaktoren auf das Angebot und die Nachfrage von Strom angewendet, ergeben sich die in Abbildung 14 dargestellten THG-Emissionen bzw. Minderungspotenziale.

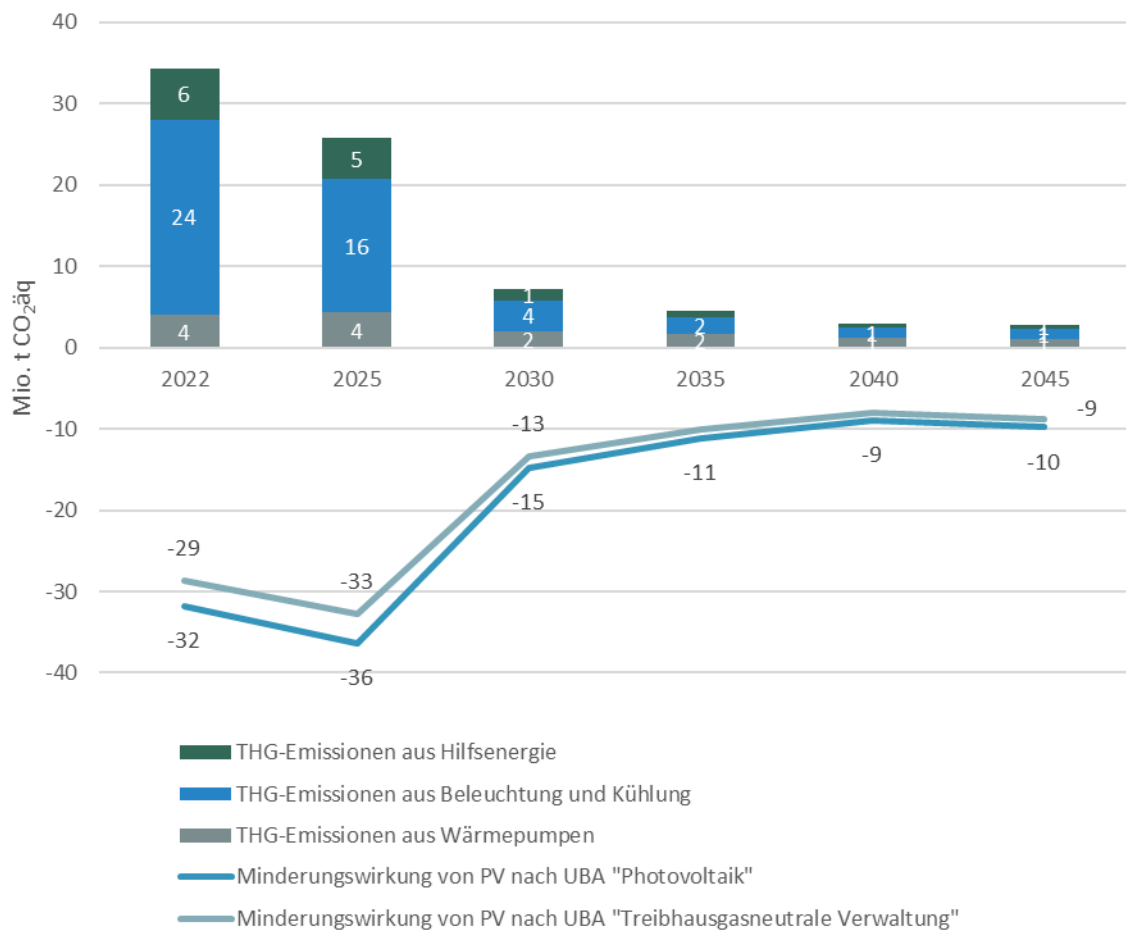
⁹ Angaben aus (Harthan *et al.*, 2023)

Abbildung 13: Vergleich des Bedarfs und des Angebots von Strom im Bau- und Gebäudebereich



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 14: Treibhausgasemissionen aus Strombedarf und Treibhausgasminderungspotenziale aus Stromangebot



Quelle: Eigene Darstellung

Die dargestellten THG-Emissionen von Beleuchtung, Kühlung (blau) sowie Wärmepumpen (grau) und Hilfsenergie (grün) betragen im Jahr 2022 rund 34 Mio. t CO₂äq. Bis 2045 reduzieren sich die Emissionen aus den Anwendungen aufgrund der Dekarbonisierung des Netzstroms auf 7 Mio. t CO₂äq. In Grau dargestellt sind die vermiedenen THG-Emissionen durch eingespeisten EE-Strom, je nach verwendetem Vermeidungsfaktor. Bis 2025 steigen die vermiedenen THG-Emissionen aufgrund des PV-Ausbaus an. Bis 2045 reduziert sich das Minderungspotenzial von EE-Strom, da bei zunehmender Dekarbonisierung des Strom-Mixes das Vermeidungspotenzial von PV sinkt (sinkender Vermeidungsfaktor, siehe Abschnitt 3.2.3.1)

Die Bewertung der THG-Emissionen ist stark von den verwendeten Emissionsfaktoren und somit vom Strom-Mix abhängig. Je nachdem, welcher Vermeidungsfaktor für EE-Strom aus Photovoltaik unterstellt wird, ergibt sich im Jahr 2030 eine Differenz von 6 bis 8 Mio. t CO₂äq, im Jahr 2045 von 6 bis 7 Mio. t CO₂äq. Die Differenzen entsprechen dem Treibhausgasemissionsminderungspotenzial aus Photovoltaik.

Der Zubau von Wärmepumpen verdrängt die Installation anderer, fossiler Wärmeversorgungssysteme. Da der Fokus dieser Analyse jedoch auf der Stromerzeugung und dem Strombedarf in Gebäuden liegt, werden die daraus resultierenden THG-Minderungen vernachlässigt.

3.2.3.4 Exkurs: Bewertung der Treibhausgasemissionen aus dem Angebot und Bedarf von Strom unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs

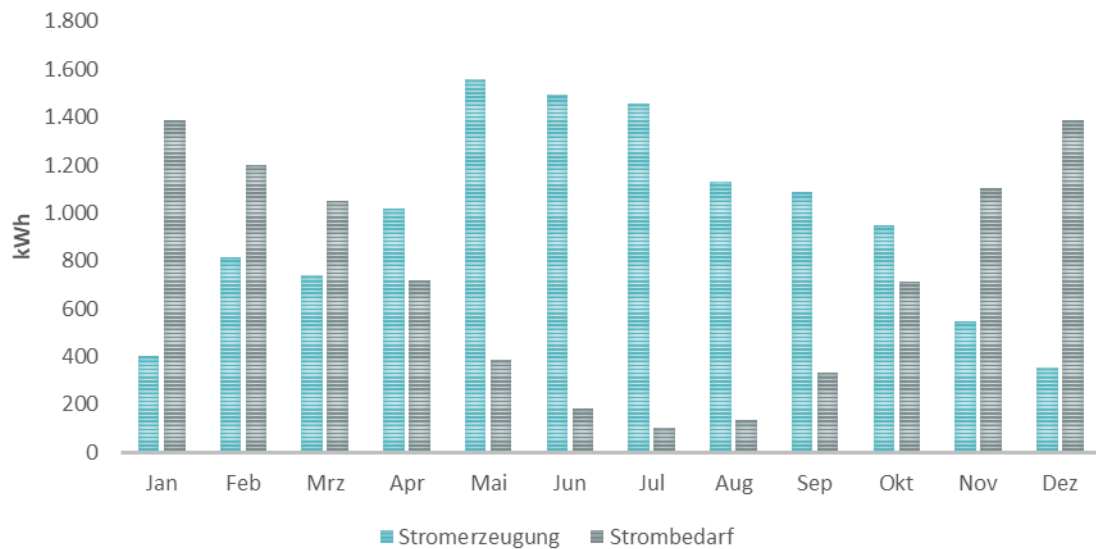
Die zuvor ermittelten Strombedarfe und das Stromangebot basieren auf durchschnittlichen jährlichen Emissions- bzw. Vermeidungsfaktoren. Dieser Durchschnitt ignoriert allerdings die zeitlichen Unterschiede von Stromnutzung und Stromerzeugung, die sich im Verlauf von Monaten, Tagen und Stunden ergeben (Fleschutz and Murphy, 2021).

In diesem Abschnitt werden deshalb die THG-Emissionen aus Strombedarf und das THG-Minderungspotenzial durch EE-Strom auf stündlicher Basis abgeschätzt. Dafür werden stündliche Vermeidungsfaktoren und Emissionsfaktoren für Netzstrom ermittelt und die in den Abschnitten 3.2.3.2 und 3.2.3.3 berechneten Strommengen auf einer stündlichen Basis dargestellt. Dafür werden Standardlastprofile für den Heizwärmebedarf und Photovoltaik verwendet.

Die Erzeugung von EE-Strom aus Photovoltaik ist wesentlich von der Globalstrahlung abhängig und unterscheidet sich damit stark zwischen den Winter- und Sommermonaten. Der Strombedarf von Wärmepumpen entsteht dagegen vor allem in der Heizperiode in den Wintermonaten. Zur Verdeutlichung des zeitlichen Verlaufs zeigt Abbildung 15 den Strombedarf einer Wärmepumpe und die Stromerzeugung aus Photovoltaik in einem Einfamilienhaus im Zeitraum von 12 Monaten. In den Monaten Januar, Februar, März, November und Dezember übersteigt der Strombedarf für die Wärmeversorgung die Stromerzeugung aufgrund der geringeren Globalstrahlung in Deutschland. In den Monaten Mai, Juni und Juli, reduziert sich der Wärmebedarf auf ein Minimum und die Photovoltaik-Anlage kann durch die höhere Globalstrahlung besser ausgelastet werden.

Der Überschuss an EE-Strom aus Photovoltaik entsteht demnach überwiegend in den Sommermonaten, während in den Wintermonaten der Strombedarf für die Wärmepumpe die Menge an erzeugten Strom auf bzw. an Gebäuden übersteigt.

Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der Stromerzeugung aus Photovoltaik und Strombedarf einer Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus



Quelle: Standardlastprofil als eigene Berechnung mit EnergyPro, siehe [Link](#), Heizlastprofil aus dem Forschungsprojekt SynPRO, siehe [Link](#)

Weiterhin gibt es durch die unterschiedlichen Erzeugungskapazitäten auch zeitliche Unterschiede hinsichtlich der Vermeidungsfaktoren und Emissionsfaktoren für Netzstrom. Tabelle 3 zeigt die durchschnittlichen Emissionsfaktoren für 2020 im Jahresverlauf. Der Vermeidungsfaktor für PV erreicht das Maximum in den Sommermonaten Mai, Juni und Juli. Im Jahresmittel beträgt er 897 g/kWh und übersteigt damit die zuvor betrachteten Emissionsfaktoren. Gegensätzlich zur Entwicklung des Vermeidungsfaktors erreicht der Emissionsfaktor des Netzstroms in den Sommermonaten das Minimum. In den Wintermonaten steigen die THG-Emissionen pro erzeugter kWh. Im Jahresmittel beträgt der Emissionsfaktor 343 g/kWh.

Tabelle 3: Durchschnittliche Vermeidungsfaktoren für Photovoltaik und Emissionsfaktoren für Netzstrom im Jahresverlauf für 2020 [in g/kWh]

Monat	Vermeidungsfaktor für Photovoltaik	Emissionsfaktor für Netzstrom
Jan	861.4	372.0
Feb	909.9	256.9
Mrz	907.8	300.1
Apr	940.3	257.2
Mai	935.4	261.8
Jun	935.1	330.7
Jul	914.7	339.6
Aug	914.6	385.4
Sep	904.2	414.2
Okt	875.4	357.2
Nov	828.7	421.2
Dez	831.1	419.0

Quelle: (Fleschutz and Murphy, 2021)

Zum Vergleich mit den durchschnittlichen Emissionsfaktoren (siehe Abbildung 14) werden nun diese Emissionsfaktoren zur Berechnung der THG-Emissionen aus dem Strombedarf für Wärmepumpen und zur Berechnung der Treibhausgasminderungen von EE-Strom aus Photovoltaik verwendet. Da 2020 das aktuelle Jahr im Modell von Fleschutz und Murphy darstellt, werden die Emissionsfaktoren aus 2020 auf die Strommengen im Jahr 2022 angewendet.

Für das Jahr 2022 resultiert ein Minderungspotenzial von 37 Mio. t CO₂äq für Photovoltaik und THG-Emissionen von 3 Mio. t CO₂äq für den Strombedarf von Wärmepumpen. Im Vergleich zur Berechnung mit einem durchschnittlichen Emissionsfaktor für den Strom-Mix werden die THG-Emissionen des Strombedarfs von Wärmepumpen um etwa eine Mio. t CO₂äq überschätzt. Das THG-Minderungspotenzial ist bei Verwendung stündlicher Vermeidungsfaktoren dagegen deutlich höher als bei Annahme eines durchschnittlichen Vermeidungsfaktors.

3.2.3.5 Erweiterung um Herstellungsphase und End-of-Life

Für eine vollständige Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus wird die Betrachtung an dieser Stelle um Herstellung, Abriss und Recycling der technischen Komponenten erweitert.

Für Wärmepumpen und Photovoltaikanlagen werden Daten aus der ÖKOBAUDAT verwendet. Die Datensätze bilden generische Produkte und die länderspezifische Situation in Deutschland ab. Da die ÖKOBAUDAT die Umweltwirkungen und Primärenergieaufwände in den Modulen A1-A3 unter Berücksichtigung aktueller Produktions- und Rahmenbedingungen ausweist, werden in diesem Abschnitt der Primärenergieaufwand und die THG-Emissionen nur für das Jahr 2022 abgeschätzt.

Zur Berechnung des Primärenergiebedarfs in der Nutzungsphase wird der derzeit im GEG gültige Primärenergiefaktor für Netz-Strom, also 1,8, verwendet. Zur Berechnung der THG-Emissionen aus der Nutzung von Netz-Strom wird analog der Emissionsfaktor aus dem Jahr 2022 verwendet.

Da für Beleuchtung und Kühlung nur ein Endenergiebedarf und keine Informationen zu Anzahl an Geräten vorliegt, werden diese beiden Anwendungen hier nicht dargestellt.

Tabelle 4 zeigt den Primärenergieaufwand und das Treibhausgaspotential in der Produktion, Abfallbehandlung und Beseitigung sowie Recycling von rund 1,4 Mio. Wärmepumpen und rund 2,7 Mio. Photovoltaikanlagen. Dabei wird ausschließlich der Primärenergieaufwand als Energieträger, also PENRE und PERE (siehe Abschnitt 3.2.3.1) verwendet. Zum Vergleich mit dem Emissionsfaktor in der Nutzungsphase (siehe Abschnitt 3.2.3.1) wird nur GWP-fossil dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Angaben für Photovoltaik in Quadratmeter angegeben sind.

Die Anzahl an Anlagen wird deshalb unter Berücksichtigung der Angaben in Frischknecht et al., 2020 umgerechnet. Mit einer durchschnittlichen installierten Leistung von 350 kWp und einer Größe von 1,6 m² resultieren rund 74 Mio. Quadratmeter Photovoltaik-Module.

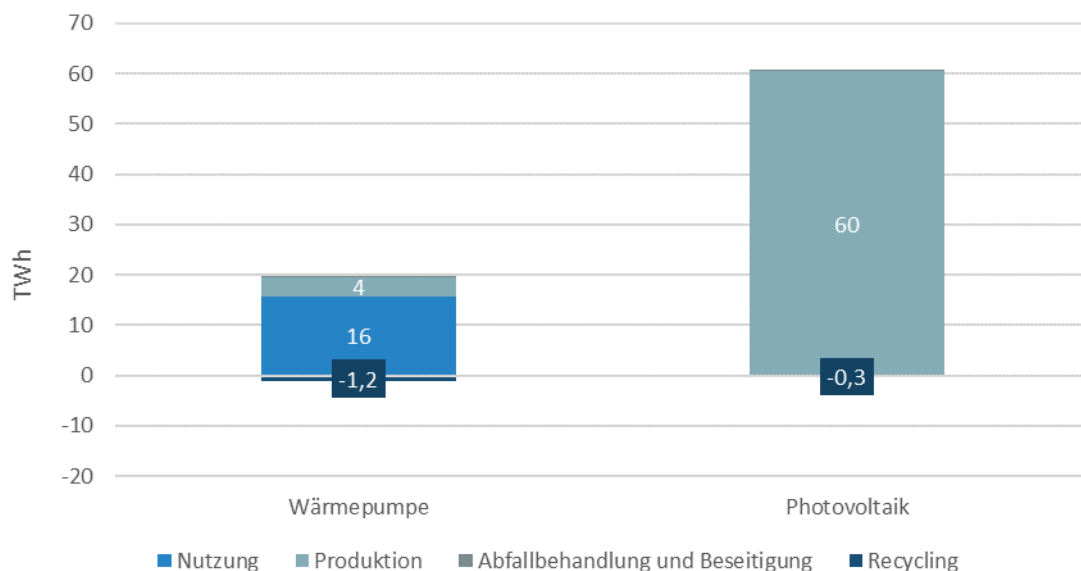
Tabelle 4: Primärenergieaufwand [in kWh] und Treibhauspotential [in kg CO₂äq] in verschiedenen Lebenszyklusmodulen von Wärmepumpen und Photovoltaikanlagen

Modul	Bezeichnung	PENRE + PERE		GWP-fossil	
		Wärmepumpe ¹⁰	PV-Anlage ¹¹	Wärmepumpe	PV-Anlage
A1-A3	Produktion	2691	1370	456	302
C3-C4	Abfallbehandlung und Beseitigung	146	27	30	12
D	Recycling	-833	-121	192	-33

Quelle: ÖKOBAUDAT

Abbildung 16 zeigt den (energetischen) Primärenergieaufwand in der Herstellung, Nutzung und Beseitigung bzw. Abfallbehandlung aller derzeit betriebenen Wärmepumpen und PV-Anlagen. Daneben wird eine mögliche Gutschrift aus dem Recycling der Anlagen dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass der Primärenergieaufwand in der Nutzungsphase den Primärenergieaufwand in der Produktion der Wärmepumpen deutlich übersteigt. Obwohl der spezifische Primärenergiebedarf in der Herstellung von PV-Anlagen geringer ist als bei Wärmepumpen, übersteigt der gesamte Primärenergieaufwand in der Produktion von PV-Anlagen den der Wärmepumpen. Dies liegt an der insgesamt höheren Anzahl von PV-Anlagen.

Abbildung 16: Primärenergieaufwand in der Herstellung, Nutzung, Abfallbehandlung und Beseitigung sowie mögliche Einsparung durch Recycling für Wärmepumpen und Photovoltaik im Jahr 2022



Quelle: Eigene Darstellung

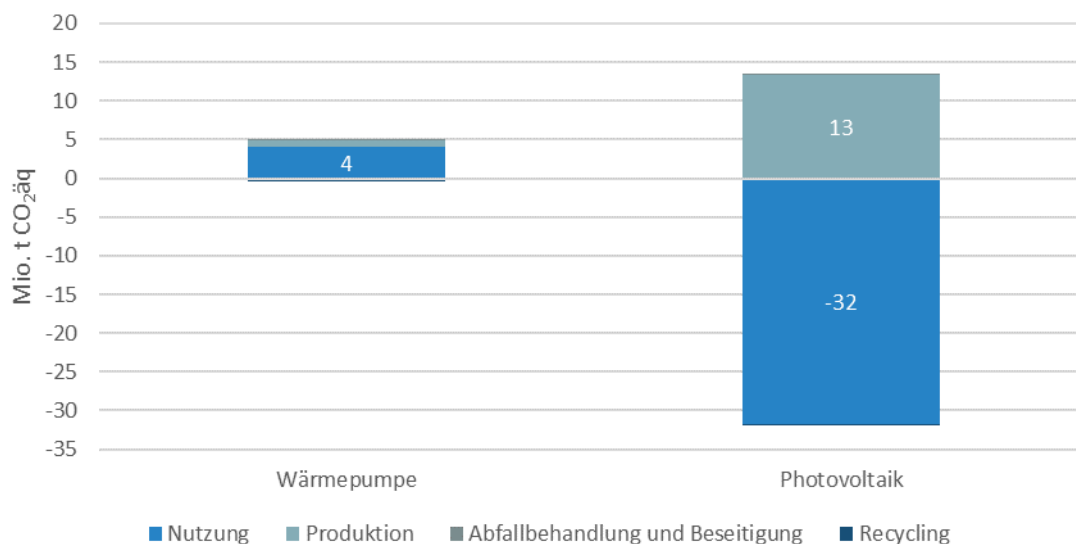
¹⁰ In der ÖKOBAUDAT gibt es Luft-Wasser Wärmepumpen, Sole-Wasser Wärmepumpen und Wasser-Wasser Wärmepumpen. Da Luft-Wasser Wärmepumpen der am häufigsten installierte Typ ist, wird zur Vereinfachung nur die Luft-Wasser Wärmepumpe angenommen. Es wird eine Wärmepumpe mit einer Leistung von 14 kW herangezogen, siehe [Link](#).

¹¹ In der ÖKOBAUDAT gibt es zwei Photovoltaikanlagen, die sich hinsichtlich des Ertrags unterscheiden. Es wird das System mit einem Ertrag von 1000 kWh/m² gewählt, siehe [Link](#).

Die Darstellung entspricht einer punktuellen Betrachtung. Das bedeutet, dass für diejenigen PV-Anlagen und Wärmepumpen, die im Jahr 2022 installiert werden, nicht nur der Primärenergieaufwand für Herstellung und Nutzung, sondern auch für Abfallbehandlung und Recycling abgebildet ist.

Abbildung 17 zeigt darüber hinaus das Treibhauspotenzial von Wärmepumpen und Photovoltaik unter Berücksichtigung des Vermeidungsfaktors für Strom aus Photovoltaik von (Lewicki, 2023). Analog zu der Betrachtung des Primärenergieaufwands übersteigen die THG-Emissionen in der Nutzungsphase die THG-Emissionen in der Herstellung von Wärmepumpen. Bei Photovoltaikanlagen werden die THG-Emissionen in der Herstellung von der erzielten THG-Minderung überlagert.

Abbildung 17: Treibhausgasemissionen (fossil) in der Herstellung, Nutzung, Abfallbehandlung und Beseitigung sowie mögliche Reduktion durch Recycling für Wärmepumpen und Photovoltaik im Jahr 2022

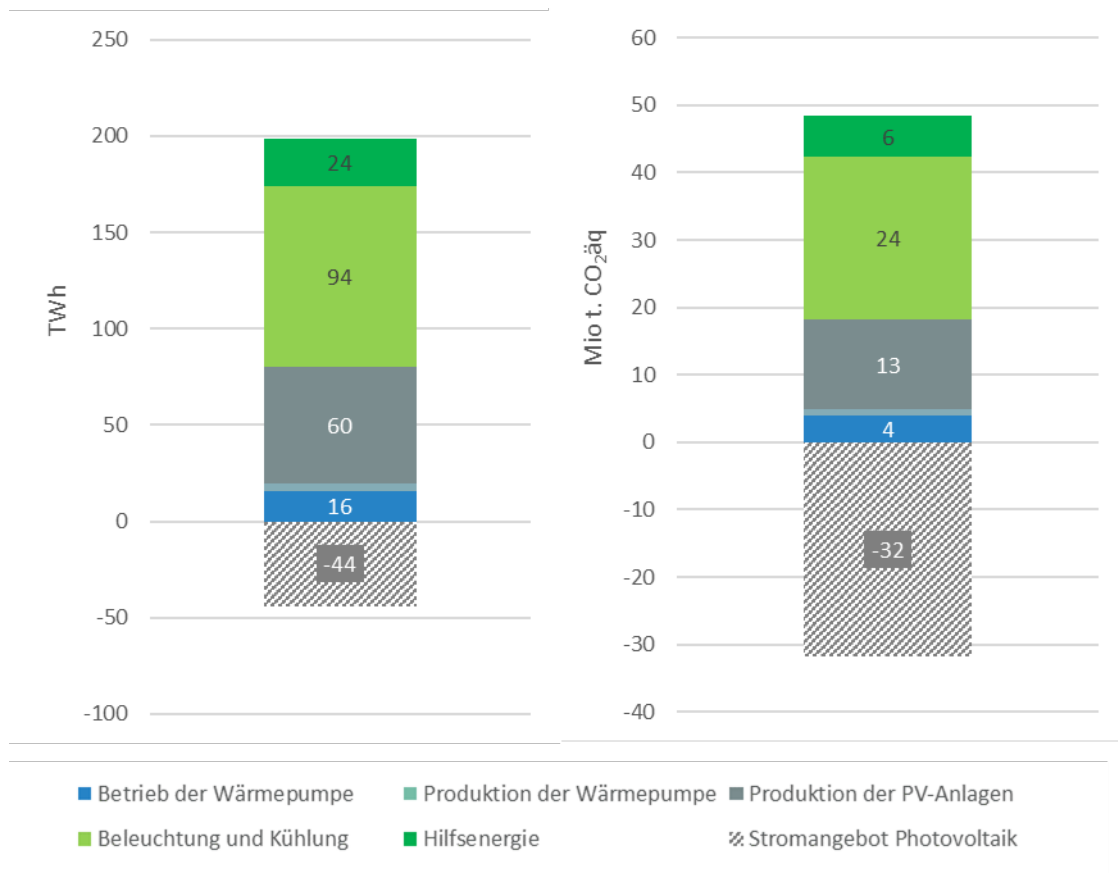


Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Betrachtung der THG-Emissionen in der Herstellung von Photovoltaik-Modulen zu berücksichtigen, dass nur ein geringer Anteil in Deutschland bzw. Europa produziert wird. Der überwiegende Anteil von Modulen sowie Komponenten wird derzeit in China produziert (IEA, 2022).

Abschließend zeigt Abbildung 18 einen Vergleich des Primärenergieaufwands und des Treibhauspotentials mit dem Stromangebot aus Photovoltaik für das Jahr 2022. Der Primärenergieaufwand für den Betrieb der Wärmepumpe, Beleuchtung, Kühlung und Hilfsenergie sowie für die Herstellung von Wärmepumpen und PV-Anlagen übersteigt das Stromangebot aus Photovoltaik im Jahr 2022. Dabei sind jedoch die Primärenergieaufwände für weitere Strombedarfe aus dem Gebäudebetrieb sowie die Herstellung von Beleuchtung, Kühlung und Peripherie der Wärmeversorgung (Hilfsenergie) nicht berücksichtigt. Hinsichtlich der THG-Emissionen resultiert unter Annahme eines Vermeidungsfaktors von 719 g/kWh bereits im Jahr 2022 eine hohe Treibhausgasemissionen durch Photovoltaik. Die THG-Emissionen aus der Herstellung von Wärmepumpen und Photovoltaik sowie aus der Nutzung von Wärmepumpe, Beleuchtung, Kühlung und Peripherie der Wärmeversorgung können allerdings nicht gedeckt werden.

Abbildung 18: Vergleich von Primärenergieaufwand und Treibhauspotential über den Lebenszyklus mit dem Stromangebot aus Photovoltaik im Jahr 2022



Quelle: Eigene Darstellung

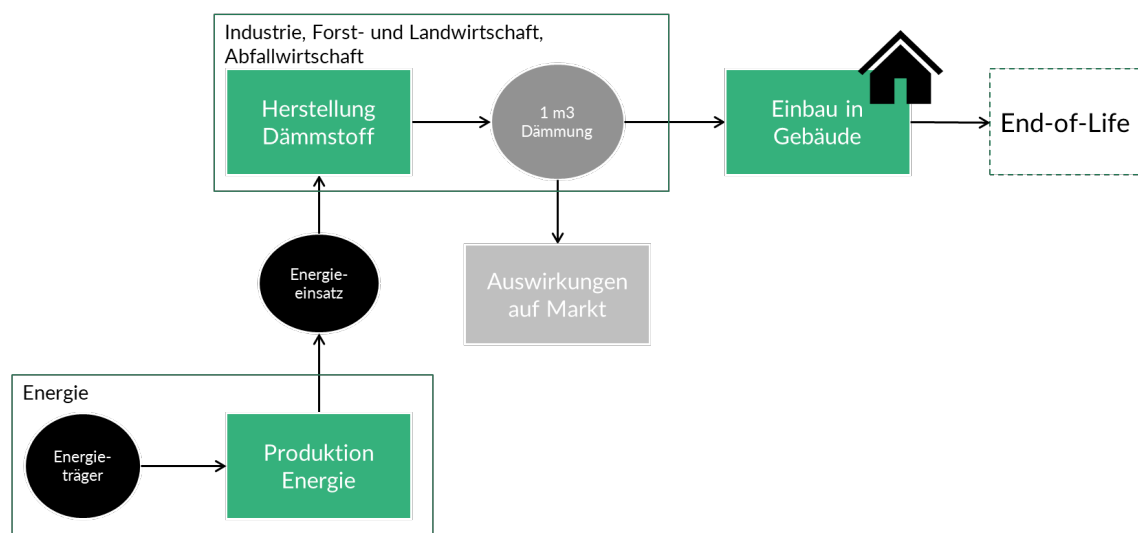
3.2.4 Veränderte Zusammensetzung im Dämmstoff-Markt

Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. hat in einer Erhebung im Jahr 2019 die Marktanteile von Dämmstoffen erfasst (FNR, 2020). Darin wird deutlich, dass Dämmstoffe auf Basis von fossilen und mineralischen Rohstoffen einen Anteil von mehr als 90 % am Absatzvolumen haben. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (nawaRo) erreichen 9 %, wobei Holzfasern das vorrangig eingesetzte Material sind.

Durch die erhöhte Nutzung von Dämmstoffen aus nawaRo würden nicht nur der Energieverbrauch und die THG-Emissionen im Industriesektor reduziert, es würde auch eine Verschiebung aus dem Industriesektor in den Sektor Land- und Forstwirtschaft stattfinden.

Abbildung 19 zeigt schematisch den Lebenszyklus von Dämmstoffen in Bezug zu den Sektoren des Klimaschutzgesetzes. Die Produktion der Dämmstoffe ist durch die verschiedenen Materialien in mehreren Sektoren verortet: der Industrie, der Forst- und Landwirtschaft sowie in der Abfallwirtschaft. Die dafür benötigte Energie wird wiederum im Energiesektor bilanziert.

Abbildung 19: Schematische Darstellung des Lebenszyklus von Dämmstoffen im Kontext der Sektoren des Klimaschutzgesetzes



Quelle: Eigene Darstellung

3.2.4.1 Methodik und Grundlagen

Die Analyse eines veränderten Absatzmarkts von Dämmstoffen hinsichtlich THG-Minderungspotenzial basiert auf einer top-down Betrachtung. Zunächst wird der derzeitige Absatz von Dämmstoffen aus der Statistik und die Prognose bis 2045 ermittelt. Für die Prognose werden eigene Abschätzungen mit Invert/ee-Lab (Modellbeschreibung siehe Anhang 7.2) durchgeführt.

Anschließend werden mehrere Szenarien definiert, um unterschiedliche Anteile von Dämmstoffen aus nawaRo zu betrachten. Mithilfe der ÖKOBAUDAT werden dann für die verschiedenen Szenarien und Dämmstoffe der Primärenergieaufwand und die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Dämmstoffe berechnet.

Für ausgewählte Dämmstoffe erfolgt abschließend noch eine Aufteilung des Energieaufwands in der Herstellung auf die eingesetzten Energieträger und Rohstoffe, um

den Zusammenhang zwischen den Sektoren des Klimaschutzgesetzes besser zu verstehen.

Dämmstoffe haben je nach Material und Beschaffenheit unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten und Einsatzmöglichkeiten, welche in Tabelle 5 dargestellt sind. Zu beachten ist, dass Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen nicht im Bereich der Perimeterdämmung eingesetzt werden können.

Tabelle 5: Wärmeleitfähigkeiten und Einsatzmöglichkeiten von ausgewählten Dämmstoffen

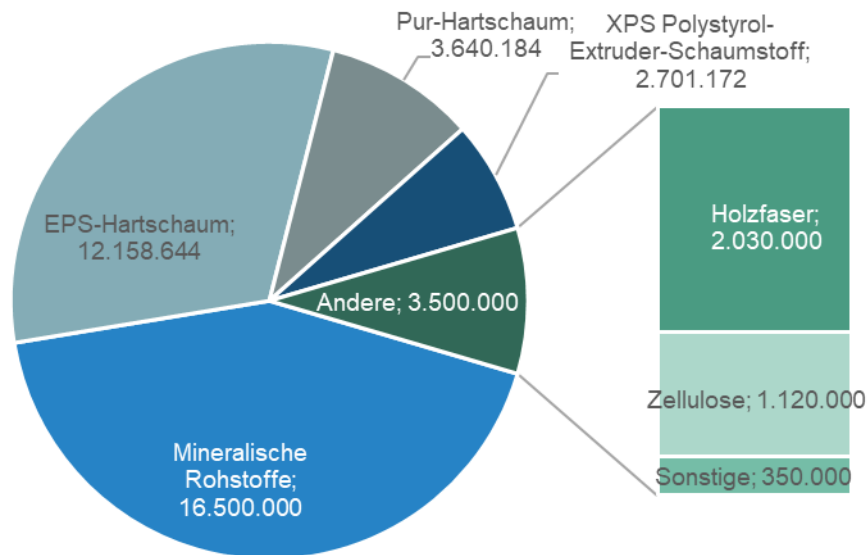
Material	Einsatzmöglichkeiten	Wärmeleitfähigkeit W/m*K
Polystyrol (expandiert)	Wand, Dach, Boden	0,035 – 0,045
Polystyrol (extrudiert)	Perimeter, Wand	0,035 – 0,04
Polyurethan-Hartschaum	Dach, Wand	0,022 – 0,045
Phenolharz	Wand, Decke, Dach	0,022 – 0,025
Flachmatten	Wand, Decke, Dach	0,039
Hanfmatte	Wand, Dach, Boden	0,043
Seegras	Decke, Dach, Wand	0,045
Schafwolle	Dach, Wand, Decke	0,043
Holzfaserplatten	Dach, Wand, Decke, Boden	0,038
Holzwoleplatten	Wand, Dach, Decke, Boden	0,090
Korkplatte	Wand, Dach	0,040
Jutematten	Dach, Wand, Decke	0,039
Strohballen	Wand, Dach, Boden	0,052
Zellulosefaser	Dach, Wand, Decke, Boden	0,040
Mineralwolle	Dach, Wand, Decke, Boden	0,035

Quelle: (Marktübersicht - Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, 2019)

3.2.4.2 Statistische Daten und Prognose

Abbildung 20 zeigt den Absatz von Dämmstoffen im Jahr 2019. Insgesamt wurden 38,5 Mio. m³ Dämmstoff abgesetzt. Dabei entfielen 16,5 Mio. m³ auf mineralische, 18,5 Mio. m³ auf fossile und 3,5 Mio. m³ auf nachwachsende Rohstoffe (FNR, 2020). Die Verteilung auf die einzelnen Dämmstoffe entstammt dem Leitfaden Dämmstoffe 3.0 aus dem Jahr 2017 (Bauzentrum München, 2017). Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen erreichen 2019 einen Marktanteil von rund 9 %, Dämmstoffe aus fossilen Rohstoffen rund 48 % und Dämmstoffe aus mineralischen Rohstoffen rund 43 %.

Abbildung 20: Dämmstoffabsatz im Jahr 2019 [in m³]



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis (Bauzentrum München, 2017; FNR, 2020)

Die Prognose zur Entwicklung des Absatzvolumens von Dämmstoffen wird mit Invert/ee-Lab berechnet. Die Entwicklung basiert auf einem Referenzszenario unter Berücksichtigung aktueller politischer Instrumente und Energiepreise. Tabelle 6 zeigt die Entwicklung des eingesetzten Dämmstoffvolumens bis 2045 nach Gebäudeelementen. In Invert/ee-Lab können Dach, Keller bzw. Bodenplatte und Außenwand gedämmt werden.

Aufgrund erhöhter Aktivität bei der energetischen Modernisierung steigt das Dämmstoffvolumen bis 2030 auf 43,5 Mio. m³ an und sinkt danach bis 2045 auf 32,9 Mio. m³. Diese Entwicklung liegt sowohl an den gestiegenen Energiepreisen, die eine energetische Modernisierung wirtschaftlicher machen, als auch an den Instandsetzungszyklen von Gebäuden. Die Verteilung auf die verschiedenen Bereiche für die statistischen Daten im Jahr 2019 erfolgt auf Basis der modellierten Verteilung im Jahr 2030.

Tabelle 6: Entwicklung des Dämmstoffvolumens bis 2045 [in Mio. m³]

Einsatzort	2019	2030	2035	2045
Dach	12,2	13,6	13,7	9,0
Keller/Bodenplatte	13,8	15,5	15,4	9,8
Außenwand	12,5	14,4	14,1	14,1
Summe	38,5	43,5	43,2	32,9

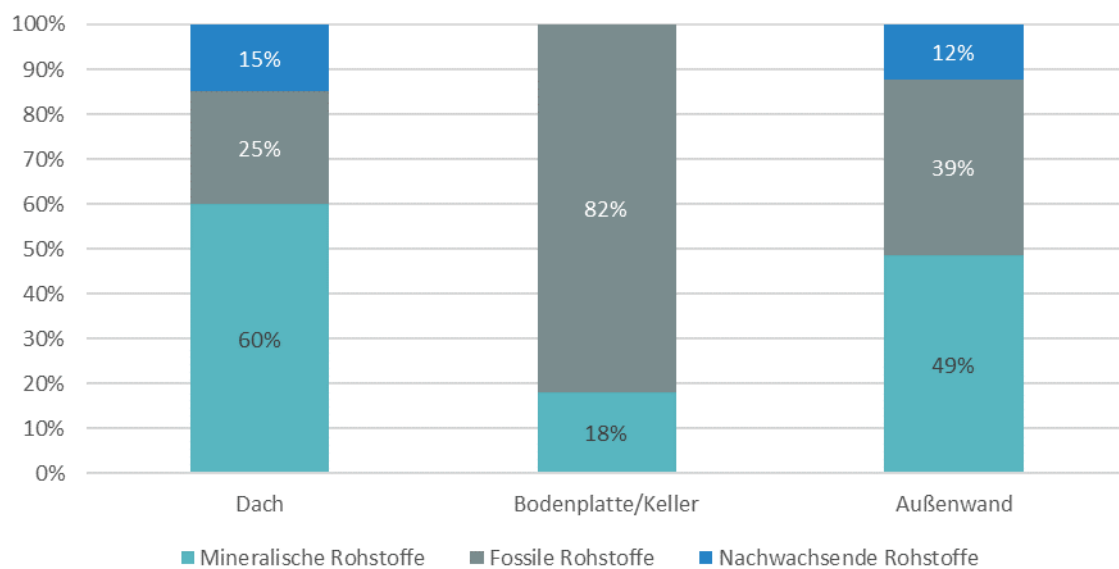
Quelle: Eigene Berechnungen mit Invert/ee-Lab

Bei der Berechnung des nachgefragten Dämmstoffvolumens rechnet Invert/ee-Lab mit einer durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/m*K. In den folgenden Berechnungen wird der spezifische Primärenergiebedarf zur Herstellung, Entsorgung und Recycling der ausgewählten Dämmstoffe auf diesen Wert skaliert.

3.2.4.3 Entwicklung von Szenarien zur Erhöhung des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen

Zur Analyse eines veränderten Absatzes im Dämmstoff-Marktes zugunsten von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen wird mit verschiedenen Szenarien gearbeitet. Dafür werden zunächst die statistisch erfassten Dämmstoffe auf die einzelnen Gebäudeelemente so aufgeteilt, dass insgesamt die in Abbildung 20 dargestellte statistische Verteilung erreicht wird. Abbildung 21 zeigt diese Verteilung der 2019 statistisch erfassten Dämmstoffmengen auf die verschiedenen Einsatzorte. Da Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen nicht im Bereich der Perimeterdämmung eingesetzt werden können, ist der Anteil dort Null.

Abbildung 21: Verteilung der im Jahr 2019 statistisch erfassten Dämmstoffe auf die Einsatzorte



Quelle: Eigene Darstellung

In vier Szenarien werden die Auswirkungen von einer Fortführung des Status Quo und verschiedenen Steigerungen des Marktanteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen betrachtet. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die vier verschiedenen Szenarien.

Tabelle 7: Szenarien zur Entwicklung des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bis 2045

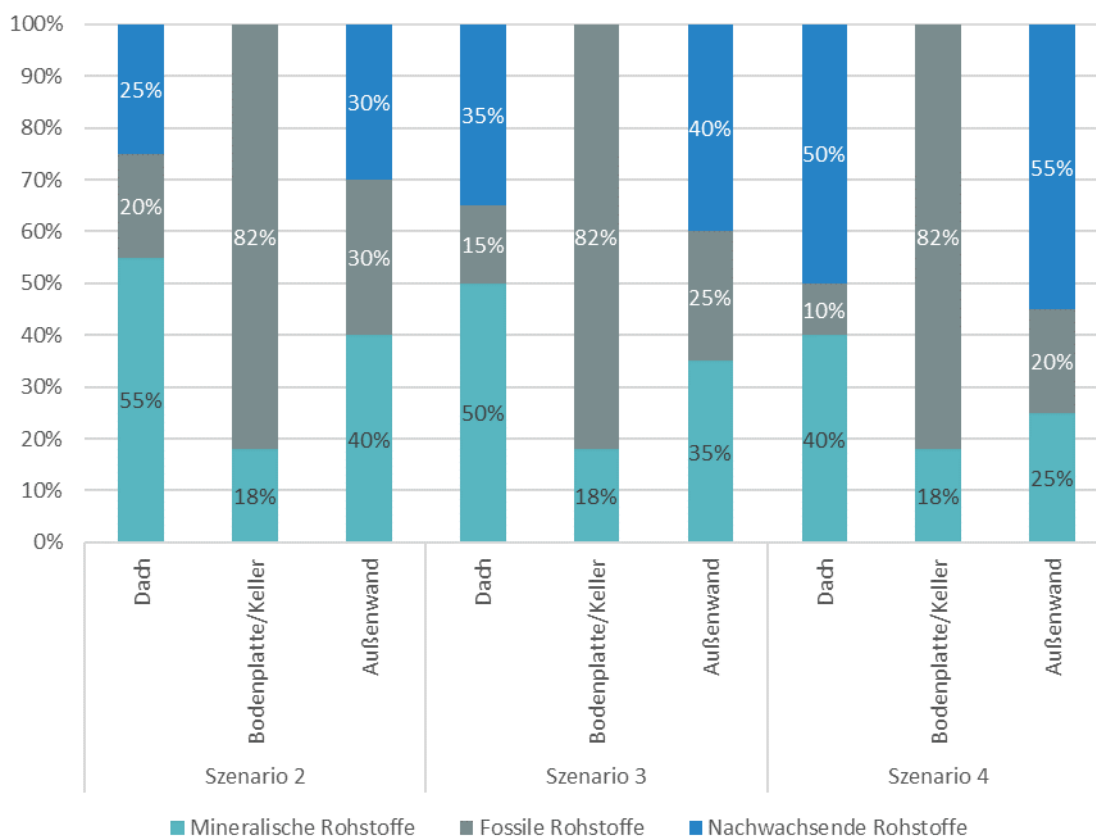
	Beschreibung	Nachwachsende Rohstoffe	Mineralische Rohstoffe	Fossile Rohstoffe
1	Weiter so, keine Steigerung des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen	9 %	43 %	48 %
2	Moderate Zunahme des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen	18 %	38 %	43 %

	Beschreibung	Nachwachsende Rohstoffe	Mineralische Rohstoffe	Fossile Rohstoffe
3	Mittlere Zunahme des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen	25 %	35 %	40 %
4	Starke Zunahme des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen	35 %	28 %	37 %

Quelle: Eigene Darstellung

Zur Entwicklung der Szenarien 2, 3 und 4 wird der Anteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bis 2045 auf 18 %, 25 % bzw. 35 % erhöht. Die Anteile von Dämmstoffen aus fossilen und mineralischen Rohstoffen werden anteilig reduziert. Abbildung 22 stellt die Entwicklung der Anteile nach den Einsatzorten im Jahr 2045 dar. Die Veränderungen finden sich in den Einsatzbereichen Dach und Außenwand.

Abbildung 22: Entwicklung der Anteile verschiedener Dämmstoff-Kategorien nach Einsatzbereichen im Jahr 2045



Quelle: Eigene Darstellung

3.2.4.4 Bewertung des Energieeinsatzes und der Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus der Dämmstoffe

In diesem Abschnitt werden der Primärenergieaufwand und die THG-Emissionen für unterschiedliche Anteile von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bis 2045 betrachtet.

Methodik und Datengrundlage

Die Berechnung des Energieeinsatzes und der THG-Emissionen über den Lebenszyklus und die betrachteten Szenarien erfolgt anhand von sechs verschiedenen Dämmstoffen, welche die statistische Verteilung in Abschnitt 3.2.4.2 abbilden.

Tabelle 8 zeigt den Primärenergieaufwand in der Herstellungsphase der Materialien bei Skalierung auf eine Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/m*K. Weitere Daten zum Primärenergieaufwand und Treibhauspotenzial finden sich in Tabelle 17 in Anhang 7.1.

Die Umweltauswirkungen in der ÖKOBAUDAT in den Modulen A1-A3 basieren auf aktuellen Produktionsprozessen und Rahmenbedingungen. Potenzielle Veränderungen dieser Bedingungen in der Zukunft werden nicht abgebildet. In der Analyse wird bis 2045 deshalb mit den gleichen Datensätzen gerechnet. Es kann in der Zukunft allerdings mit einer effizienteren Produktion sowie verändertem Energieträgereinsatz gerechnet werden. Eine Dekarbonisierung des Herstellungsprozesses würde die Bewertung der Umweltauswirkungen in die Gewinnung der Rohstoffe bzw. den Rohstoffeinsatz verschieben.

Darüber hinaus werden ausschließlich die Module A1-A3, C3, C4 und gesondert D1 betrachtet. Transport- und Bauprozesse werden nicht berücksichtigt.

In der Tabelle wird deutlich, dass der überwiegende Anteil des energetischen Primärenergieaufwands (PENRE und PERE) aus fossilen Quellen stammt. Sowohl fossile Rohstoffe als auch nachwachsende Rohstoffe haben einen stofflichen Energiegehalt. Bei Holzfasern und Zellulose ist dieser überwiegend erneuerbar (PERM), bei EPS, XPS und PIR ausschließlich nicht erneuerbar (PENRM).

Tabelle 8: Primärenergieaufwand in verschiedenen Kategorien in der Herstellungsphase (Module A1-A3) ausgewählter Dämmstoffe [in kWh/m³]

Material aus ÖKOBAUDAT	PERE	PERM	PENRE	PENRM
EPS-Hartschaum (Rohdichte 25 kg/m ³)	11	0	321	243
Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff	12	214	29	0
Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS)	65	0	381	361
Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE)	355	1.038	625	36
PIR Hartschaum ¹²	37	0	301	154
Mineralwolle (Schrägdach-Dämmung)	34	0	159	0

Quelle: ÖKOBAUDAT

Tabelle 9 zeigt darüber hinaus das fossile und biogene Treibhauspotenzial (GWP) sowie das gesamte Treibhauspotenzial. Treibhausgase aus Landnutzung,

¹² Polyisocyanurat (PIR) ist eine Variante des Dämmstoffs Polyurethan-Hartschaum (PUR)

Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (luluc) werden hier aufgrund ihres geringen Anteils nicht betrachtet. Vergleicht man die Dämmstoffe anhand des fossilen GWP sind deutliche Unterschiede erkennbar. Ebenso verhält es sich beim biogenen GWP. Bei Zellulosefasern und Holzfasern wird biogener Kohlenstoff wirksam gebunden, weshalb das biogene Treibhauspotenzial in der Herstellung stark negativ ist. In der Entsorgung (Modul C3 – Abfallbehandlung) werden die Produkte jedoch als energetisch verwertet angenommen und der Kohlenstoff oxidiert wieder zu CO₂ und wird an die Atmosphäre abgegeben. Bei den mineralischen und fossilen Dämmstoffen ist das biogene GWP dagegen Null oder positiv, was auf den anteiligen Primärenergieaufwand aus erneuerbaren Quellen zurückzuführen ist.

Tabelle 9: Treibhauspotenzial (GWP) in verschiedenen Kategorien in der Herstellungsphase (Module A1-A3) ausgewählter Dämmstoffe [in kg CO₂äq/m³]

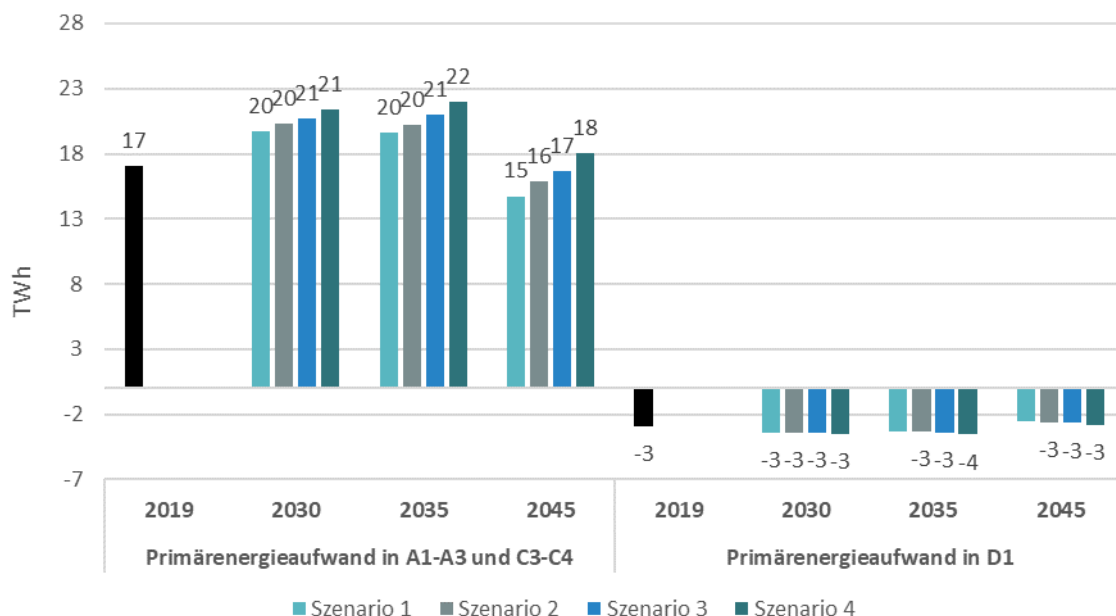
Dämmstoffe	GWP fossil	GWP biogenic	GWP total
EPS-Hartschaum (Rohdichte 25 kg/m ³)	71	0	71
Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff	12	-94	-82
Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS)	93	1	94
Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE)	126	-356	-230
PIR Hartschaum	68	0	68
Mineralwolle (Schrägdach-Dämmung)	45	0	45

Quelle: ÖKOBAUDAT

Ergebnisse

Abbildung 23 zeigt den Primärenergieaufwand des aktuellen und möglichen zukünftigen Dämmstoffmarktes über den gesamten Lebenszyklus für die verschiedenen Szenarien.

Abbildung 23: Primärenergieaufwand (energetisch und stofflich) der verschiedenen Szenarien über den gesamten Lebenszyklus



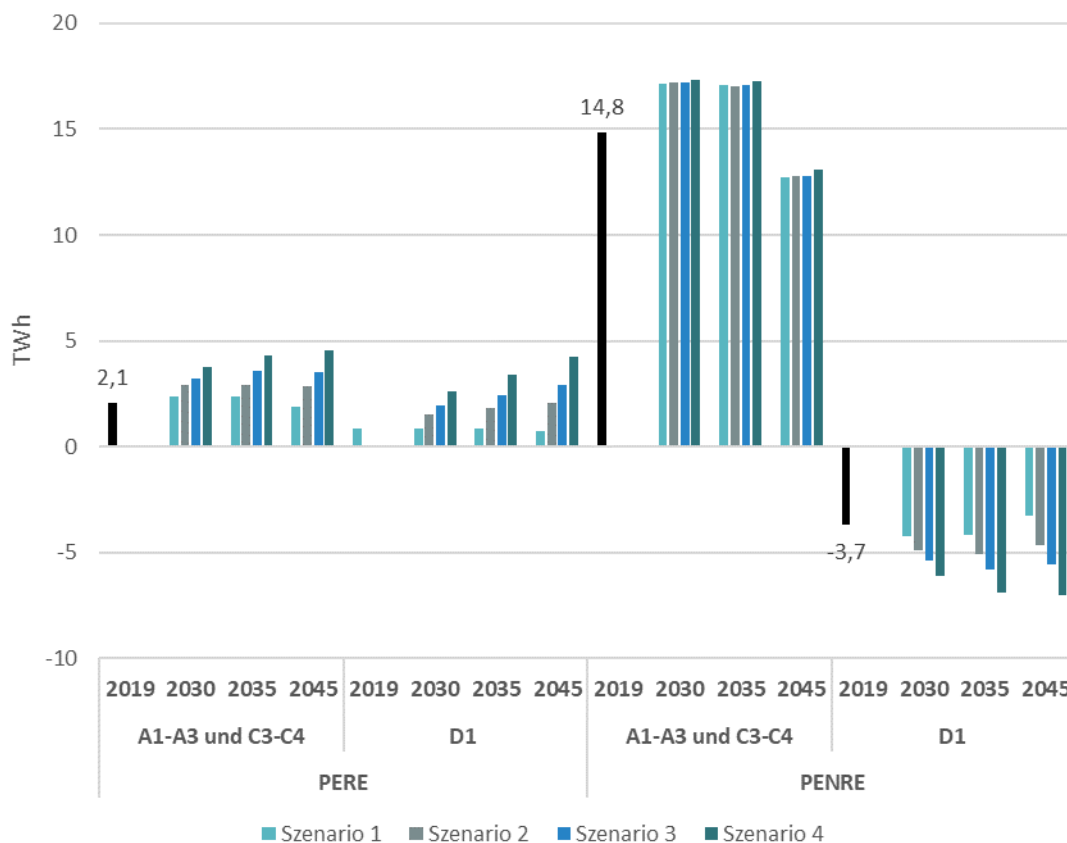
Quelle: Eigene Darstellung

Der dargestellte Primärenergieaufwand umfasst dabei sowohl die energetische als auch die stoffliche Nutzung. Abbildung 35 in Abschnitt 7.2 zeigt die Ergebnisse getrennt nach Primärenergie als Energieträger (PERE und PENRE) sowie Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM und PENRM). Da Primärenergie zur stofflichen Nutzung über den gesamten Lebenszyklus nahezu null ist, wird in Abbildung 23 der gesamte Primärenergieaufwand dargestellt.

In der Abbildung ist links der Primärenergieaufwand für Herstellung und Abfallbehandlung abgebildet, rechts die Potenziale durch Recycling (Modul D1). Aufgrund der modellierten Modernisierungsaktivitäten erhöht sich der Dämmstoffbedarf bis 2030 insgesamt und reduziert sich bis 2045 wieder. Ausgehend von der Statistik im Jahr 2019 wird allerdings deutlich, dass der Primärenergieaufwand mit zunehmendem Anteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen steigt. Dies ist auf den steigenden Anteil von Dämmstoffen aus nawaRo und damit insbesondere auf den energieintensiven Prozess der Trocknung von Holzfasern bei der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen in den Szenarien 2,3 und 4 zurückzuführen. Wie bereits Tabelle 8 dargestellt, hat Holzfaserdämmstoff den höchsten Primärenergieaufwand.

Ergänzend zeigt Abbildung 24 den energetischen Primärenergieaufwand der verschiedenen Szenarien, unterschieden in erneuerbar und nicht erneuerbar. Insgesamt ist der erneuerbare Primärenergieaufwand deutlich geringer als der nicht erneuerbare.

Abbildung 24: Erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergieaufwand (energetisch) der verschiedenen Szenarien über den gesamten Lebenszyklus



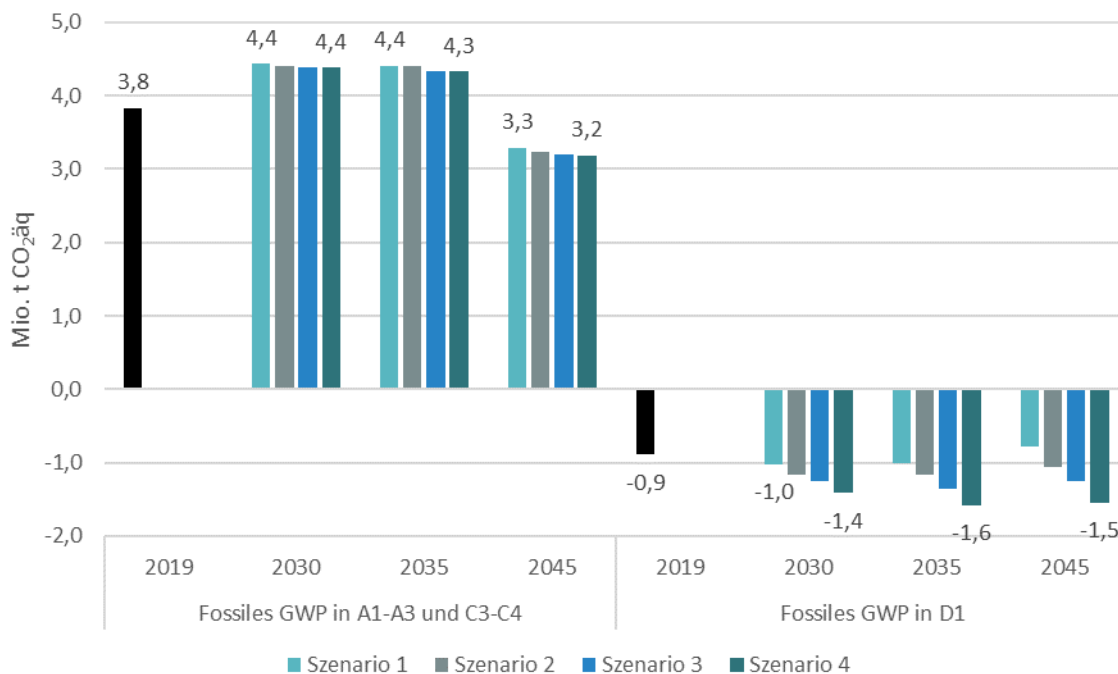
Quelle: Eigene Darstellung

Durch einen steigenden Anteil von Dämmstoffen aus nawaRo erhöht sich insbesondere der erneuerbare Primärenergiebedarf. Dies ist auf den steigenden Anteil von Holzfaserdämmstoff zurückzuführen, der im Vergleich mit den in Szenario 1 überwiegend genutzten Dämmstoffen in der Herstellung jedoch einen deutlich höheren erneuerbaren Primärenergieaufwand aufweist (siehe Tabelle 8). Der nicht erneuerbare Primärenergieaufwand steigt zwar ebenfalls bei einem erhöhten Anteil von Dämmstoffen aus nawaRo, jedoch nicht im gleichen Umfang wie der erneuerbare Primärenergieaufwand.

Abbildung 25 zeigt daneben die THG-Emissionen aus fossilen Quellen für die verschiedenen Szenarien. Anders als der Primärenergieaufwand sinken die gesamten THG-Emissionen mit zunehmendem Anteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Dies ist sowohl auf den höheren Einsatz von erneuerbaren Energien in der Produktion von Holzfasern und Zellulose im Vergleich zu fossilen und mineralischen Dämmstoffen als auch auf den Wegfall von fossilen Rohstoffen und Zusatzstoffen mit Prozessemissionen zurückzuführen. (Reinhardt *et al.*, 2019)

Im Vergleich zum Status Quo (Szenario 1) sinken die THG-Emissionen im Jahr 2030 um rund 30.000 t CO₂äq in Szenario 2, um rund 50.700 t CO₂äq in Szenario 3 und rund 51.000 t CO₂äq in Szenario 4. Im Jahr 2045 reduzieren sich die THG-Emissionen um rund 61.800 t CO₂äq in Szenario 2, um rund 102.000 t CO₂äq in Szenario 3 und rund 103.000 t CO₂äq in Szenario 4.

Abbildung 25: Treibhausgasemissionen der verschiedenen Szenarien über den gesamten Lebenszyklus



Quelle: Eigene Darstellung

Da das biogene GWP über den gesamten Lebenszyklus annähernd Null ist, wird auf die Darstellung verzichtet. Die in den Modulen A1-A3 gespeicherten CO₂-Emissionen werden unter Annahme der -1/+1 in den Modulen C3-C4 wieder freigesetzt. Zusätzlich wird Methan bei der Verbrennung freigesetzt (Hoxha *et al.*, 2020).

Die Ergebnisse sind von den verwendeten Daten, insbesondere dem Energieaufwand in der Herstellung von Dämmstoffen abhängig. Die für die Abschätzung verwendeten Datensätze aus der ÖKOBAUDAT bilden durchschnittliche Produktionsverhältnisse in Deutschland ab und können deshalb von anderen Datenquellen¹³ abweichen.

3.2.4.5 Betrachtung weiterer Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

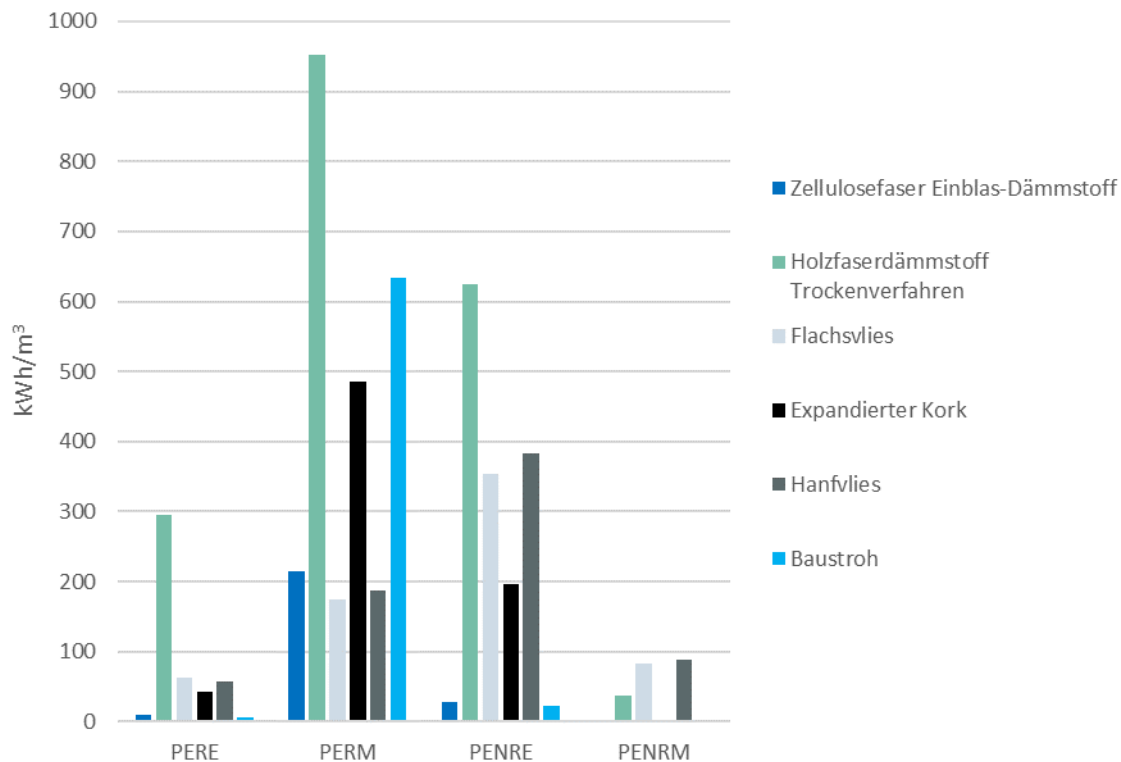
Die vorherige Abschätzung basiert aufgrund fehlender Prognosen auf der Annahme, dass die derzeit vorrangig eingesetzten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, Holzfasern und Zellulose, auch in Zukunft überwiegend genutzt werden. Daneben gibt es jedoch eine Vielzahl weiterer Dämmstoffe aus nawaRo (siehe Tabelle 5 für einen Überblick). Dämmstoffe aus nawaRo können je nach Aufbereitungsart (Matten, Vliese oder Platten) flexibel eingesetzt werden. Ebenso wie Holzfasern und Zellulose können sie allerdings nicht als Perimeterdämmung eingesetzt werden.

Abbildung 26 zeigt den Primärenergieaufwand von Hanf, Flachs, Kork und Stroh im Vergleich zu Holzfasern und Zellulosefasern. Dargestellt ist der Primärenergieaufwand in den verschiedenen Kategorien, skaliert auf die betrachtete Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/m*K.

Wie in der vorherigen Abschätzung bereits herausgestellt, ist auch hier der überwiegende Anteil des energetischen Primärenergieaufwands (PENRE und PERE) aus nichterneuerbaren Quellen. Betrachtet man ausschließlich den energetischen Primärenergieaufwand macht die Abbildung deutlich, dass Hanf, Flachs, Kork und Stroh einen deutlich niedrigeren Primärenergieaufwand als Holzfasern haben. Der niedrige Primärenergieaufwand von Zellulose wird nur von Baustroh übertroffen. Der stoffliche Energiegehalt ist durch die pflanzlichen Komponenten überwiegend erneuerbar. Den höchsten stofflichen Energiegehalt erzielen Holzfasern, gefolgt von Baustroh und Kork.

¹³ Beispielsweise werden für Wärmepumpen in der Datendank Ecoinvent ein deutlich höherer kumulierter Energieaufwand angenommen

Abbildung 26: Primärenergieaufwand in verschiedenen Kategorien in der Herstellungsphase verschiedener Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen



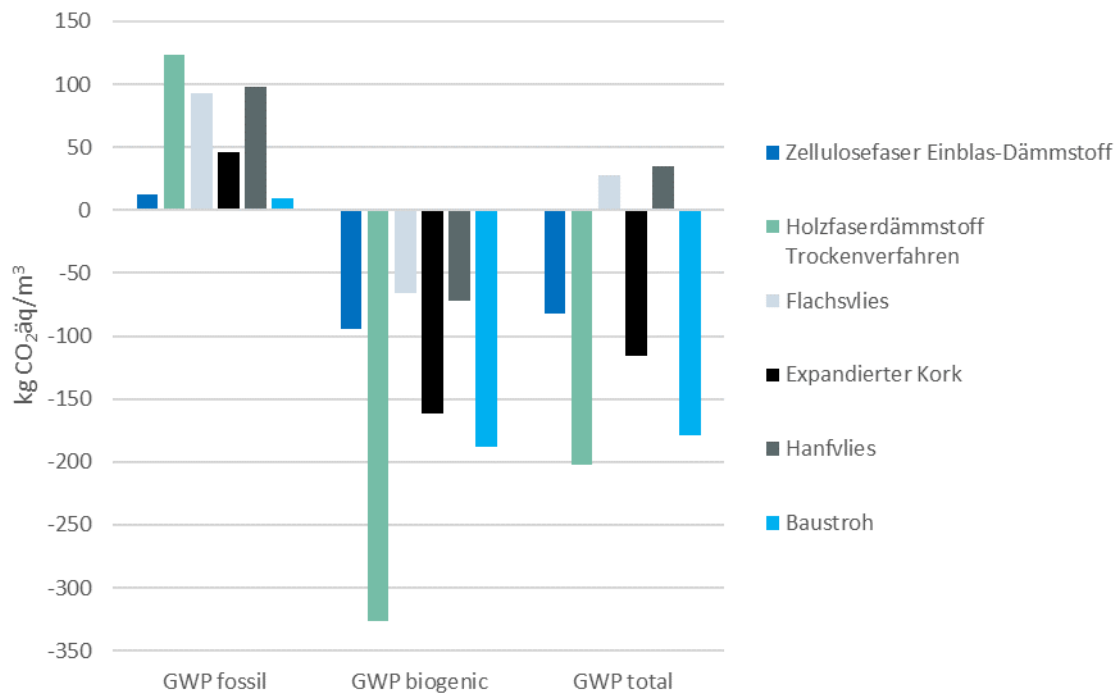
Quelle: Eigene Darstellung anhand von Daten der ÖKOBAUDAT

Abbildung 27 zeigt darüber hinaus das fossile und biogene Treibhauspotenzial sowie das gesamte Treibhauspotenzial als Summe aus beiden. Holzfaserdämmstoff hat im Vergleich das höchste Treibhauspotenzial, was auf den hohen, nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand zurückzuführen ist. Baustroh und Zellulose haben dagegen ein sehr geringeres Treibhauspotenzial, was auf den geringeren Energieeinsatz in der Herstellung (Einsatz von Landmaschinen bzw. Zerkleinerung von Altpapier) zurückzuführen ist.

Das gespeicherte Kohlenstoffdioxid (CO₂), abgebildet durch das biogene GWP, unterscheidet sich je nach verwendetem Rohstoff. In Holzfasern wird mit 326 kg CO₂äq pro Kubikmeter am meisten CO₂ gespeichert, in Flachs mit 72 kg CO₂äq am wenigsten. Unter Verwendung der -1/+1 Regel wird in der Entsorgung (Modul C) das CO₂ wieder an die Atmosphäre abgegeben.

Es wird deutlich, dass neben Holzfasern und Zellulose weitere Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen verfügbar sind, die einen geringeren Primärenergieaufwand sowie eine vergleichbare CO₂-Speicherleistung aufweisen. Die Senkenleistung von Holzfasern mit rund 320 g CO₂äq pro Kubikmeter ist zwar im Vergleich sehr hoch, jedoch erreicht auch Baustroh eine Speicherleistung von nahezu 200 kg CO₂äq pro Kubikmeter.

Abbildung 27: Treibhauspotenzial (GWP) in verschiedenen Kategorien in der Herstellungsphase verschiedener Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen



Quelle: Eigene Darstellung anhand von Daten der ÖKOBAUDAT

Ein weiterer Indikator für den Vergleich der Dämmstoffe in Bezug auf die Speicherleistung stellt der Kohlenstoffgehalt in C dar. (Diestel and Weimar, 2014) Da in der ÖKOBAUDAT diesbezüglich bislang keine Informationen vorliegen, wird auf die Darstellung verzichtet.

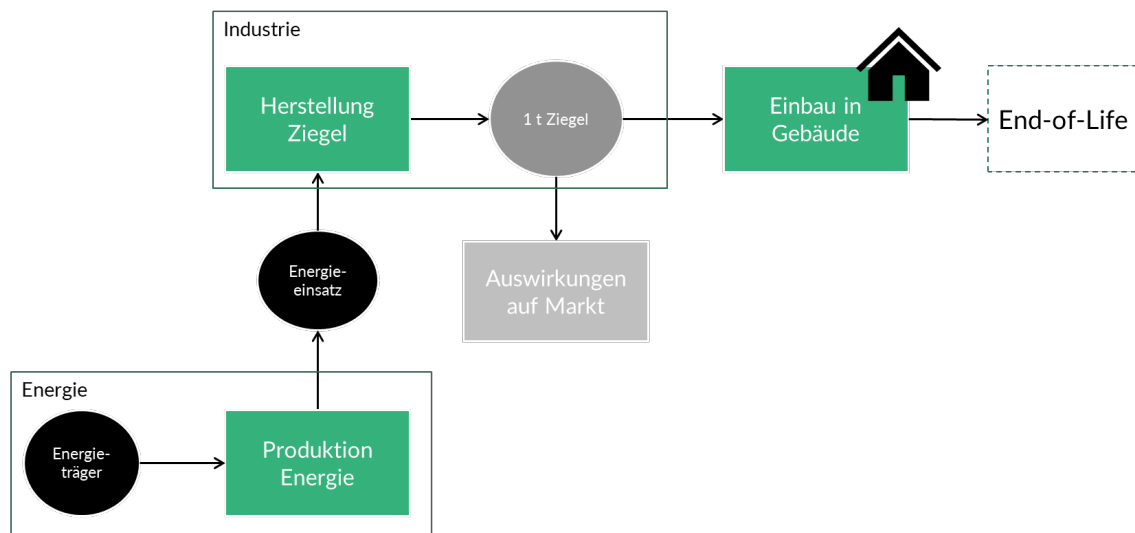
3.2.5 Auswirkungen einer Dekarbonisierungsstrategie der Ziegelproduktion

Ziegel, sowohl Mauer- als auch Dachziegel, sind ein zentraler Baustoff im Bau- und Gebäudebereich. Die Herstellung ist jedoch sehr energieintensiv und die verursachten THG-Emissionen werden nach KSG im Industriesektor bilanziert.

Ziegel werden aus Lehm und Ton hergestellt. Zur Beeinflussung der Produkteigenschaften werden Zusätze verwendet, für Hintermauerziegel bspw. Polystyrolpartikel, Sägespäne oder Papierfaser. Diese Porosierungsmittel verglühen beim Brennen der Ziegel. So entstehen Luftporen im Ziegel, woraus verbesserte Dämm- und Schallschutzeigenschaften resultieren. Vormauerziegel und Dachziegel werden als Vollziegel, also ohne Porosierung, gefertigt, um die Wasserundurchlässigkeit zu gewährleisten. Beim Brennen entstehen neben den THG-Emissionen aus Brennstoffeinsatz zudem Prozessemissionen aus dem eingesetzten Ton.

Abbildung 28 zeigt schematisch den Lebenszyklus von Ziegeln vor dem Hintergrund der Sektoren des KSG. Die Herstellung von Ziegeln ist im KSG-Industriesektor verortet, die dafür benötigte Energie wird wiederum im Energiesektor bilanziert.

Abbildung 28: Schematische Darstellung des Lebenszyklus von Ziegeln im Kontext der Sektoren des Klimaschutzgesetzes



Quelle: Eigene Darstellung

Mithilfe alternativer Produktionsprozesse bzw. CO₂-Abscheidung oder Energieträgerwechsel kann die Emissionsintensität des Baustoffs reduziert und somit ein „grüner Ziegel“ zur Verfügung gestellt werden. Die durch Dekarbonisierung der Ziegelherstellung reduzierten THG-Emissionen werden nach KSG allerdings dem KSG-Industriesektor gutgeschrieben, wobei die Nachfrage danach im KSG-Gebäudesektor entsteht. Die Nachfrage nach emissionsarmen Ziegeln in Gebäuden reduziert die THG-Emissionen über den Lebenszyklus von Gebäuden und damit die gesamten THG-Emissionen im Bau- und Gebäudebereich. Diese Reduktionen werden bislang allerdings im KSG-Industriesektor bilanziert. Durch eine Elektrifizierung von Prozessen der Ziegelherstellung findet zudem eine Wechselwirkung zwischen KSG-Industriesektor und KSG-Energiesektor statt, da die Emissionen des Stromeinsatzes im Energiesektor bilanziert werden. Im Rahmen der folgenden Analyse wird der Fokus auf die Wechselwirkung zwischen KSG-Industriesektor und Gebäudebereich gelegt. Es werden nur die THG-Emissionen in Scope 1 der Ziegelherstellung betrachtet.

3.2.5.1 Ziegelherstellung und Dekarbonisierungsoptionen

Die Ziegelherstellung lässt sich grob in folgende vier Schritte unterteilen (vgl. u.a (Jochem *et al.*, 2004)):

1. Grundstoffgewinnung: Tonförderung im Tagebau und Transport zum Produktionsort
2. Rohstoffaufbereitung: Zerkleinern, Zermahlen, Durchmischung (inkl. Zusatzstoffe)
3. Ziegelproduktion: Formgebung des Produkts bspw. durch Pressen und zuschneiden des Ziegelstranges auf Ziegelgröße, Trocknen der Ziegelrohlinge
4. Brennverfahren: Brennen der Ziegel bei bis zu 1000 Grad Celsius, um ausreichende Härte und Witterungsbeständigkeit zu erreichen. Die Brennöfen sind meist erdgasbefeuert.

Für die Ziegelproduktion wird im Wesentlichen der Energieträger Erdgas eingesetzt. Der Anteil am Gesamtenergieeinsatz beträgt 89% (Geres, Lausen and Weigert, 2021). 11% entfallen auf Strom.

Hinsichtlich der Dekarbonisierungsoptionen der Ziegelindustrie wird auf eine Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland zurückgegriffen, die verschiedene Entwicklungspfade skizziert (Geres, Lausen and Weigert, 2021). Die Roadmap wurde von Futurecamp im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Ziegelindustrie erstellt. In der Referenzentwicklung zur Emissionsentwicklung der Ziegelindustrie werden in der Roadmap Effizienzgewinne von 10% realisiert. Das Verhältnis der Energieträger ändert sich nicht. Der Erdgaseinsatz sinkt von 4,8 TWh (2020) auf 4,27 TWh im Jahr 2050 ab.

Relevante Emissionsminderungen erwartet die Ziegelindustrie insbesondere durch die Entkopplung von Brennen und Trocknung in Verbindung mit dem Einsatz von Wärmepumpen zur Deckung des Energieeinsatzes im Trocknungsprozess (Geres, Lausen and Weigert, 2021). Dadurch findet eine Verschiebung des Energieverbrauchs von Erdgas zu Strom statt.

Weitere wichtige Maßnahmen zur Dekarbonisierung sind Elektrifizierung von Öfen oder deren Umstellung auf Wasserstoff sowie der Einsatz biogener Porosierungsmittel (Geres, Lausen and Weigert, 2021). Der Einsatz von Recyclingmaterial ermöglicht darüber hinaus die Reduktion der prozessbedingten Emissionen aus dem Ton.

3.2.5.2 Methodik und Grundlagen

Es soll abgeschätzt werden, welches Potenzial zur Treibhausgasminderung durch die Dekarbonisierung der Ziegelherstellung im Bau- und Gebäudebereich entsteht. Um diese mittelbare Emissionswirkung zu ermitteln, werden die Dekarbonisierungsszenarien der Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie (Geres, Lausen and Weigert, 2021) ausgewertet und daraus Szenarien für die Entwicklung der THG-Emissionen in Scope 1 der Ziegelherstellung berechnet. Auf Basis des Anteils der Ziegelproduktion, der in Gebäuden eingesetzt wird, erfolgt eine Abschätzung des THG-Minderungspotenzials durch die Dekarbonisierung der Ziegelherstellung im Bau- und Gebäudebereich.

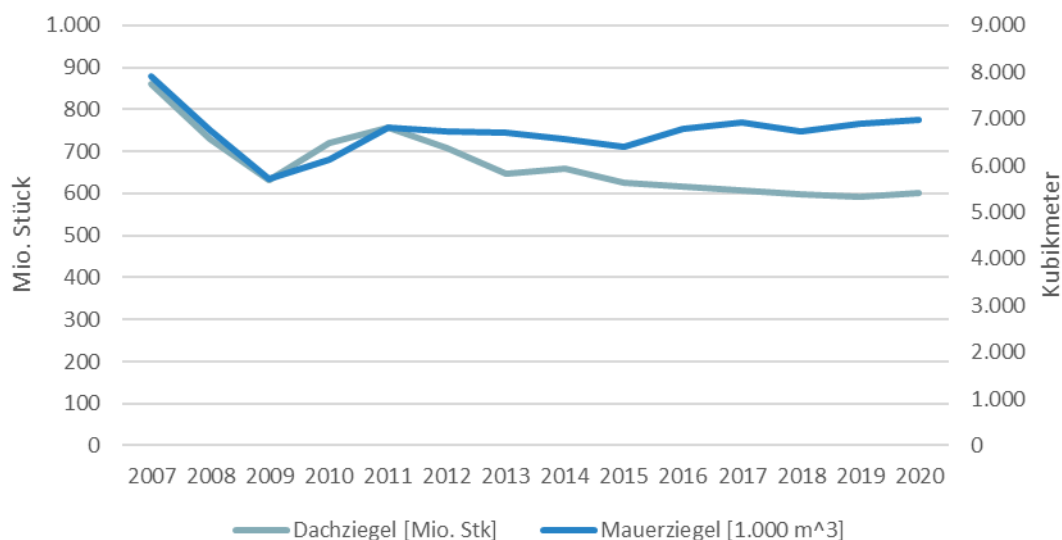
Ein möglicher Beitrag zur Emissionsminderung durch eine Wiederverwendung oder Recycling der Ziegel nach der (ersten) Nutzung wird nicht betrachtet.

3.2.5.3 Statistische Daten und Prognose

Produktionsentwicklung

Abbildung 29 zeigt das Produktionsvolumen von Ziegeln von 2007 bis 2020. Die Produktion von Mauer- und Dachziegeln unterliegt seit 2013 geringen Schwankungen. Unter der Annahme, dass keine einschneidenden Maßnahmen erlassen werden, wird die Ziegelproduktion über den betrachteten Zeitraum konstant fortgeschrieben.

Abbildung 29: Produktion von Ziegeln in Deutschland von 2007 bis 2020



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Zahlen des BdZ

Die Datengrundlage stellt die Produktionszahlen für das Jahr 2020 aus dem Jahresbericht 2021 des Verbandes für deutsche Ziegelhersteller e.V. dar (siehe Tabelle 10). Das zukünftige Vorgehen und die betrachteten Dekarbonisierungspfade der Ziegelindustrie stammen aus der von FutureCamp verfassten Roadmap für die Ziegelindustrie (Geres, Lausen and Weigert, 2021).

Wertmäßig teilt sich die Produktion etwa zur Hälfte auf die Produktgruppen Mauerziegel und Dachziegel auf. Unter den Mauerziegel werden auch Ziegel für Boden und Straßenbeläge subsummiert. Diese hatten 2020 einen Anteil von 6% an der Produktionsmenge der Mauerziegel und einen Anteil von 4% am Produktionswert der gesamten Ziegelherstellung.

Tabelle 10: Ziegelproduktion im Jahr 2020 nach Produkten

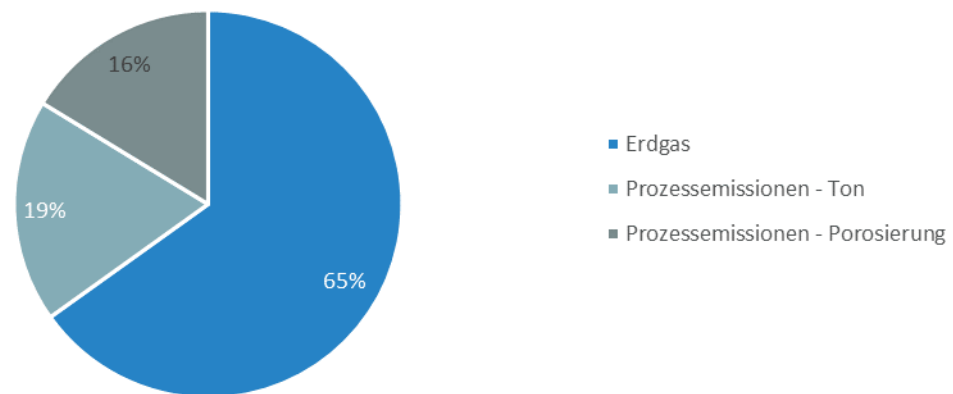
Mauerziegel	7.427	1.000 m³
	725.969	1.000 Euro
Hintermauerziegel mit od. ohne Loch	6.133	1.000 m³
	449.577	1.000 Euro
Vormauerziegel mit od. ohne Loch	844	1.000 m³
	204.344	1.000 Euro
Ziegel für Boden und Straßenbeläge	449	1.000 m³
	59.411	1.000 Euro
Dachziegel	601,062	1.000 Stück
	711.856	1.000 Euro
Pressdachziegel	475.028	1.000 Stück
	423.687	1.000 Euro
Biberschwänze	83.795	1.000 Stück
	31.071	1.000 Euro
sonst. Dachziegel und Dachzubehör	42.239	1.000 Stück
	257.098	1.000 Euro
Gesamt	1.437.825	1.000 Euro

Quelle: Jahresbericht des BdZ 2021 (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V., 2021)

Emissionsentwicklung der Ziegelherstellung

Der Energieeinsatz verursacht den größten Teil der Emissionen in der Ziegelherstellung. Erdgas macht knapp zwei Drittel der direkten Emissionen aus (eigene Berechnung auf Basis von (Geres, Lausen and Weigert, 2021)). Allerdings sind die Prozessemissionen mit einem Anteil von ungefähr einem Drittel der THG-Emissionen in Scope 1 ebenfalls erheblich (siehe Abbildung 30).

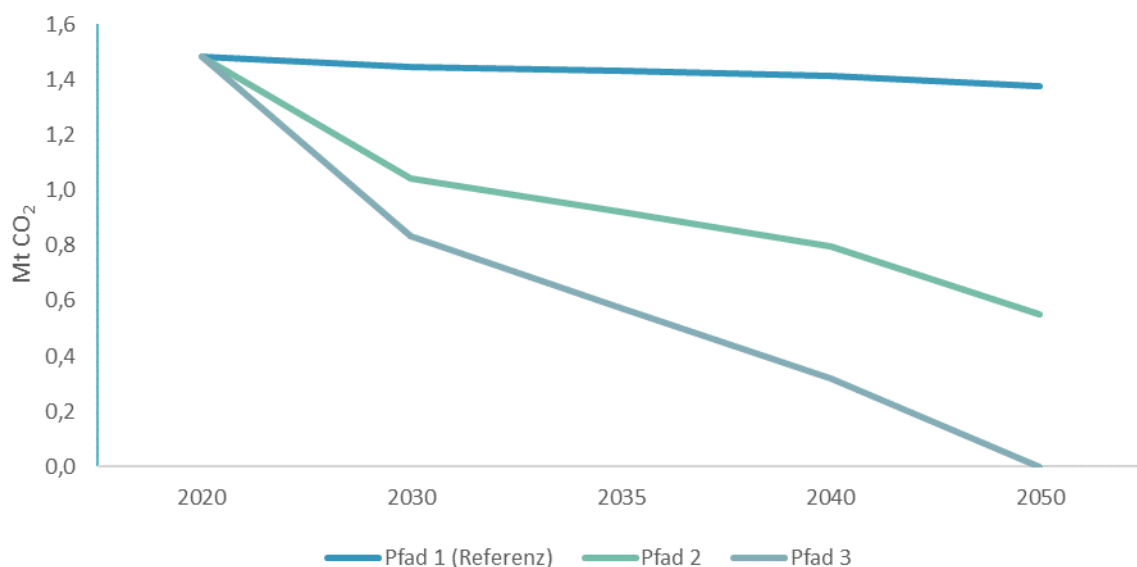
Abbildung 30: Prozentuale Verteilung der direkten Treibhausgasemissionen (Scope 1) der Ziegelindustrie für 2020



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Geres et al., 2021

Die betrachteten Dekarbonisierungspfade der Ziegelindustrie bauen auf der Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie auf (Geres, Lausen and Weigert, 2021). Abbildung 31 zeigt den Verlauf der angenommenen Dekarbonisierungspfade. Es wurden die THG-Emissionen des Strombezugs (Scope 2) herausgerechnet und ein konstanter Emissionsfaktor für Erdgas von 0,056 t CO₂/GJ angenommen.

Abbildung 31: Direkte Treibhausgasemissionen der Ziegelindustrie bis 2050 (Scope 1)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus (Geres, Lausen and Weigert, 2021)

Die Pfade beinhalten folgende Maßnahmen:

Referenzpfad: Nur Effizienzverbesserungen, der Einsatz von (kohlenstofffreiem) Recyclingmaterial wird konstant mit 3 % angenommen.

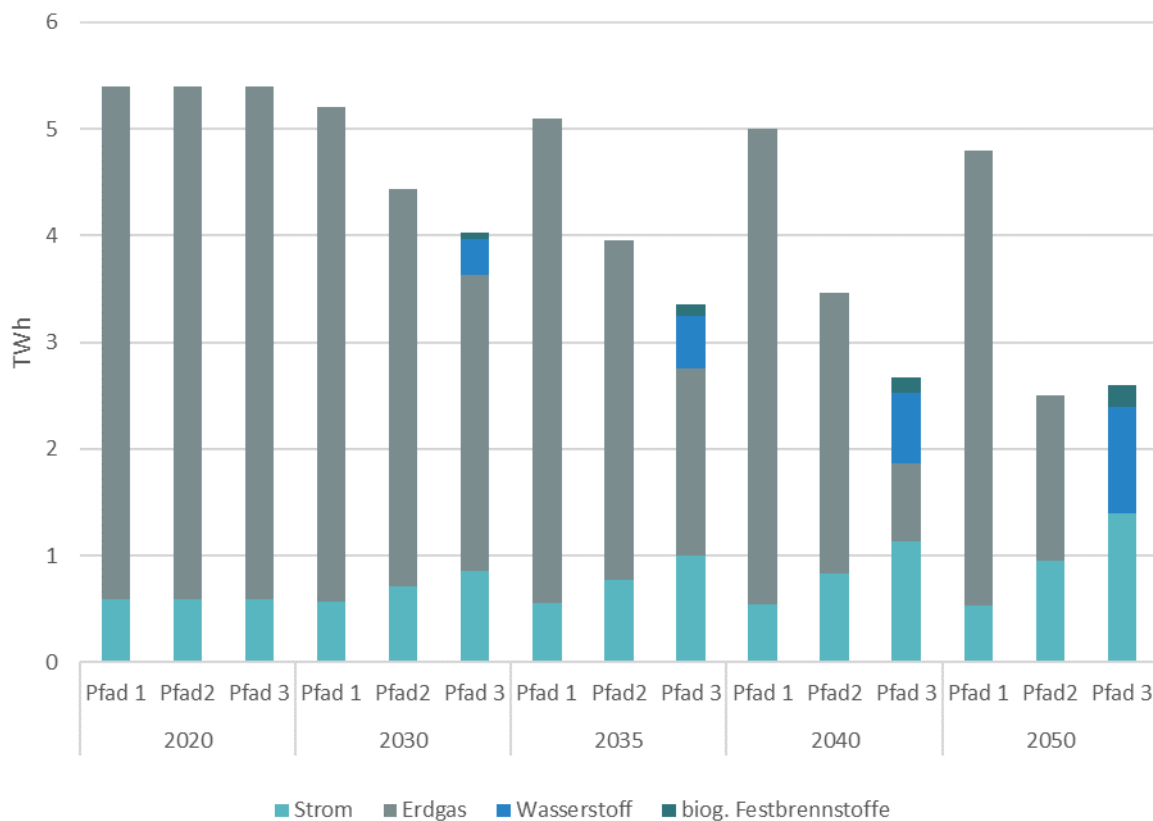
Pfad 2: Biogene Porosierungsmaterialien, Einsatz von Wärmepumpen, steigende Recyclingquote auf 10 % (Hintermauerziegel) respektive 1 % (Dachziegel)

Pfad 3: Alternative Tonrohstoffe (Ersatz von kalkreichhaltigen mit kalkarmen Tonen), biogene Festbrennstoffe, Wasserstoff-Öfen

Die Maßnahmen sind über die Pfade kumulativ und die Produktionsmenge ist konstant.

Abbildung 32 stellt dar, wie sich der Einsatz der unterschiedlichen Energieträger Strom, Erdgas, Wasserstoff und biogene Festbrennstoffe in den unterschiedlichen Dekarbonisierungspfaden entwickelt.

Abbildung 32: Energieträgereinsatz in den Dekarbonisierungspfaden der Ziegelherstellung



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus (Geres, Lausen and Weigert, 2021)

3.2.5.4 Emissionsminderungswirkung im Bau- und Gebäudebereich

Die Ziegelproduktion umfasst Dach- und Mauerziegel. Davon wird der weit überwiegende Teil in Gebäuden eingesetzt. Die Ausnahme bilden Ziegel für Straßen- und Bodenbeläge. Zur Berechnung des Anteils des Einsatzes in Gebäuden wird der wertmäßige Anteil (96 %) genutzt (siehe Abschnitt 3.2.5.3). Damit ergibt sich im Jahr 2045 eine THG-Emissionsminderung des Ziegeleinsatzes im Bau- und Gebäudebereich durch die Dekarbonisierung der Ziegelherstellung von 0,09-1,27 Mio t. CO₂äq je nach Minderungspfad (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Emissionsminderungspotenzial durch die Dekarbonisierung der Ziegelherstellung für den Einsatz im Bau- und Gebäudebereich [in Mio. CO₂äq]

Pfad	2030	2035	2040	2045
Pfad 1	0,03	0,05	0,07	0,09
Pfad 2	0,42	0,54	0,66	0,78
Pfad 3	0,63	0,87	1,12	1,27

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.5.5 Emissionswirkung im KSG-Energiesektor

Wie aus Abbildung 32 ersichtlich, steigt der Strombedarf in Pfad 2 bzw. Pfad 3 von 0,594 TWh im Jahr 2020 auf 0,95 TWh bzw. 1,4 TWh im Jahr 2050. Mit den bereits definierten Emissionsfaktoren (siehe Abschnitt 3.2.3.1) für Strom ergeben sich Mehremissionen in Höhe von 0,020 Mt. CO₂äq. im Jahr 2045 für Pfad 3. In Pfad 1 führen Lerneffekte zu einer Senkung des Stromverbrauches und somit zu einer Emissionsminderungswirkung von 0,002 Mt. CO₂äq. Die Emissionswirkung der Dekarbonisierungspfade auf den KSG-Energiesektor fallen im Vergleich zu den prognostizierten Emissionsminderungen um ein Vielfaches geringer aus. Alle Emissionswirkungen sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Emissionswirkung des Stromverbrauches der Dekarbonisierung der Ziegelherstellung auf den Energiebereich [in Mio. t CO₂äq]

Pfad	2030	2035	2045
Pfad 1	-0,002	-0,002	-0,001
Pfad 2	0,011	0,009	0,008
Pfad 3	0,024	0,020	0,017

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.6 Zusammenfassung

Es bestehen verschiedene Wechselwirkungen zwischen den Sektoren des KSG, die sich auf konkrete Produkte beziehen. Aufgrund der Quellenbilanzierung werden THG-Emissionen im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Strom, Fernwärme sowie Baustoffen und Produkten der technischen Gebäudeausrüstung nicht im KSG-Gebäudesektor erfasst. Es handelt sich jedoch um relevante Produkte an den Schnittstellen der Sektoren. Dabei sind mehrere Perspektiven auf diesen Sachverhalt möglich und zu beachten, da diese Produkte nicht nur THG-Emissionen in anderen KSG-Sektoren verursachen, sondern auch reduzieren können. So verursacht bspw. die Nutzung von Strom und Dämmstoffen, bestimmte THG-Emissionen im KSG-Energiesektor und KSG-Industriesektor. Allerdings können durch den Aufbau von PV-Kapazitäten die THG-Emissionen wiederum reduziert werden. Die Nachfrage nach Baustoffen mit verminderten THG-Emissionen führt dagegen zu einer Reduktion im KSG-Industriesektor.

In diesem Kapitel wurden die Treibhausgasreduzierungsprozente von konkreten Aktivitäten des Bau- und Gebäudebereichs ermittelt – der Ausbau der Photovoltaik-Kapazität und

Wärmepumpe, eine veränderte Zusammensetzung des Dämmstoff-Marktes sowie Dekarbonisierung der Ziegelproduktion.

Die Produktion von EE-Strom durch Photovoltaikanlagen auf bzw. an Gebäuden und der Strombedarf in Gebäuden durch die Nutzung von Wärmepumpen sowie Beleuchtung, Kühlung und Hilfsenergie führt, bis 2045 zu einem deutlichen Überschuss an EE-Strom, der ins Netz eingespeist wird. Nach Abzug des Bedarfs für Wärmepumpen, Beleuchtung, Kühlung und Hilfsenergie resultiert im Jahr 2030 ein Überschuss von 25 TWh EE-Strom. Im Jahr 2040 wird ein Überschuss von 88 TWh, im Jahr 2045 von 119 TWh erreicht. Unter Annahme eines durchschnittlichen Emissionsfaktors für Bezug von Netz-Strom und einem durchschnittlichen Vermeidungsfaktor für die Stromerzeugung aus Photovoltaik resultieren im Jahr 2030 mindestens 7 Mio. t CO₂äq und im Jahr 2045 mindestens 6 Mio. t CO₂äq. Diese Überschüsse und Minderungspotentiale resultieren allerdings unter Voraussetzung eines ambitionierten Ausbaus von Photovoltaik. Unter den angenommenen Ausbaumengen von erneuerbaren Energien ist der Strom-Mix bereits bis zum Jahr 2030 nahezu dekarbonisiert.

Da sich bei der Stromnutzung bzw. -erzeugung in Gebäuden im Verlauf von Monaten, Tagen und Stunden deutliche Unterschiede ergeben, die auch Auswirkungen auf die THG-Emissionen bzw. das THG-Minderungspotential haben, wurde zudem eine Abschätzung der THG-Emissionen und THG-Minderungspotentiale auf stündlicher Basis durchgeführt. Dafür wurden stündliche Vermeidungsfaktoren und Emissionsfaktoren für Netzstrom ermittelt und die in den Abschnitten 3.2.3.2 und 3.2.3.3 berechneten Strommengen auf einer stündlichen Basis, unter Zuhilfenahme von Lastprofilen, dargestellt. Im Vergleich zur Berechnung mit einem durchschnittlichen Emissionsfaktor für den Strom-Mix werden die THG-Emissionen des Strombedarfs von Wärmepumpen mit insgesamt 3 Mio. t CO₂äq um etwa eine Mio. t CO₂äq überschätzt. Das THG-Minderungspotenzial ist bei Verwendung stündlicher Vermeidungsfaktoren dagegen mit 37 Mio. t CO₂äq deutlich höher als bei Annahme eines durchschnittlichen Vermeidungsfaktors. Bei der Abschätzung eines Stromüberschusses durch Photovoltaikanlagen ist jedoch der zeitliche Versatz von Stromerzeugung und Stromnutzung zu berücksichtigen. Der Überschuss entsteht durch die höhere Globalstrahlung insbesondere in den Sommermonaten, während in den Wintermonaten der Strombedarf für die Wärmepumpe die Menge an erzeugtem Strom auf bzw. an Gebäuden übersteigt.

Bei Erweiterung der Betrachtung des Primärenergieaufwands und der THG-Emissionen in der Herstellung und im End-of-Life der Anlagen wird deutlich, dass bei Wärmepumpen die Nutzungsphase die Herstellungsphase deutlich überwiegt. Bei Photovoltaikanlagen werden die THG-Emissionen in der Herstellung deutlich von der THG-Minderung in der Nutzungsphase überlagert. Insgesamt übersteigt der Primärenergieaufwand für den Betrieb der Wärmepumpe, Beleuchtung, Kühlung und Hilfsenergie sowie für die Herstellung von Wärmepumpen und PV-Anlagen das Stromangebot aus Photovoltaik im Jahr 2022. Hinsichtlich der THG-Emissionen resultiert zwar bereits im Jahr 2022 eine hohe Treibhausgasmindeung durch Photovoltaik. Die THG-Emissionen aus der Herstellung der Anlagen können jedoch nicht gedeckt werden.

Für die Abschätzung der Auswirkungen einer veränderten Struktur im Dämmstoff-Markt zugunsten von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen wurden auf Basis der statistischen Ausgangssituation vier verschiedene Szenarien entwickelt, die einen

unterschiedlichen Zuwachs von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bis 2045 annehmen.

In den verschiedenen Szenarien wurden der Primärenergieaufwand und das Treibhauspotenzial auf Basis der derzeit eingesetzten Dämmstoffvarianten berechnet. Es zeigt sich, dass bei einem erhöhten Einsatz der untersuchten Dämmstoffe aus nawaRo (Holzfaser und Zellulose) der Primärenergieaufwand über den gesamten Lebenszyklus steigt, die THG-Emissionen allerdings sinken. Der erhöhte Primärenergieaufwand ist auf die energieintensive Herstellung von Holzfaserdämmplatten zurückzuführen. Die geminderten THG-Emissionen lassen sich durch den Wegfall von fossilen Rohstoffen und Zusatzstoffen mit Prozessemissionen erklären. Bei separater Betrachtung des erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergieaufwands wird deutlich, dass sich durch einen steigenden Anteil von Dämmstoffen aus nawaRo insbesondere der erneuerbare Primärenergiebedarf erhöht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Vergleich mit den derzeit überwiegend verwendeten Dämmstoffen (u.a. EPS und Mineralwolle) insbesondere der erneuerbare Primärenergieaufwand von Holzfasern deutlich höher ist.

Es ist zu beachten, dass die Abschätzung auf Basis aktueller Produktionsverhältnisse durchgeführt wird, die in die Zukunft fortgeschrieben wurden. Die durchgeführte Analyse bis zum Jahr 2045 ist deshalb nur bedingt aussagekräftig, da in der Zukunft mit veränderten Produktionsverhältnissen gerechnet werden kann.

Weiterhin macht ein Vergleich des Primärenergieaufwands und des biogenen Treibhausgaspotenzials bzw. der Senkenleistung verschiedener Dämmstoffe deutlich, dass es eine große Anzahl an Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen gibt, die einen deutlich geringeren Primärenergieaufwand als Holzfasern aufweisen. Dabei sind jedoch weitere Analysen durchzuführen, um die vollständigen Umweltauswirkungen abzuschätzen.

Abschließend ist zu sagen, dass sich in Bezug auf die Dämmstoffe verschiedene Herausforderungen ergeben. Zum einen ist für eine höhere Gesamtenergieeffizienz des Gebäudebestands eine deutliche Erhöhung der Sanierungsrate und -tiefe notwendig (Steinbach *et al.*, 2021). Damit würde sich der Absatz von Dämmstoffen ebenfalls erhöhen. Im Vergleich mit einem reduzierten Endenergiebedarf von sanierten Gebäuden ist der Primärenergieaufwand der Herstellung von Dämmstoffen vernachlässigbar (Reinhardt *et al.*, 2019). Nichtsdestotrotz bleibt die Dekarbonisierung von Produktionsprozessen eine Herausforderung auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen können aufgrund ihrer Eigenschaften und Verfügbarkeit (derzeit) mineralische und synthetische Dämmstoffe nicht vollständig ersetzen. Die (erhöhte) Nutzung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, mit einem geringeren Primärenergieaufwand in der Herstellung sowie einer zusätzlichen CO₂-Senkenleistung können jedoch eine wichtige Ergänzung des Dämmstoffes-Marktes darstellen, um den Primärenergieaufwand und die THG-Emissionen zu reduzieren.

Für die Auswirkungen einer Dekarbonisierung der Ziegelproduktion wurden auf Basis der Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie (Geres, Lausen and Weigert, 2021) Szenarien für die Entwicklung der THG-Emissionen in Scope 1 der Ziegelherstellung erstellt. Das THG-Minderungspotenzial im Bau- und Gebäudebereich ergibt sich anteilig für den Anteil der Ziegelproduktion, der in Gebäuden eingesetzt wird.

Die Szenarien berücksichtigen je nach Szenario: nur Effizienzverbesserungen; Einsatz von (kohlenstofffreiem) Recyclingmaterial konstant 3 %. Biogene Porosierungsmaterialien, den Einsatz von Wärmepumpen zur Bereitstellung von Prozesswärme, eine steigende Recyclingquote auf 10 % (Hintermauerziegel) respektive 1 % (Dachziegel) sowie Alternative Tonrohstoffe (Ersatz von kalkreichhaltigen mit kalkarmen Tonen), den Einsatz von biogenen Festbrennstoffen sowie Wasserstoff-Öfen. Ein möglicher Beitrag zur Emissionsminderung durch eine Wiederverwendung oder Recycling der Ziegel nach der (ersten) Nutzung wurde nicht betrachtet. Die Herstellung von Ziegeln verursacht energie- und prozessbedingte THG-Emissionen im KSG-Industriesektor. Die hergestellten Ziegel werden überwiegend in Gebäuden, das heißt im KSG-Gebäudesektor, eingesetzt.

Die THG-Minderung, der im Bau- und Gebäudebereich eingesetzten Ziegel (wertmäßiger Anteil der Produktion), beträgt 0,09-1272 Mio. t CO₂äq im Jahr 2045, je nach Minderungspfad der Ziegelherstellung.

Dabei sind nur die direkten (Scope 1) Emissionen der Ziegelherstellung berücksichtigt. Durch die gewählten Dekarbonisierungsoptionen entstehen jedoch relevante Verschiebungen insbesondere mit dem Energiesektor. Durch die Elektrifizierung von bspw. Brenn- und Trockenprozessen sinken die direkten Emissionen der Ziegelherstellung. Dafür steigt der Strombedarf und je nach Kraftwerksmix entstehen zusätzliche Emissionen im Stromsektor bzw. es erhöht sich dort die Herausforderung, den nun erhöhten Strombedarf CO₂-frei bereitzustellen. Mit den Emissionsfaktoren aus Abschnitt 3.2.3.1 für Strom ergeben sich dadurch zusätzliche Emissionen im Energiesektor von bis zu 0,020 Mt. CO₂äq. im Jahr 2045. Dies ist im Vergleich zu den prognostizierten Emissionsminderungen um ein Vielfaches geringer.

Eine weitere Option der Dekarbonisierung ist der Einsatz von Wasserstoff in den Brennöfen. Dabei wird angenommen, dass der Wasserstoff emissionsfrei, i.d.R. mittels Elektrolyse mit Strom aus erneuerbarer Energie erzeugt wird. Dadurch steigt ebenfalls der Strombedarf, sofern der Wasserstoff in Deutschland hergestellt wird. Erfolgt ein Import von erneuerbarem Wasserstoff, entsteht dieser Mehrbedarf im Ausland. Zusätzlich kommen Transportaufwände und Verluste hinzu. Bei einer vollständigen Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus müssten diese induzierten Energieaufwände für die Wasserstoffbereitstellung ebenso wie die Effekte der Gewinnung der Rohstoffe sowie von Abriss und Recycling betrachtet werden.

4 Zurechnung der Treibhausgasminderungspotenziale auf den Gebäudesektor im Klimaschutzgesetz

Die in Kapitel 3 ermittelten THG-Minderungspotenziale im Bau- und Gebäudebereich entfallen aufgrund des Quellenprinzips auf verschiedene Sektoren des Klimaschutzgesetzes. Da die notwendigen Investitionsentscheidungen jedoch von Gebäudeeigentümer*innen getroffen werden, bestehen Abhängigkeiten zwischen den beiden Sektoren. Über Maßnahmen, die im Bau- und Gebäudebereich ansetzen, können Emissionen reduziert werden, die jedoch teilweise in anderen KSG-Sektoren bilanziert werden. Im Folgenden wird für die im vorherigen Abschnitt behandelten Beispiele dargestellt, welche Emissionsminderung sich im Gebäudesektor ergibt, je nachdem, welchen Anteil der Minderung man dem KSG-Gebäudesektor zurechnet. Eine solche Anrechnung von Minderungen aus anderen KSG-Sektoren auf das Minderungsziel im KSG-Gebäudesektor ist jedoch mit Vorsicht zu betrachten: Es ist zu beachten, dass auch hinsichtlich der Bestandsemissionen ein großer Teil der Emissionen des Bau- und Gebäudebereichs in anderen KSG-Sektoren bilanziert wird (u.a. Emissionen der Herstellung von Stahl, Zement, Ziegeln im Industriesektor). Bei einer konsistenten Betrachtung müssten auch diese Bestandsemissionen entsprechend der Wechselwirkungen zwischen den Sektoren angepasst werden. Dies wird hier nicht getan und dennoch potenzielle Effekte einer Aufteilung der Minderungspotenziale dargestellt, um zu verdeutlichen, dass potenziell ein großer Hebel zum Erreichen von Emissionsminderungen im Gebäudebereich liegt. Ohne weitere empirische Untersuchungen ist unklar, welcher Anteil der Minderungen durch Entscheidungen des Gebäudesektors getrieben wird und welcher durch originäre Entscheidungen im Industriesektor vorangetrieben wird. In den nachfolgenden Ausführungen wird tabellarisch für verschiedene prozentuale Anteile ausgewiesen, welcher Minderung dies entspräche.

4.1 Zurechnung der Minderungspotenziale durch den Ausbau von Photovoltaik-Kapazität und Wärmepumpen

In Kapitel 3.2.3.3 wurden THG-Minderungspotenziale durch den Einsatz und die Erzeugung von Strom in Gebäuden, vor dem Hintergrund unterschiedlicher Vermeidungsfaktoren von Photovoltaik-Anlagen, abgeschätzt. Durch den Zuschnitt der Sektoren entfallen die in Abbildung 13 ermittelten Treibhausgasminderungen vollständig auf den KSG-Energiesektor. Tabelle 13 zeigt eine anteilige Zurechnung der THG-Minderung auf den KSG-Gebäudesektor. Aus der Tabelle kann die Zeile gewählt werden, deren Prozentsatz dem Anteil am Minderungspotenzial entspricht, der gemäß Annahmen auf Aktivitäten des Bau- und Gebäudebereichs zurückzuführen ist.

Tabelle 13: Anteilige Zurechnung der Minderungspotenziale durch den Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen auf den KSG-Gebäudesektor [in Mio. t CO₂äq]

	2025	2030	2035	2040	2045
THG-Minderung durch PV-Ausbau	10,5	7,5	6,6	5,9	7,0
10%	1,1	0,8	0,7	0,6	0,7
20%	2,1	1,5	1,3	1,2	1,4
30%	3,2	2,3	2,0	1,8	2,1
40%	4,2	3,0	2,6	2,4	2,8

	2025	2030	2035	2040	2045
50%	5,3	3,8	3,3	3,0	3,5
60%	6,3	4,5	4,0	3,5	4,2
70%	7,4	5,3	4,6	4,1	4,9
80%	8,4	6,0	5,3	4,7	5,6
90%	9,5	6,8	5,9	5,3	6,3
100%	10,5	7,5	6,6	5,9	7,0

Hinweis: Da die stündliche Betrachtung einen höheren Vermeidungsfaktor für PV-Strom ergeben hat wird das Minderungspotenzial auf Basis des Vermeidungsfaktors aus (Lewicki, 2023) gezeigt

Quelle: Eigene Darstellung

4.2 Zurechnung der Minderungspotenziale durch eine veränderte Zusammensetzung im Dämmstoff-Markt

In Kapitel 3.2.4 wurden THG-Minderungspotenziale durch einen erhöhten Anteil von Dämmstoffen aus nawaRo im Dämmstoff-Markt ermittelt. Durch den Zuschnitt der Sektoren entfallen die abgeschätzten Treibhausgasminderungen vollständig auf den KSG-Industriesektor. Analog zum Photovoltaik-Ausbau werden die Investitionsentscheidungen und die Dämmstoffauswahl von Gebäudeeigentümer*innen getroffen, womit Abhängigkeiten zwischen dem KSG-Industrie- und Gebäudesektor bestehen. In Tabelle 14 erfolgt deshalb eine anteilige Zurechnung der Potenziale auf den Gebäudesektor.

Tabelle 14: Anteilige Zurechnung der Minderungspotenziale durch erhöhten Anteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen auf den KSG-Gebäudesektor [in Mio. t CO₂äq]

	2030	2035	2045
THG-Minderung durch eine veränderte Zusammensetzung im Dämmstoff-Markt	0,05	0,07	0,10
10%	0,01	0,01	0,01
20%	0,01	0,01	0,02
30%	0,02	0,02	0,03
40%	0,02	0,03	0,04
50%	0,03	0,04	0,05
60%	0,03	0,04	0,06
70%	0,04	0,05	0,07
80%	0,04	0,06	0,08
90%	0,05	0,07	0,09
100%	0,05	0,07	0,10

Hinweis: Es wird das Minderungspotenzial auf Basis von Szenario 3 verwendet.

Quelle: Eigene Darstellung

4.3 Zurechnung der Minderungspotenziale durch Dekarbonisierung der Produktion von Ziegeln

In Kapitel 3.2.5 wurde das Treibhausgasminderungspotenzial der Dekarbonisierung der Ziegelproduktion abgeschätzt. Durch den Zuschnitt der Sektoren entfallen die ermittelten Treibhausgasminderungen vollständig auf den KSG-Industriesektor. Analog zu der

Auswahl von Dämmstoffen werden auch die sonstigen Investitionsentscheidungen zu Bauprodukten von Gebäudeeigentümer*innen getroffen, womit Abhängigkeiten zwischen dem KSG-Industrie- und Gebäudesektor bestehen. In Tabelle 15 erfolgt deshalb eine anteilige Zurechnung der Potenziale auf den Gebäudesektor.

Tabelle 15: Anteilige Zurechnung der Minderungspotenziale durch Dekarbonisierung der Ziegelproduktion auf den KSG-Gebäudesektor [in Mio. t CO₂äq]

	2030	2035	2045
THG-Minderung durch Dekarbonisierung der Ziegelproduktion	0,42	0,54	0,78
10%	0,04	0,05	0,08
20%	0,08	0,11	0,16
30%	0,13	0,16	0,23
40%	0,17	0,22	0,31
50%	0,21	0,27	0,39
60%	0,25	0,32	0,47
70%	0,30	0,38	0,55
80%	0,34	0,43	0,62
90%	0,38	0,49	0,70
100%	0,42	0,54	0,78

Quelle: Eigene Darstellung

4.4 Zusammenfassung

Aufgrund der Abhängigkeiten zwischen den Sektoren des Klimaschutzgesetzes wurde in diesem Kapitel dargestellt, welche Minderungspotenziale infolge von Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich, die in anderen KSG-Sektoren bilanziert werden, unter verschiedenen Verteilungsannahmen dem KSG-Gebäudesektor zugerechnet werden könnten. Im Folgenden wird dargestellt, welchen Effekt dies hinsichtlich des Sektorziels hätte.

Abbildung 33 zeigt die Verringerung der Lücke zwischen Sektorziel und prognostizierten THG-Emissionen im Jahr 2030 unter Annahme einer Zurechnung der Minderungswirkung auf den KSG-Gebäudesektor von 30 %. Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich, die zur Treibhausgasminderung führen sind u.a. die Veränderung von Bauweisen und der Nachfrage nach Bauprodukten.

Das Ziel für den Gebäudesektor liegt im Jahr 2030 bei einem Ausstoß von 66 Mio. t CO₂äq. Die im Projektionsbericht 2021 erstellte Abschätzung von politischen Instrumenten und Rahmenbedingungen prognostiziert einen Ausstoß von 91 Mio. t CO₂äq, womit sich eine Lücke von rund 24 Mio. t ergibt. Diese Lücke könnte durch die (anteilige) Zurechnung von Minderungspotenzialen, die sich im Zuge des Photovoltaik-Ausbaus, einer vermehrten Nutzung von Dämmstoffen aus nawaRo und der Dekarbonisierung der Ziegelproduktion ergeben, reduziert werden. Die Darstellung umfasst zudem die Minderungswirkungen durch Zement und Stahl¹⁴, die im Rahmen des Projektes DEKARB I ermittelt wurden.

¹⁴ In Bezug auf Stahl wurde das dritte Szenario gewählt

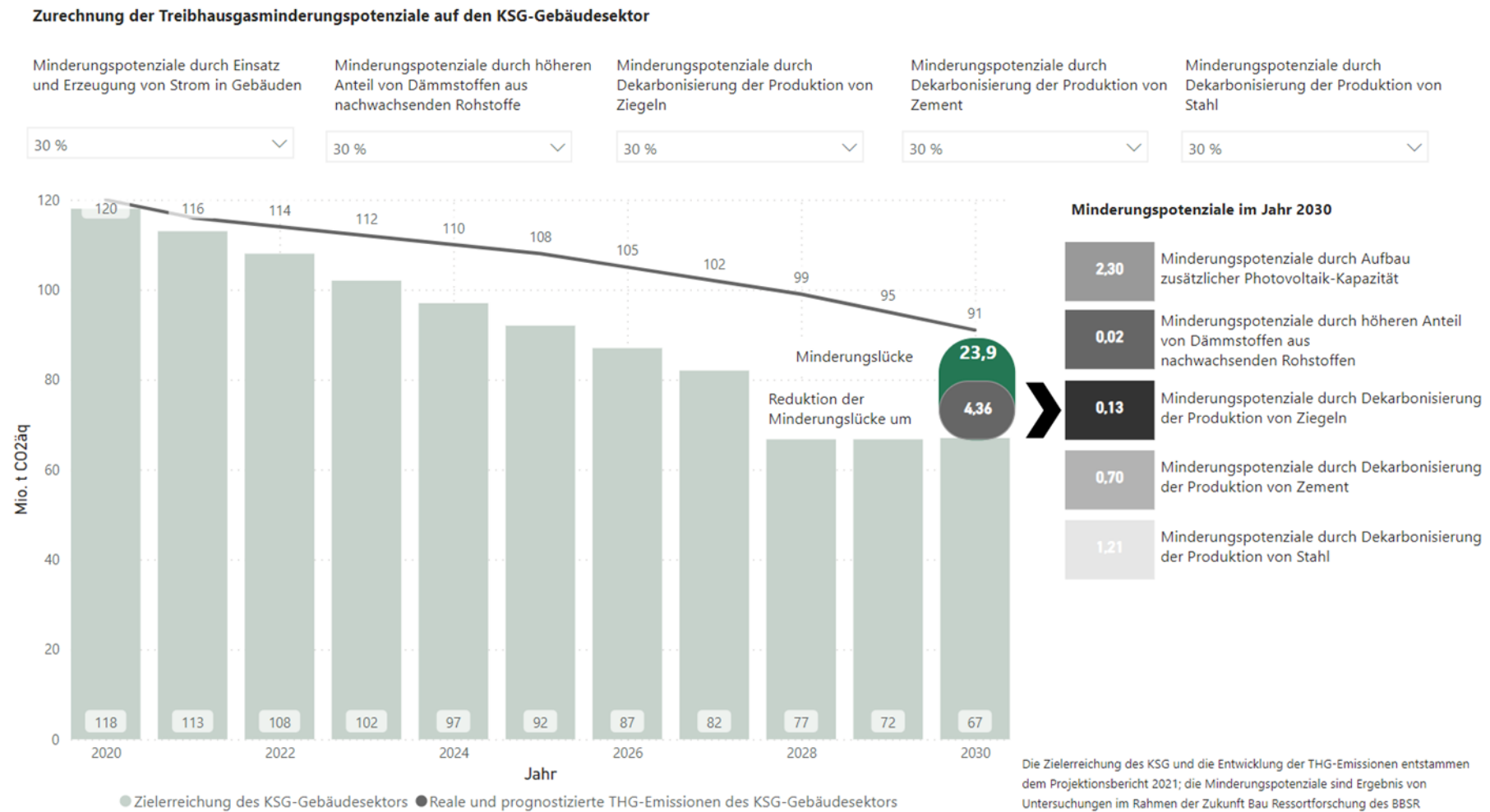
Zu welchen Anteilen die Minderungen zwischen den KSG-Sektoren verteilt werden könnten oder sollten, ist dabei eine offene Frage. Der KSG-Gebäudesektor hat über Veränderungen der Nachfrage mittelbare Wirkungen im Industriesektor. Eine verstärkte Nachfrage bspw. nach Dämmstoffen aus nawaRo oder emissionsarmen Ziegeln könnte die Dekarbonisierung der Ziegelherstellung und die Umstellung der Produktion von fossilen Dämmstoffen auf Dämmstoffe aus nawaRo treiben. Gleichzeitig werden Veränderungen der Produktion durch die Industrie selbst angeschoben werden bzw. die Dekarbonisierung der industriellen Produktion durch verschiedene Politikinstrumente gefördert. Insgesamt sollte es bei einer möglichen Verrechnung der THG-Emissionen und -Minderungspotenziale darum gehen, im Zusammenspiel der Sektoren effektiv und zeitnah Minderungen zu erreichen. Der Bau- und Gebäudebereich, in dem Entscheidungen mit Wirkungen in verschiedenen Sektoren getroffen werden, spielt dabei eine wichtige Rolle.

Es ist zu beachten, dass auch hinsichtlich der Bestandsemissionen ein großer Teil der Emissionen durch Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich in anderen KSG-Sektoren bilanziert wird (u.a. Emissionen der Herstellung von Stahl, Zement, Ziegeln im Industriesektor). Für eine konsistente Betrachtung müssten also nicht nur die Minderungspotenziale, sondern auch die Bestandsemissionen anteilig dem KSG-Gebäudesektor zugerechnet werden.

Durch die Einführung einer sektorübergreifenden, mehrjährigen Gesamtrechnung mit der aktuellen Weiterentwicklung des Klimaschutzgesetzes wird die Verbindlichkeit der bislang geltenden KSG-Sektorziele mit jahresscharfen Vorgaben für alle KSG-Sektoren gelockert.

Eine Anpassung der Bilanzierung zur anteiligen Verrechnung von Emissionsminderungen je nach Verursacher verliert damit an Bedeutung und sollte aufgrund der skizzierten Inkonsistenz hinsichtlich der Bestandsemissionen nicht erfolgen. Die Relevanz einer sektorübergreifenden Betrachtung in Bezug auf den Bau- und Gebäudebereich bleibt erhalten: durch Aktivitäten aus dem Handlungsfeld Gebäude können erhebliche Emissionsminderungen in verschiedenen Sektoren (mittelbar) erzielt werden. Dies sollte angereizt werden. Politikinstrumente können dafür an verschiedenen Stellen ansetzen und entfalten Wirkung in unterschiedlichen Sektoren. Dies wird im folgenden Kapitel betrachtet.

Abbildung 33: Verringerung der Treibhausgasreduzierungsbeiträge im KSG-Gebäudesektor durch ausgewählte Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich



Quelle: Projektionsbericht 2021; eigene Berechnungen von IREES und im Rahmen von DEKARB I

5 Analyse von Politikinstrumenten zur Hebung der Treibhausgasreduzierungspotenziale

Nachdem in Kapitel 3 die Wechselwirkungen der Sektoren des Klimaschutzgesetzes untersucht und die Reduzierungspotenziale in Bezug auf (Primär-) Energieaufwand und Treibhausgasemissionen ausgewählter Aktivitäten innerhalb des Bau- und Gebäudebereichs ermittelt sowie in Kapitel 4 dynamisch auf die verschiedenen Sektoren des KSG zugeordnet werden, werden in diesem Kapitel nun konkrete Politikinstrumente analysiert, um die Reduzierungspotenziale zu heben. Dies können bereits bestehende, aber auch geplante Umsetzungsvorschläge sein. Zunächst werden die für den Bau- und Gebäudebereich relevanten politischen Instrumente und ihre direkte und indirekte Wirkung auf die den Aktivitäten zugrundeliegenden beziehungsweise vorgelagerten Aktivitäten tabellarisch und schematisch dargestellt. Anschließend wird die Wirkung der Instrumente auf das THG-Reduzierungspotenzial vor dem Hintergrund der KSG-Sektoren ausführlich diskutiert.

5.1 Übersicht über relevante politische Instrumente

Tabelle 16 zeigt eine Übersicht an politischen Instrumenten, die für den Bau- und Gebäudebereich relevant sind. Dabei werden sowohl Instrumente betrachtet, die auf europäischer Ebene, als auch solche, die nur für Deutschland gelten. Für jedes Instrument findet eine Zuordnung statt, welche der in Kapitel 3 betrachteten Aktivitäten durch das entsprechende Instrument beeinflusst werden. Zudem werden die KSG-Sektoren genannt, die von dem jeweiligen Instrument betroffen sind, bzw. in denen das Instrument verortet werden kann.

Tabelle 16: Übersicht an bestehenden und geplanten politischen Instrumenten für den Bau- und Gebäudebereich

Instrument	Betroffene Aktivitäten	Wirkung in KSG-Sektor
Ausbau der Erneuerbaren Energien im EEG	Ausbau von PV-Anlagen, Strom-Mix	Energie
Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG)	Einsatz von Dämmstoffen und Ziegeln	Industrie, Gebäude
Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG)	Wärmepumpenausbau, Einsatz von Dämmstoffen	Gebäude, Industrie
Gebäudeenergiegesetz (GEG)	Wärmepumpenausbau	Gebäude, Industrie, Energie
Aufbauprogramm und Qualifikationsoffensive Wärmepumpe	Wärmepumpenausbau	Energie, Industrie
Nullsteuersatz für Photovoltaik	Ausbau von PV-Anlagen	Energie
Solardachpflicht	Ausbau von PV-Anlagen	Gebäude
Solarpaket I und II	Ausbau von PV-Anlagen	Gebäude

Instrument	Betroffene Aktivitäten	Wirkung in KSG-Sektor
EU-Emissionshandel	Produktion von Ziegeln, Dämmstoffen, PV-Anlagen und Wärmepumpen	Industrie
CO₂-Bepreisung für die Sektoren Verkehr und Wärme (BEHG)	Wärmepumpenausbau	Industrie, Energie, Gebäude
Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie	Produktion von Ziegeln, Dämmstoffen, PV-Anlagen und Wärmepumpen	Industrie
Nationale Wasserstoffstrategie	Produktion von Ziegeln, Dämmstoffen, PV-Anlagen und Wärmepumpen	Industrie
EU-Ökodesign-Richtlinie	Energieeffizienz der Geräte in Gebäuden, Ausbau von Wärmepumpen	Energie
Energieeffizienz und Prozesswärme aus erneuerbaren Energien in der Wirtschaft (EEW)	Produktion von Ziegeln, Dämmstoffen, PV-Anlagen und Wärmepumpen	Industrie
Klimaschutzverträge	Produktion von Ziegeln, Dämmstoffen	Industrie
Quoten für emissionsreduzierte Produktion in der öffentlichen Beschaffung	Produktion von Ziegeln und Dämmstoffen	Industrie
Förderprogramm „Klimafreundliche Neubauten“	Anteil nachwachsender Rohstoffe im Dämmstoff-Markt, Ausbau von Wärmepumpen	Gebäude
Nullsteuersatz für Photovoltaik-Anlagen	Ausbau von Photovoltaik-Anlagen	Übergreifend

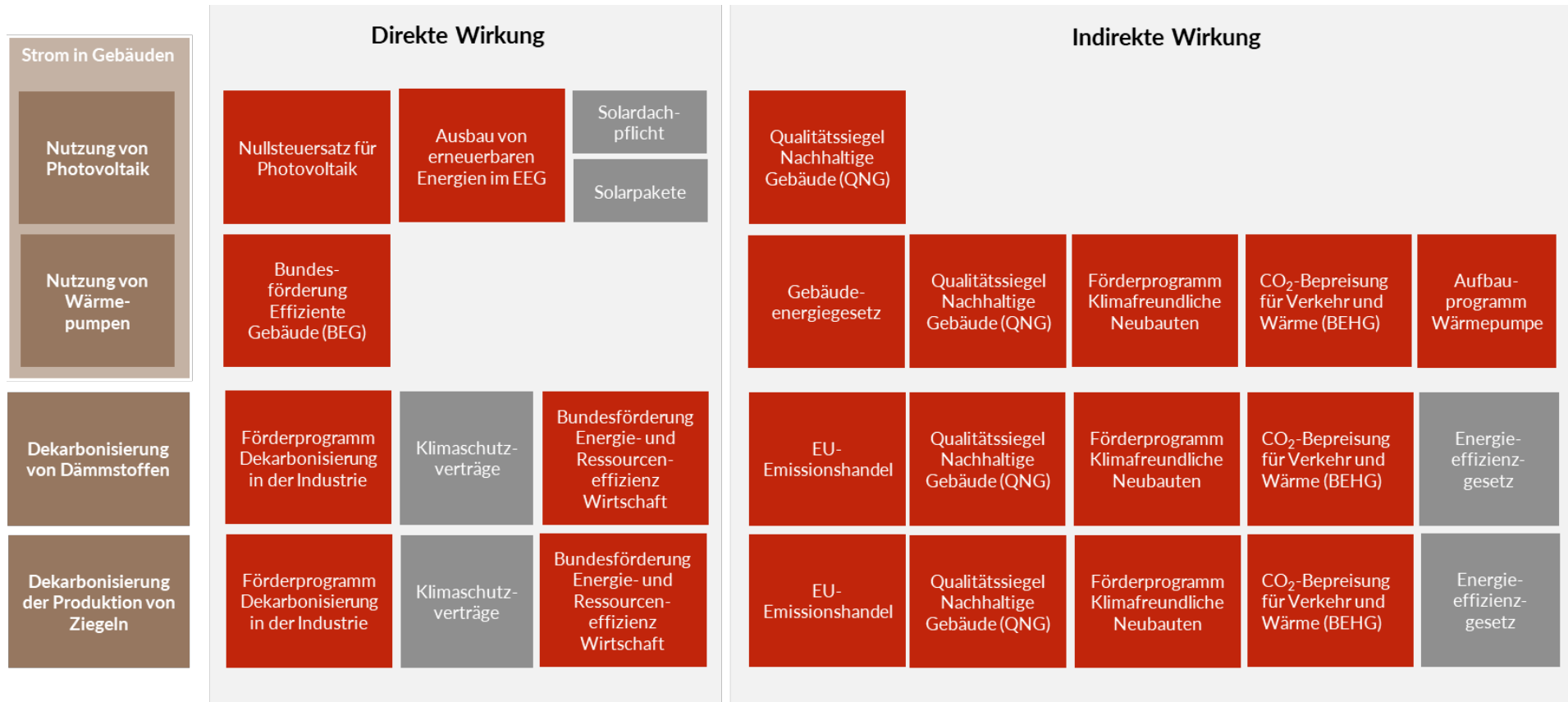
Quelle: Eigene Darstellung

5.2 Einschätzung der Wirkung von politischen Instrumenten auf die untersuchten Aktivitäten

Abbildung 34 zeigt die direkte und indirekte Wirkung der oben genannten Instrumente auf die in Kapitel 3 untersuchten Aktivitäten. Die direkte Wirkung umfasst dabei die unmittelbare Adressierung der Aktivitäten bzw. von Bauprodukten durch finanzielle oder ordnungsrechtliche Instrumente. Indirekte Wirkung meint die mittelbare Wirkung von ordnungsrechtlichen und finanziellen Instrumenten, also beispielsweise ein Grenzwert für THG-Emissionen über den Lebenszyklus von Gebäuden. Die in Kapitel 3.2.3 betrachteten Geräte (Beleuchtung und Kühlung) in Gebäuden werden nicht betrachtet. Das damit verbundene Instrument Ökodesign-Richtlinie wird aber auch in Bezug auf den Ausbau von Wärmepumpen aufgenommen.

Da eine Erhöhung des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen nicht unmittelbar durch politische Instrumente adressiert wird, wird stattdessen die Dekarbonisierung der Dämmstoffproduktion betrachtet.

Abbildung 34: Bewertung der Wirkung von bestehenden und geplanten politischen Instrumenten auf die untersuchten Produkte



Bestehendes Instrument (red box) Geplantes Instrument (grey box) Aktivitäten (brown box)

Quelle: Eigene Darstellung

5.2.1 Wirkung der politischen Instrumente auf den Ausbau der Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen

Da auf den Einsatz und die gebäudeintegrierte bzw. gebäudenahe Erzeugung von Strom viele verschiedene Politikinstrumente wirken, wird die Nutzung von Wärmepumpen und von Photovoltaikanlagen getrennt betrachtet.

5.2.1.1 Ausbau der Photovoltaik-Kapazität

Dem Ausbaupfad für Photovoltaik-Anlagen auf Gebäuden liegt in dieser Analyse die vollständige Ausschöpfung der Ausbaumengen im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) zu Grunde. Der Ausbaupfad schreibt vor, dass bis 2030 mindestens 80 % des deutschen Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien bezogen wird (Bundesregierung, 2023). Im Jahr 2022 wurde eine PV-Leistung von 7,5 GW zugebaut, womit die installierte Leistung auf insgesamt 68 GW steigt (Weinhold, 2023). Bei der aktuellen Zubaugeschwindigkeit bedeutet eine Steigerung auf 172 GW im Jahr 2030, wie in Kapitel 3.2.3.2 berechnet, bereits eine deutliche Beschleunigung des Ausbaus von Photovoltaik-Anlagen. Die Bundesregierung hat in der neuen Photovoltaik-Strategie ein Ziel von 215 GW im Jahr 2030 angekündigt.

Das EEG ist bereits im Jahr 2000 in Kraft getreten, mit dem Ziel, die Anreize für den Ausbau erneuerbarer Energien durch die Auszahlung einer festen Vergütung zu erhöhen und damit die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien zu erhöhen. **Das EEG wirkt durch die finanzielle Anreizsetzung als politisches Förderinstrument somit direkt auf den Ausbau von PV-Anlagen.**

Mittlerweile wurde das EEG mehrmals überarbeitet. Die aktuelle Fassung (2023) sieht im Vergleich zu früheren Versionen deutlich höhere Vergütungen für Haushalte vor, sowohl für die Eigenstromerzeugung als auch die Volleinspeisung. Eine Auswertung des Öko-Institut für das Umweltbundesamt im Jahr 2021 kam zu dem Schluss, dass die Volleinspeisung von Strom aus PV-Dachanlagen in der damaligen Fassung des EEG mit einer Vergütung von rund 8 ct/kWh nicht wirtschaftlich ist. Nach Aussage der Autor:innen der Studie wurden Dachanlagen deshalb vorrangig für den Eigenverbrauch konzipiert und die Dachfläche somit nicht vollständig ausgenutzt (Ritter, Bauknecht and Krieger, 2021). Die aktuellen Fördersätze des EEG liegen mit 7,1 ct/kWh ab 10 kWp und 8,2 ct/kWh unter 10 kWp für Eigennutzung und 10,9 ct/kWh ab 10 kWp und 13 ct/kWh unter 10 kWp zwar über dem damaligen Satz (EEG 2023, 2023), eine wirtschaftliche Volleinspeisung bei Anlagen über 10 kWp ist jedoch laut der Studie auch nur bei geringen Stromgestehungskosten bzw. einem hohen Stromertrag pro kWp möglich. Bei einer Anlage mit 30 kWp und einem Stromertrag von 900 kWh/kWp wäre laut Autor:innen der Studie eine Förderung von mehr als 13 ct/kWh zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit notwendig.

Im EEG 2023 können allerdings Anlagen zur Eigenstromerzeugung und Volleinspeisung parallel auf dem Dach betrieben werden, wodurch sich wiederum ein Anreiz zu Vollbelegung ergibt (BMWK, 2023).

Um darüber hinaus den Verwaltungsaufwand bei Installation von (kleineren) Photovoltaik-Anlagen für Betreibende zu reduzieren, hat das Bundesfinanzministerium zum 1. Januar 2023 einen Nullsteuersatz für die Lieferung und Installation von PV-Anlagen erlassen. Durch den Nullsteuersatz fallen PV-Anlagen von Betreibenden in Privatwohnungen und öffentlichen Gebäuden, die dem Gemeinwohl dienen, nicht mehr unter die Regel der Kleinunternehmerbesteuerung und werden damit nicht mehr besteuert (*Nullsteuersatz für*

Umsätze im Zusammenhang mit bestimmten Photovoltaikanlagen (§ 12 Absatz 3 Umsatzsteuergesetz (UStG)), 2023). Dies setzt einen finanziellen Anreiz und reduziert den Verwaltungsaufwand. **Der Nullsteuersatz wirkt ebenfalls direkt auf den PV-Ausbau.** Eine Wirkung kann aufgrund fehlender Evaluationen bisher allerdings nicht berechnet werden.

Das EEG ist als Instrument, bei Betrachtung nach Klimaschutzsektoren, im Energie- und nicht im Gebäudesektor verortet. Das Erreichen der Ausbauziele ist neben der finanziellen Förderung im EEG und durch den Nullsteuersatz allerdings von weiteren Faktoren, wie rechtlicher Genehmigung, Rohstoff- und Fachkräfteverfügbarkeit sowie persönlichen Entscheidungen abhängig. Der Ausbaupfad adressiert neben Freiflächenanlagen, vor allem Dachanlagen und ist somit von den Investitionsentscheidungen von Gebäudeeigentümer*innen abhängig.

Zur Umsetzung der Ausbauziele sind deshalb weitere Instrumente notwendig, die unmittelbar an der Investitionsentscheidung ansetzen. An dieser Stelle ist die Solardachpflicht genannt, die zwar noch nicht bundesweit, aber bereits in Baden-Württemberg, Hamburg und Berlin, sowie für größere gewerbliche Neubauten in Rheinland-Pfalz, eingeführt ist. **Eine ordnungsrechtliche Pflicht zur Installation von PV-Anlagen auf Gebäuden würde ebenfalls direkt den Ausbau derartiger Systeme fördern.**

Näherungsweise wird die Wirkung einer möglichen bundesweiten Solardachpflicht auf Basis der Evaluation der Photovoltaik-Pflicht in Baden-Württemberg ermittelt. Seit Januar 2022 ist die Installation von Modulen auf Nichtwohngebäuden, seit Mai 2022 auf Wohngebäuden verpflichtend. Seit Januar 2023 greift die Pflicht auch für die Sanierung von Bestandsgebäuden. Dabei müssen mindestens 60 % der zur Solarnutzung geeigneten Dachfläche genutzt werden (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2023).

Im Jahr 2022 konnte in Baden-Württemberg im 2. Halbjahr, nach Inkraftsetzung der Solardachpflicht für Wohngebäude, eine Steigerung des Zubaus bei Dachanlagen um 15 % erzielt werden.

Die Prognose zum Ausbau von PV auf bzw. an Gebäuden in Abschnitt 3.2.3.2 zeigt 2024 einen Zubau von 7,5 GWp bei Dachanlagen. Bei Übertragung der erzielten 15 % Steigerung des Zubaus in Baden-Württemberg im Zuge der Solardachpflicht würde sich 2024 bundesweit ein jährlicher zusätzlicher Zubau von 1,1 GWp bei Dachanlagen durch eine Solardachpflicht ergeben.

Eine zusätzliche Wirkung können die geplanten Solarpakete im Rahmen der Photovoltaik-Strategie 2023 entfalten, die, wie eine Solardachpflicht, direkt auf den PV-Ausbau wirken würden. Die Photovoltaik-Strategie der Bundesregierung thematisiert Maßnahmen, die im Rahmen des Solarpakets 1, Solarpakets 2 und weiteren Themenfeldern umgesetzt werden sollen, um den Ausbau von Photovoltaik voranzubringen. Mithilfe der Strategien sollen die Ausbauziele im EEG (80% Erneuerbaren Energien im Jahr 2030) erreicht werden. (BMWK, 2023)

Der Gesetzentwurf des Solarpakets 1 wird derzeit (Stand Juli 2023) diskutiert. Das übergeordnete Ziel des Pakets liegt in der Beseitigung von bürokratischen Hindernissen im Zusammenhang mit PV. Das Paket beinhaltet rechtliche Vereinfachungen in den Bereichen der Direktvermarktung, der Anlagenzusammenfassung, der gemeinschaftlichen Gebäudeversorgung, der Anmeldung und Inbetriebnahme von Balkonkraftwerken, des

Repowerings von Dachanlagen, der Netzanschlüsse, der Gebäude im Außenbereich, der Pönalen bei Anlagenfehlern und in kleineren, weiteren Themenfeldern. (BMWK, 2023)

Neben dem Solarpaket 1 sind auch das Solarpaket 2 und Änderungen im Rahmen weiterer Bereiche vorgesehen, welche im Rahmen der Photovoltaik-Strategie 2023 vorgestellt werden. Diese sind rechtliche Vereinfachungen bei besonderen Solaranlagen, wie Parkplatz-PV, kleinem Agri-PV und schwimmendem PV. Außerdem werden Baugenehmigungsverfahren für Freiflächenanlagen erleichtert, ein rechtlicher Rahmen für die Strombereitstellung aus PV für die Wärme- und Warmwasserversorgung geschaffen, lokales „Energy Sharing“ von Erneuerbaren-Energie-Gemeinschaften zur Stromerzeugung, -speicherung und -nutzung erleichtert, bauliche Regelungen für Balkon-PV vereinheitlicht, die technischen Anschlussbedingungen für PV-Anlagen über alle Verteilnetzbetreiber in Deutschland vereinheitlicht und es wird das Bürgerenergieprogramm auch für PV, nicht wie bisher nur für Wind an Land, geschaffen. (BMWK, 2023)

In Bezug auf Dachanlagen und Balkonkraftwerke verfolgt die Photovoltaik Strategie 2023 mehrere Ziele. Große Anlagen ab 100 kW mussten bisher ihren Strom direkt vermarkten, was bei einem hohen Eigenverbrauchsanteil zu höheren Kosten als Erlösen führt. Das neue Anlagensegment „unentgeltliche Abnahme“, sieht vor, dass solche Anlagen ohne Kosten und Erlöse Strommengen in das Netz einspeisen können und so keinen finanziellen Nachteil durch den Eigenverbrauch erleiden. Außerdem zählen Balkonanlagen nicht in die Grenzwerte für Anlagen an und auf Gebäuden hinein, sodass Dachanlagen nicht mehr ungewollt Schwellenwerte durch neue Balkonkraftwerke überschreiten. Die Anmeldung von Balkonkraftwerken beim Netzbetreiber entfällt und wird beim Marktstammdatenregister vereinfacht. Balkonkraftwerke sollen zudem nicht durch einen falschen Zähler verhindert werden, denn rückwärtsdrehende Zähler sollen vorübergehend geduldet werden. Zudem soll die gemeinschaftliche Gebäudeversorgung erleichtert werden. Der rechtliche Rahmen bei einer Stromlieferung aus der PV-Anlage von beispielsweise Hauseigentümern an Mieter wird vereinfacht. Über eine Reduktion der Abstände zu Nachbargrundstücken bei Garten-PV und eine Vereinfachung der Regulatorik zum Netzanschluss wird ebenfalls diskutiert. Pönalen bei Fehlern der Anlage werden abgemildert und das Repowering¹⁵ von bestehenden Dachanlagen wird ermöglicht. Bei einer maximal installierbaren Leistung von 600 W pro Balkonkraftwerk ist das Potenzial im Vergleich zu Dachanlagen zwar gering, kann jedoch im Einzelnen einen Vorteil haben. (BMWK, 2023)

Darüber hinaus ist das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) relevant, welches indirekt auf den PV-Ausbau wirkt. Mit dem QNG werden seit Juli 2021 Nachhaltigkeitsaspekte von Gebäuden im Rahmen der BEG durch eine eigene Nachhaltigkeitsklasse gefördert. Das QNG formuliert Anforderungen an die ökologische, ökonomische und soziokulturelle Qualität von Gebäuden. Seit Januar 2023 gelten die Anforderungen des QNG auch im Förderprogramm „Klimafreundlicher Neubau“ des BMWSB. In der Version KfN mit QNG werden damit Neubauten gefördert, die zum einen die Anforderungen an ein Effizienzhaus 40 erfüllen, als auch maximal 24 kg CO₂äq/m²a über den gesamten Lebenszyklus (QNG-Plus) emittieren. Daneben gibt es noch die Möglichkeit, ein Gebäude nach den Anforderungen des QNG-Premium mit einem Grenzwert von 20 kg CO₂äq/m²a zu errichten. Erzeugter Strom aus Photovoltaik, der zur Abdeckung des Gebäudeenergiebedarfs verwendet wird, ist im QNG gesondert auszuweisen. Die

¹⁵ Repowering bezeichnet den Ersatz von Anlagen bzw. einzelnen Modulen. Der Vergütungsanspruch des EEG bleibt dabei bestehen.

Umweltwirkungen und aufgewendete nicht erneuerbare Primärenergie werden entsprechend dem selbstgenutzten Anteil der Gebäudebilanzierung in den Modulen A1- A3, B4, C3 und C4 zugeordnet. Für den ins Netz eingespeisten Strom sind die potenziell vermiedenen THG-Emissionen zu ermitteln und im Modul D2 auszuweisen. Eine Wirkung auf den PV-Ausbau kann nicht abgeschätzt werden. (BWMSB, 2023a, 2023b)

Generell ist damit zu rechnen, dass sowohl die Herstellung von Photovoltaikanlagen durch technologische Verbesserungen effizienter wird als auch die Effizienz während der Nutzungsphase erhöht werden kann¹⁶. Neben der Installation wird auch die Produktion von Photovoltaik-Anlagen durch verschiedene politische Instrumente im KSG-Industriesektor adressiert. Beispielsweise wird durch (Förder-)Programme zur Dekarbonisierung der Industrie, durch den steigenden Preis für Emissionszertifikate im EU-Emissionshandel und den Wegfall freier Zuteilung früher oder später eine effizientere Gestaltung und Dekarbonisierung der Produktionsprozesse angestoßen.

Übergreifend ist bei der Nutzung von Photovoltaik auch die Flächenkonkurrenz mit Solarthermie zu beachten. Solarkollektoranlagen werden sowohl im Rahmen der BEG gefördert als auch als Erfüllungsoption der 65 % Regel betrachtet. Der Projektionsbericht 2021 prognostiziert eine Verdreifachung der Wärmeversorgung durch Solarthermie (Repenning, Harthan and Blanck, 2021). Demnach müssten zusätzliche Dachflächen akquiriert werden, um die zuvor beschriebenen Ausbauziele zu erreichen. Dabei stellen auch Garten-PV, Balkonkraftwerke und Fassaden-PV eine Möglichkeit dar.

5.2.1.2 Nutzung von Wärmepumpen

Neben der Erzeugung von EE-Strom durch PV-Anlagen wird in der Prognose angenommen, dass auch der Zubau von Wärmepumpen in Gebäuden in den kommenden Jahren steigen wird. Dadurch erhöht sich zum einen der Strombedarf, welcher durch verschiedene Erzeugungsoptionen im KSG-Energiesektor, im Fall von Photovoltaik auf bzw. an Gebäuden jedoch eigentlich auch im Bau- und Gebäudebereich, produziert wird. Zum anderen erhöhen sich Produktionskapazitäten im KSG-Industriesektor.

Unmittelbare, direkte Wirkung auf den Ausbau und die Nutzung von Wärmepumpen hat die Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG). Die BEG ist das zentrale Förderprogramm für Energieeffizienz und die Nutzung erneuerbarer Energien in Gebäuden. Derzeit werden Wärmepumpen mit einem Satz von 25 % gefördert. Ein Bonus von 5 % wird gewährleistet, wenn Wasser, Erdreich oder Abwasser als Wärmequelle genutzt werden und/oder ein natürliches Kältemittel eingesetzt wird. Darüber hinaus gibt es einen Heizungstausch-Bonus von 10 %, insofern Öl-, Gas-, Kohle- oder Nachtspeicherheizungen durch eine Wärmepumpe ersetzt werden. Gebäudeeigentümerinnen- und Gebäudeeigentümer können also eine Förderung von bis zu 40 % erhalten. (Bafa, 2023)

Daneben gibt es eine Reihe von Instrumenten, die indirekt auf den Ausbau von Wärmepumpen wirken.

Das im Jahr 2020 verabschiedete Gebäudeenergiegesetz (GEG) umfasst Regelungen für die Gebäudeenergieeffizienz und die Nutzung von Wärme aus erneuerbaren Energien in Gebäuden. **Das Gebäudeenergiegesetz wirkt damit indirekt auf die Nutzung von**

¹⁶ Siehe bspw. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/fraunhofer-ise-entwickelt-effizienteste-solarzelle-der-welt-mit-47-komma-6-prozent-wirkungsgrad.html>

Wärmepumpen. Im GEG werden insbesondere Anforderungen an Neubauten formuliert. Seit Januar 2023 gilt als Neubaustandard das Effizienzhaus 55 (primärenergetisch). Das bedeutet, dass die Anforderungen an die Gebäudehülle damit immer noch der Energieeinsparverordnung (EnEV) aus dem Jahr 2016 entsprechen. Durch die Herabsetzung des Primärenergiebedarfs wird jedoch indirekt die Nutzung von erneuerbaren Energien vorgeschrieben. Weiteres Element des GEG ist die geplante 65 % Regel, die den Einsatz von 65 % erneuerbaren Energien bei Austausch von Heizungen vorschreibt. Diese Regel würde prinzipiell sowohl Neubau und Bestand betreffen. Im derzeitigen Vorschlag der Bundesregierung ist die Wärmepumpe eine Option zur Erfüllung der 65 % Regel. Zudem ist eine einheitliche Förderung von 30 % für alle Erfüllungsoptionen geplant. Daneben werden drei sogenannte Klimaboni genannt, welche die Sozialverträglichkeit des Instruments gewährleisten sollen. (Bundesregierung, 2023)

Indirekt auf die Nutzung von Wärmepumpen wirkt auch das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG). Der darin verankerte stetig steigende CO₂-Preis auf fossile Brennstoffe soll einen finanziellen Anreiz zur Nutzung von erneuerbaren Energien setzen. Das BEHG gilt seit 2021 und sieht bis 2026 einen jährlich steigenden Preis für Emissionszertifikate vor. Für das Jahr 2026 ist eine freie Preisbildung mit Mindest- und Höchstpreis vorgesehen. Ab 2027 werden die Zertifikate frei am Markt gehandelt.

Analog zum PV-Ausbau wirkt das QNG über das Förderprogramm KfN indirekt auf die Nutzung von Wärmepumpen. In Verbindung mit dem Förderprogramm KfN ist die Nutzung von Gas, Öl oder Biomasse ausgeschlossen, womit die Wärmepumpe als Erfüllungsoption wahrscheinlich ist. Da das Förderprogramm erst im Jahr 2023 in Kraft getreten ist, liegen noch keine Evaluationen vor.

Unmittelbar auf den Ausbau von Wärmepumpen wirkt auch das flankierende Instrument „Aufbauprogramm und Qualifikationsoffensive Wärmepumpe“. Damit bestehende Heizungssysteme auf Wärmepumpen umgestellt werden können, ist es dringend geboten, das Wissen zur Installation, Bedienung und Wartung von Wärmepumpen insbesondere im Handwerk zu vermitteln und vertieft zu verankern. Das Ziel des Aufbauprogramms ist es deshalb, Anreize bspw. für Handwerksbetriebe und Planungsbüros zu schaffen, um an Weiterbildungen zu Planung und Einbau von Wärmepumpen teilzunehmen. Darüber hinaus wird gemeinsam mit den Sozialpartnern geprüft, ob Qualifikationen in Ausbildungsordnungen und Meisterprüfungsverordnungen fehlen und inwiefern die Vermittlung entsprechender Kompetenzen Eingang in die formale Aus- und Fortbildung finden kann. Mit Wärmepumpen werden bislang weitgehend unabhängige Gewerke (Sanitär-Heizung-Klima, Elektro) verschaltet. Durch eine gezielte Weiterbildungsoffensive werden die Fachkenntnisse in die Breite gebracht und gehören damit zu den Grundlagen des Berufsbildes.

Neben den nationalen (geplanten) Instrumenten in Bezug auf den Wärmepumpen-Ausbau ist auch die Ökodesign-Richtlinie auf EU-Ebene zu nennen. Die Richtlinie regelt seit 2005 die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte und damit die Energieeffizienz von Geräten. Die Richtlinie findet sich im Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) wieder. Derzeit wird in einer Reform der Ökodesign-Richtlinie eine Effizienzanforderung von Heizkesseln von 115 % ab dem Jahr 2029 diskutiert, ein Wirkungsgrad, der von Wärmepumpen und Hybridsysteme bereits heute erreicht wird.

Analog zu Photovoltaik ist auch bei Wärmepumpen damit zu rechnen, dass sowohl die Herstellung durch technologische Verbesserungen effizienter wird als auch die Effizienz

während der Nutzungsphase erhöht werden kann¹⁷. Ebenso gelten die zuvor genannten politischen Instrumente für die Herstellung von Wärmepumpen im KSG-Industriesektor.

5.2.2 Wirkung der politischen Instrumente auf die produzierten und abgesetzten Dämmstoffe

Die Wirkung der politischen Instrumente wird für den gesamten Dämmstoff-Markt analysiert und nicht speziell für eine Erhöhung des Anteils von Dämmstoffen auf Basis erneuerbarer Rohstoffe. Bestehende und geplante Instrumente adressieren nicht unmittelbar eine Erhöhung des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, sondern eine Reduktion des Energieaufwands und der THG-Emissionen in der Herstellung von Dämmstoffen bzw. Bauprodukten.

Aktuell findet der Einsatz von emissionsreduzierten bzw. energieeffizienten Baustoffen noch keine Berücksichtigung im GEG. Wie oben bereits dargestellt, wird im Förderprogramm KfN durch das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) eine Bilanzierung der THG-Emissionen über den Lebenszyklus gefordert. Die Grenzwerte von 20 bzw. 24 kg CO₂äq/m² formulieren damit indirekt Anforderungen an die eingesetzten Bauprodukte und damit auch an Dämmstoffe. Das Förderprogramm gilt allerdings nur für Neubauten, im BEG kann derzeit noch Förderung für energetische Sanierungen nach QNG beantragt werden. **Das QNG (über KfN) hat damit eine indirekte Wirkung auf die produzierten und abgesetzten Dämmstoffe für Neubauten.**

Das Instrument wirkt allerdings nicht nur auf die Nachfrage und damit den Marktanteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, sondern auch auf die Herstellung von fossilen und synthetischen Dämmstoffen. Durch Umstellung der Produktionsprozesse und Energieeffizienz lassen sich auch dort die THG-Emissionen in der Herstellungsphase reduzieren. Es lässt sich nicht bewerten, ob durch das QNG derzeit Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen mit einem geringeren Energieaufwand bevorzugt werden.

Durch die Verknappung der verfügbaren Emissionszertifikate wirkt der EU-ETS indirekt auf die produzierten Dämmstoffe. Durch die Verknappung der Zertifikate steigt der Preis für die Emission von Treibhausgasen und damit die Nutzung von fossilen Brennstoffen. Dadurch steigt der Anreiz, auf erneuerbare Energiequellen in der Produktion von Dämmstoffen umzustellen bzw. die Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion zu erhöhen. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen nutzen in der Produktion einen höheren Anteil erneuerbarer Energien, wie in Tabelle 8 deutlich wird. Neben dem EU-ETS wird der Einsatz von Kraftstoffen, Erdgas und Heizöl im Rahmen des BEHG mit einem CO₂-Preis besteuert. Das BEHG gilt somit auch für Unternehmen, allerdings ist die Endenergienutzung im BEHG deutlich kleiner als im EU-ETS. (Harthan *et al.*, 2022) **Das BEHG wirkt somit ähnlich wie der EU-ETS indirekt auf die Produktion von Dämmstoffen.** Durch den Preis auf CO₂ aus den genannten Brennstoffen steigen in der Theorie die Beschaffungskosten und ein Umstieg auf erneuerbare Energien wird angereizt. Die von Harthan *et al.* (2022) durchgeführte Studie für das Umweltbundesamt zeigt allerdings, dass der derzeitige CO₂-Preis viel zu gering ist, um einen Effekt auf die fossile Energieträgernutzung zu haben.

¹⁷ Siehe bspw. <https://www.deutschlandfunk.de/effizientere-waermepumpe-fraunhofer-forscher-arbeiten-an-neuem-konzept-dlf-60d50f31-100.html>

Eine direkte Wirkung auf die Dekarbonisierung der Produktionsprozesse von Dämmstoffen entfalten sowohl das Förderprogramm Dekarbonisierung in der **Industrie (DIDI)** und die **Klimaschutzverträge** als auch die **Bundesförderung Energie- und Ressourceneffizienz Wirtschaft**.

Im Rahmen des Förderprogramms Dekarbonisierung in der Industrie (DIDI) werden Vorhaben zur Vermeidung bzw. Verminderung von THG-Emissionen in der energieintensiven Industrie mit prozessbedingten Emissionen gefördert. In Bezug auf die betrachteten Dämmstoffe betrifft das Förderprogramm ausschließlich die Herstellung von Mineralwolle. Die Förderung wird in Form einer Zuwendung von maximal 15 Mio. € gewährt. Ziel ist es bis 2030 jährlich 2,5 Mio. t CO₂äq im KSG-Industriesektor einzusparen. Dies entspricht etwa 1% der Emissionen im Industriesektor im Jahr 2021.

Das Instrument der Klimaschutzverträge (KSV) zur Risikoabsicherung von großen Vorhaben zur Dekarbonisierung (15 Mio. € Mindestförder­volumen) wird derzeit vom BMWK entwickelt. Über einen Zeitraum von 15 Jahren können alle anfallenden Mehrkosten für THG-arme bzw. THG-neutrale Vorhaben gefördert werden. Ziel ist eine 90 % THG-Minderung gegenüber der konventionellen Technologie am Ende des Förderzeitraumes zu erreichen. Weiterhin sollen bis 2045 insgesamt 350 Mio. t CO₂äq mithilfe der KSV vermieden werden. Da die Förderung über ein Gebotsverfahren vergeben wird, ist derzeit nicht absehbar, welche Industrien davon profitieren werden.

Das Förderprogramm für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW) zielt, wie die Förderprogramme DIDI und KSV, auf die Dekarbonisierung der industriellen Produktion von Gütern ab. Es ist in sechs unterschiedliche Module unterteilt und adressiert damit Querschnittstechnologien, Prozesswärme, Energiemanagement und Optimierung von Anlagen und Prozessen sowie Transformationskonzepte und Elektrifizierungsmaßnahmen. Für die Produktion von Dämmstoffen sind insbesondere Modul 2 (Prozesswärme aus erneuerbaren Energien) und Modul 4 (Energie- und ressourcenbezogene Optimierung von Anlagen und Prozessen) relevant.

5.2.3 Wirkung der politischen Instrumente auf die Dekarbonisierung der Ziegelproduktion

Folgend werden mehrere Politikinstrumente auf ihren Einfluss auf die Dekarbonisierung der Ziegelproduktion untersucht. Die Instrumente lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Förderprogramme, wie die geplanten Klimaschutzverträge, nehmen direkten Einfluss auf die THG-arme Produktion von Ziegeln, während der Europäische Emissionshandel oder die Nationale Wasserstoffstrategie indirekt auf den Dekarbonisierungsprozess wirken. Die Untersuchung erfolgt überwiegend qualitativ.

Eine direkte Wirkung auf die Dekarbonisierung der Ziegelproduktion entfaltet das Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie (Beschreibung siehe oben). Unter der Annahme, dass alle Industriezweige 1% ihrer Emissionseinsparungen durch DIDI verwirklichen, ergibt sich bei durchschnittlichen jährlichen THG-Emissionen der Ziegelbranche von 1,5 Mio. t CO₂äq eine jährliche Einsparung von 0,015 Mio. t CO₂äq.

Als finanzstarkes Instrument können zudem die Klimaschutzverträge direkt auf die Dekarbonisierung der Ziegelproduktion wirken. Analog zu den Dämmstoffen, ist derzeit unklar, ob die Ziegelbranche von dem Angebot profitieren wird.

Das Förderprogramm EEW wirkt ebenso wie DIDI und KSV direkt auf die Dekarbonisierung der Ziegelproduktion. Für die Ziegelbranche sind vor allem die Module 2 und 4 interessant. Hier können vor allem Vorhaben zur Bereitstellung von Prozesswärme durch Erneuerbare Energien (Modul 2) oder Vorhaben zur Energie- und ressourcenbezogenen Optimierung von Anlagen und Prozessen (Modul 4) gefördert werden. Vor allem über Modul 4 kann durch gewährte Investitionszuschussförderung zur Transformation der Branche hin zu THG-armen/neutralen Produktion beigetragen werden. **Mit einem im Jahr 2021 gewährten Fördervolumen von insgesamt 337 Mio. € (und damit angestoßenen Investitionen in Höhe von 2.064 Mio. €) ist die direkte Wirkung im Industriesektor und damit potenziell auch in der Ziegelbranche hoch** (Schlomann *et al.*, 2023).

Die Verknappung der Zertifikate im Europäischen Emissionshandel nach dem Cap-and-Trade Prinzip wirkt sich indirekt auf die Ziegelbranche aus. Da für die Branche weder das Risiko der Verlagerung von CO₂-Emissionen besteht¹⁸ noch eine beihilferechtliche Kompensation der indirekten CO₂-Kosten möglich ist¹⁹, müssen alle benötigten Zertifikate am Markt erworben werden. Zusammen mit den stark gestiegenen Zertifikatpreisen seit 2020 und der Energieintensität erhöht der EU-ETS den Druck zur Dekarbonisierung auf die Ziegelbranche. **Die indirekte Wirkung des EU-ETS auf die Branche ist damit qualitativ als hoch zu bewerten.**

Die Nationale Wasserstoffstrategie schafft einen Rahmen für die zukünftige H₂-Infrastruktur und die Nutzung von Wasserstoff als Energieträgers und/oder Rohstoff. In dem untersuchten Dekarbonisierungspfad 3 der Ziegelbranche kommen Wasserstofföfen zum Einsatz. Ohne einen Anschluss an die geplante Wasserstoffinfrastruktur können die Wasserstoffmengen nicht, weder technisch noch wirtschaftlich, bereitgestellt werden. Weiterhin gibt die Nationale Wasserstoffstrategie eine klare Priorisierung von H₂ für den stofflichen Einsatz vor. Der energetische Einsatz von H₂ wird nur als sinnvoll angesehen, wenn keine anderweitigen Dekarbonisierungsmöglichkeiten bestehen. **Aufgrund der rein energetischen Nutzung von Wasserstoff in den Ziegelöfen ist die Wirkung der nationalen Wasserstoffstrategie auf die Dekarbonisierung der Ziegelbranche gering.**

Die indirekte Wirkung des QNG auf eine nachhaltige Ziegelproduktion ist ähnlich zu der indirekten Wirkung auf die klimafreundliche Produktion von Dämmstoffen (siehe Kapitel 5.2.2) nicht zu bewerten.

5.3 Möglicher Bedarf an zusätzlichen Instrumenten, Forschung und Datenerhebung

In diesem Abschnitt werden Hemmnisse für die Entfaltung des THG-Minderungspotenzials durch Veränderung des Dämmstoffmarktes sowie Dekarbonisierung der Ziegelproduktion betrachtet und damit verbunden, mögliche weitere politische Instrumente vorgestellt. Zudem

¹⁸ Siehe Delegierter Beschluss (EU) 2019/708 der Kommission vom 15. Februar 2019 zur Ergänzung der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Festlegung der Sektoren und Teilsektoren, bei denen davon ausgegangen wird, dass für sie im Zeitraum 2021-2030 ein Risiko der Verlagerung von CO₂-Emissionen besteht

¹⁹ Mitteilung der Kommission Leitlinien für bestimmte Beihilfemaßnahmen im Zusammenhang mit dem System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten nach 2021 (2020/C 317/04), Anhang I

wird auf notwendigen Forschungsbedarf in Bezug auf die untersuchten Produkte hingewiesen.

Hemmnisse und weitere Instrumente

Mit einem Anteil von rund 10 % ist der Anteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen am Dämmstoffabsatz gering (siehe Abbildung 20). Dies ist auf eine Reihe von Hemmnissen zurückzuführen, was Untersuchungen des Thünen-Instituts und co2online deutlich machen. (co2online, 2018; Rüter and Wolff, 2019)

Zum einen schränken baurechtliche Vorschriften den Einsatz von nawaRo im Geschosswohnungsbau ein. Dämmstoffe, die auf erneuerbaren Rohstoffen basieren, werden in der Muster-Holzbaurichtlinie der Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) zugewiesen, was in einigen Bundesländern den Einsatz in Mehrfamilienhäusern mit mehr als drei Stockwerken verhindert. Die Dämmstoffe werden der Baustoffklasse B2 zugewiesen, da sie über die Eigenschaft des Glimmens verfügen. Es ist also weiterer Forschungsbedarf notwendig, um das Glimmen zu verhindern (Rüter and Wolff, 2019). Zum anderen ist die Bekanntheit von Dämmstoffen aus nawaRo bei Gebäudeeigentümerinnen- und Gebäudeeigentümern gering. Fehlende planerische und handwerkliche Kompetenzen sowie die Verbreitung durch Energieberater:innen, Architekten und Architektinnen und Planer:innen stellen ein Hemmnis für die Verbreitung von Dämmstoffen aus nawaRo dar. Darüber hinaus stellt bei der Auswahl von Dämmstoffen der Preis das wichtigste Entscheidungskriterium dar. Der von co2online entwickelte Leitfaden „Ökologisch dämmen in der Kommune“ macht deutlich, dass durch zusätzliche Förderung für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen ein Wettbewerbsvorteil geschaffen werden kann und sich dadurch der Marktanteil erhöhen würde. (co2online, 2018)

In Bezug auf die Dekarbonisierung der Herstellungsprozesse von Ziegeln ergeben sich Herausforderungen in Bezug auf die Elektrifizierung. Die Treibhausgasreduzierungen in der Ziegelproduktion basieren teilweise auf der Umstellung auf strombasierte Anwendungen, eine Voraussetzung ist deshalb die Verfügbarkeit dafür notwendiger Technologien.

Ein weiteres politisches Instrument für die Marktdurchdringung von energie- und emissionsreduzierten Produkten stellt die Einführung von sogenannten grünen Leitmärkten dar. Grüne Leitmärkte implementieren einen gesicherten Absatzmarkt und generieren dadurch Investitionssicherheit für Unternehmen. Da die Produktion von treibhausgasneutralen bzw. treibhausgasarmen Produkte heutzutage in vielen Fällen noch mit Mehrkosten verbunden ist, ist ein sicherer Absatzmarkt essenziell. Für die Schaffung grüner Leitmärkte muss eine Nachfrage nach grünen Produkten hergestellt werden. Die Nachfrage kann dabei durch drei verschiedene Hebel generiert werden. An erster Stelle steht die Einführung einer Quote für emissionsreduzierte Produkte in der öffentlichen Beschaffung. Hierdurch wird eine feste, bestimmbare Nachfrage nach grünen Produkten geschaffen, welche den Unternehmen eine Abnahme ihrer emissionsreduzierten Produkte zusichert. Zeitgleich oder zeitlich verzögert steht die private Nachfrage. Unternehmen, die sich zu Nachhaltigkeit verpflichtet haben, kaufen grüne Produkte, um ihre selbst gesteckten Klimaziele zu erfüllen. Schlussendlich kann die Nachfrage durch regulierende Vorschriften ausgeweitet werden, z.B. ein vorgeschriebener Prozentsatz von grün produzierten Ziegeln oder Dämmstoffen beim Neubau von Gebäuden.

In Bezug auf den Ausbau von Photovoltaik auf bzw. an Gebäuden wurden von der HWT Berlin über 50 Hemmnisse identifiziert (Bergner, Siegel and Quaschnig, 2020). Einige dieser Hindernisse werden bereits durch die in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Instrumente

adressiert, wie die steuerliche Behandlung von PV-Anlagen, die zu geringe Vergütung im EEG, den Summenzähler bei Mieterstrom sowie die anteilige EEG-Umlage auf Eigenverbrauch. Weitere Hemmnisse, insbesondere die technischen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen bleiben allerdings weiter offen. An dieser Stelle sind die Dachstatik, Verschattung sowie Baumbestand, die Altersstruktur der Bewohner:innen, Denkmalschutz, Fachkräftemangel und die fehlende Investitionsbereitschaft zu nennen.

Forschungsbedarf

Der Dämmstoffmarkt ist derzeit stark durch synthetische bzw. mineralische Dämmstoffe geprägt. Diese Materialien werden derzeit allerdings vor allem energetisch verwertet bzw. deponiert. Geeignete Recyclingverfahren werden derzeit erforscht bzw. aufgebaut (Reinhardt *et al.*, 2022). Zur Reduktion der fossilen Treibhausgase bzw. der fossilen Ressourcen besteht daneben Forschungsbedarf hinsichtlich Dämmstoffe aus nawaRo. Neben den in dieser Analyse betrachteten Dämmstoffen gibt es weitere, neuartige Dämmstoffe wie Rohrkolben-Platten aus Paludikulturen oder Aerogele aus Lignin. Paludikultur bezieht sich auf die land- und forstwirtschaftliche Nutzung von nassen Mooren durch Anbau von nachwachsenden Rohstoffen wie Schilf oder Rohrkolben. Die nasse Bewirtschaftung kann allgemein mehr CO₂ binden. Ein Produkt stellen Rohrkolben-Platten dar, die derzeit insbesondere in Forschungsprojekten erprobt werden aber auch bereits vereinzelt am Markt verfügbar sind (*EnEff Gebäude 2050 - Demonstration einer innovativen und nachhaltigen Aufdachdämmung aus Rohrkolben*, 2020, p. 2).

Lignin ist ein Makromolekül in mehrjährigen Pflanzen und dient als Stützbaustoff für die verholzten Pflanzenteile. Lignin ist ein Hauptbestandteil von Holz, der derzeit insbesondere bei der Papier- und Zellstoffproduktion anfällt. In einem Forschungsprojekt der TU Hamburg-Harburg wurde ein Hochleistungsdämmstoff auf Basis von Lignin mit einer sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit entwickelt. (Penshorn, 2018)

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich im Zuge der Elektrifizierung in der Ziegelproduktion. Insbesondere der in Kapitel 3.2.5 beschriebene Klimaneutralitätspfad (Pfad 3) setzt eine Verfügbarkeit von Elektroöfen voraus, welche für den industriellen Einsatz allerdings noch wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf haben. Elektroöfen für das Brennen von Ziegeln befinden sich zurzeit in der Demonstrationsphase (TRL 6-8) (Ceramic Unie, 2021). Eine Hybridisierung, wie sie die Pfade 1 und 2 vorsehen, ist bereits heute durch Prozessintegration möglich.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Auswirkungen von bestehenden und geplanten politischen Instrumenten auf ausgewählte Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich qualitativ betrachtet. Dabei wurde diskutiert, inwiefern die Instrumente in der Lage sind, die in Kapitel 3 identifizierten THG-Minderungspotenziale zu heben.

Im ersten Schritt wurden die für den Bau- und Gebäudebereich relevanten politischen Instrumente und ihre direkte und indirekte Wirkung auf die Aktivitäten tabellarisch und schematisch dargestellt. Anschließend wurde die Wirkung der Instrumente für die einzelnen Aktivitäten beschrieben. Der Ausbau von Photovoltaik-Anlagen und Wärmepumpen wurden dabei separat betrachtet.

Auf die **Nutzung von Photovoltaik** wirken bestehende und geplante Instrumente vor allem direkt. Insbesondere das EEG wirkt durch die finanzielle Anreizsetzung auf den Ausbau von PV-Anlagen. Die aktuelle Fassung (2023) sieht im Vergleich zu früheren Versionen deutlich höhere Vergütungen für Haushalte vor, sowohl für die Eigenstromerzeugung als auch die Volleinspeisung. Die Vergütung ist ein attraktiver Anreiz für die Volleinspeisung und stimuliert somit eine Vollbelegung von Dachflächen. Nach einer Studie von Ritter et al. (2021) wäre für eine wirtschaftliche Volleinsparung allerdings eine Förderung von mehr als 13 ct/kWh notwendig, während EEG die Volleinspeisung nur mit 10,9 ct/kWh ab 10 kWp und 13 ct/kWh unter 10 kWp vergütet.

Das Erreichen der Ausbauziele ist neben der finanziellen Förderung von weiteren Faktoren, wie Rohstoff- und Fachkräfteverfügbarkeit und von den Investitionsentscheidungen von Gebäudeeigentümer*innen abhängig. Daher wurde die Wirkung einer möglichen Solardachpflicht²⁰ abgeschätzt. Eine ordnungsrechtliche Pflicht zur Installation von PV-Anlagen auf Gebäuden würde direkt auf den Ausbau derartiger Systeme wirken. Bei Übertragung der erzielten Steigerung des PV-Zubaus in Baden-Württemberg auf gesamt Deutschland würde sich bundesweit ein jährlicher Zubau von 1,1 GWp bei Dachanlagen durch eine Solardachpflicht ergeben. Eine zusätzliche Wirkung können die geplanten Solarpakete im Rahmen der Photovoltaik-Strategie 2023 entfalten, die wie eine Solardachpflicht, direkt auf den PV-Ausbau wirken würden.

Auf die **Nutzung bzw. den Ausbau von Wärmepumpen** wirkt nur die BEG direkt. In der BEG werden Wärmepumpen derzeit mit einem Satz von 25 % gefördert, mit mehreren zusätzlichen Boni. Insgesamt kann eine Förderung von bis zu 40 % resultieren. Im Zuge der 65 % Regel im GEG, die den Einsatz von 65 % erneuerbaren Energien bei Austausch von Heizungen vorschreibt, ist die Wärmepumpe im derzeitigen Vorschlag der Bundesregierung eine Erfüllungsoption. Die Umsetzung würde eine einheitliche Förderung von 30 % für alle Erfüllungsoptionen zur Folge haben, ebenfalls mit verschiedenen sogenannten Klimaboni. Das GEG wirkt durch die Vorgabe des Effizienzhaus 55 insgesamt allerdings indirekt. Das QNG bzw. das Förderprogramm KfN wirken durch die Vorgabe eines Grenzwertes (20 bzw. 24 kg CO₂äq/m²a) und das BEHG durch Verteuerung fossiler Alternativen ebenfalls indirekt auf die (zusätzliche) Nutzung von Wärmepumpen. Das Aufbauprogramm Wärmepumpe ist ein flankierendes Instrument und wirkt damit ebenso indirekt.

Direkten Einfluss auf die **Dekarbonisierung von Dämmstoffen** haben Instrumente aus dem KSG-Industriesektor. Durch das Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie werden Vorhaben zur Vermeidung bzw. Verminderung von THG-Emissionen in der energieintensiven Industrie mit prozessbedingten Emissionen gefördert. Mithilfe von Klimaschutzverträgen sollen zukünftig Vorhaben zur Dekarbonisierung werden. Ebenso zielt das Förderprogramm für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft auf die Dekarbonisierung der industriellen Produktion von Gütern und damit auch auf die Herstellung von Dämmstoffen ab.

Weiterhin steigt durch die Verknappung der verfügbaren Emissionszertifikate im EU-ETS der Preis für die Emission von Treibhausgasen und damit die Nutzung von fossilen Brennstoffen zur Herstellung Dämmstoffen. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen nutzen einen höheren Anteil erneuerbarer Energien, wodurch die Produktion wirtschaftlich vorteilhafter

²⁰ Solardachpflicht gilt noch nicht bundesweit, aber bereits in Baden-Württemberg, Hamburg und Berlin, sowie für größere gewerbliche Neubauten in Rheinland-Pfalz

wird. Neben dem EU-ETS wird der Einsatz von Kraftstoffen, Erdgas und Heizöl im Rahmen des BEHG besteuert, wodurch in der Theorie die Beschaffungskosten steigen und ein Umstieg auf erneuerbare Energien angereizt wird. Studien belegen allerdings, dass der derzeitige CO₂-Preis viel zu gering ist, um einen Effekt auf die fossile Energieträgernutzung zu haben.

Darüber hinaus hat das QNG (über KfN) eine indirekte Wirkung auf die produzierten und abgesetzten Dämmstoffe in Neubauten, da die Grenzwerte von 20 bzw. 24 kg CO₂äq/m² indirekt Anforderungen an die eingesetzten Bauprodukte und damit auch Dämmstoffe stellen. Das Förderprogramm gilt allerdings nur für Neubauten, im BEG kann derzeit noch Förderung für energetische Sanierungen nach QNG beantragt werden. Es lässt sich nicht bewerten, ob durch das QNG derzeit Dämmstoffe aus nawaRo mit einem geringeren Energieaufwand sowie THG-Emissionen in der Herstellung bevorzugt werden.

Auf die **Dekarbonisierung der Ziegelproduktion** wirken mittelbar und unmittelbar die gleichen Instrumente wie auf die Dekarbonisierung von Dämmstoffen. Zentral sind das Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie und das Förderprogramm Energie- und Ressourceneffiziente Wirtschaft.

Weiterhin wurden Hemmnisse für die Realisierung des THG-Minderungspotenzials identifiziert, mögliche weitere politische Instrumente vorgestellt und Forschungsbedarf ermittelt.

Hemmnisse für den erhöhten Absatz von biogenen Dämmstoffen ergeben sich durch baurechtliche Vorschriften, die geringe Bekanntheit und die höheren Kosten von Dämmstoffen aus nawaRo bei Gebäudeeigentümerinnen- und Gebäudeeigentümern. In Bezug auf die Dekarbonisierung der Herstellungsprozesse von Ziegeln ergeben sich Herausforderungen in Bezug auf die Elektrifizierung, da die Treibhausgasreduzierungen teilweise auf der Umstellung auf strombasierte Anwendungen basiert. Voraussetzung ist deshalb die Verfügbarkeit dafür notwendiger Technologien. Hindernisse für den Ausbau von Photovoltaik resultieren durch die technische Gebäudeanforderungen, die Altersstruktur der Bewohner:innen, Denkmalschutz, Fachkräftemangel und die fehlende Investitionsbereitschaft.

Als **weitere mögliche Hebel zur Hebung der THG-Minderungspotenziale** wurden grüne Leitmärkte vorgestellt.

Forschungsbedarf ergibt sich u.a. im Bereich der Dämmstoffe, durch die Entwicklung von Recyclingverfahren für synthetische und mineralische Dämmstoffe sowie einer zukünftigen Markteinführung weiterer biogener Dämmstoffe. Zudem besteht Entwicklungsbedarf im Zuge der Elektrifizierung in der Ziegelproduktion unter Nutzung von Elektroöfen.

6 Fazit und Ausblick

In dieser Studie wurde gezeigt, dass relevante Wechselwirkungen und Schnittstellen zwischen den Sektoren des Klimaschutzgesetzes bestehen.

In einer qualitativen Betrachtung der Schnittstellen der KSG-Sektoren vor dem Hintergrund der Wirtschaftszweige wurde deutlich, dass aus Sicht des KSG-Gebäudesektors die THG-Emissionen im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Strom, Fernwärme sowie Baustoffen und Produkten der technischen Gebäudeausrüstung nicht erfasst werden. Dabei ist zu beachten, dass diese Produkte nicht nur THG-Emissionen in anderen KSG-Sektoren verursachen, sondern auch reduzieren können. So verursacht bspw. die Nutzung von Strom und Dämmstoffen, bestimmte THG-Emissionen im KSG-Energiesektor und KSG-Industriesektor. Durch den Aufbau von PV-Kapazitäten wiederum werden die THG-Emissionen im KSG-Energiesektor reduziert. Die Nachfrage nach Baustoffen mit verminderten THG-Emissionen führt zu einer Reduktion im KSG-Industriesektor. Es handelt sich also um relevante Produkte an den Schnittstellen der Sektoren. Weiterhin wurde am Beispiel ausgewählter Bauprodukte in ausgewählten Aktivitäten des sektorübergreifenden Bau- und Gebäudebereichs – Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen, einer veränderten Produktstruktur auf dem Dämmstoff-Markt sowie des künftigen Einsatzes von emissionsreduzierten Ziegeln in Gebäuden – eine Bilanzierung des (Primär-)Energieaufwands und der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus nach dem Verursacherprinzip durchgeführt und das jeweilige (Netto-)Treibhausgasminierungspotenzial ermittelt. Dabei wurde deutlich, dass die Aktivitäten des Bau- und Gebäudebereichs relevante Hebel sind, um die THG-Emissionen zu reduzieren.

Für die Produktion von Solarstrom durch Photovoltaikanlagen auf bzw. an Gebäuden resultiert unter Berücksichtigung des zusätzlichen Strombedarfs durch die vermehrte Nutzung von Wärmepumpen sowie für Beleuchtung, Kühlung und Hilfsenergie bis 2045 ein deutlicher Überschuss an Solarstrom in der Bilanz aus Stromerzeugung und Stromnachfrage. Betrachtet man die potenziell vermiedenen THG-Emissionen unter Annahme eines Vermeidungsfaktors²¹ für PV-Strom ergibt sich im Jahr 2030 ein THG-Minderungspotenzial von rund 7,5 Mio. t CO₂äq und im Jahr 2045 ein THG-Minderungspotenzial von rund 7 Mio. t CO₂äq. Eine veränderte Zusammensetzung des Dämmstoffmarkts zugunsten eines höheren Anteils von nachwachsenden Rohstoffen führt bei Annahme eines Marktanteils von Dämmstoffen aus nawaRo von 25 % zu einem THG-Minderungspotenzial von rund 51.000 t CO₂äq in 2030 und 103.000 t CO₂äq in 2045. Da dabei ein hoher Anteil von Holzfasern angenommen wurde, steigt allerdings der Primärenergieaufwand insgesamt. Dies ist auf die energieintensive Herstellung von Holzfaserdämmplatten zurückzuführen, wobei zu beachten ist, dass ein Großteil des Primärenergieaufwands mit erneuerbaren Energien gedeckt wird. Die geminderten THG-Emissionen lassen sich durch den erhöhten Einsatz erneuerbarer Energien, den Wegfall von fossilen Rohstoffen und Zusatzstoffen mit Prozessemissionen erklären.

Die Dekarbonisierung der Ziegelproduktion, durch den Einsatz biogener Porosierungsmittel, Elektrifizierung der Produktionsprozesse sowie Nutzung von Sekundärrohstoffen, führt zu einem THG-Minderungspotenzial von 0,42 Mio. t CO₂äq in 2030 und 0,78 Mio. t CO₂äq in

²¹ Es wurde angenommen, dass der Vermeidungsfaktor ausgehend von 694 g CO₂äq pro kWh Strom in 2021 (Lewicki, 2023) auf 139 g CO₂äq pro kWh Strom in 2030 und 46 g CO₂äq pro kWh Strom in 2045 sinkt.

2045. Durch die Elektrifizierung von bspw. Brenn- und Trockenprozessen sinken die direkten Emissionen der Ziegelherstellung. Dafür steigt der Strombedarf und je nach Kraftwerksmix entstehen zusätzliche Emissionen im Stromsektor bzw. es erhöht sich dort die Herausforderung, den nun erhöhten Strombedarf künftig CO₂-frei bereitzustellen. Werden weitere Technologien eingesetzt, wie Wasserstoff-Öfen, erhöht sich das THG-Minderungspotenzial.

Die abgeschätzten Minderungspotenziale basieren auf einer sektorübergreifenden Betrachtung im Bau- und Gebäudebereich als eigenes Handlungsfeld. Der KSG-Gebäudesektor umfasst allerdings ausschließlich die direkten THG-Emissionen aus dem fossilen Brennstoffeinsatz und nicht die indirekten Emissionen in Verbindung mit Bau, Errichtung, Erhalt und Abriss von Gebäuden, obwohl die Gebäudeeigenümer:innen, Planer:innen und Architekturbüros maßgeblichen Einfluss auf die Aktivitäten des Bau- und Gebäudebereich haben. Zur Darstellung der Wechselwirkungen zwischen den Sektoren des KSG und des Einflusses der handelnden Akteure wurde deshalb diskutiert, ob und wie diese Minderungseffekte vor dem Hintergrund der derzeitigen Sektorzuschnitte im KSG zwischen dem Industrie- und dem Gebäudesektor aufgeteilt werden können. Dabei wurde darauf hingewiesen, dass bei einer konsistenten Betrachtung auch die Bestandsemissionen entsprechend der Wechselwirkungen zwischen den Sektoren angepasst werden müssten.

Ergänzend zur sektoralen Aufteilung wurden bestehende und mögliche zukünftige politische Instrumente untersucht, die sektorübergreifend den Bau- und Gebäudebereich adressieren und direkt bzw. indirekt zu einer Emissionsminderung beitragen. Bestehende politische Instrumente, wie das EEG, die Bundesförderung Energie- und Ressourceneffizienz Wirtschaft, der EU-ETS leisten einen wichtigen Beitrag zur THG-Minderung. Zusätzliche geplante Instrumente, wie die Solardachpflicht und die Klimaschutzverträge als Förderprogramm können zentrale Hebel zur Erreichung weiterer THG-Minderungen darstellen. Da durch die Netzeinspeisung bzw. durch die Verdrängung von Netzstrom die THG-Emissionen in erheblichem Umfang gemindert werden können, lässt sich ableiten, dass die Instrumente zur Unterstützung des Ausbaus der gebäudeintegrierten solaren Stromerzeugung ausgebaut werden sollten. Die Investitionen werden von den Gebäudeeigentümerinnen- und Gebäudeeigentümern getragen, die ihrerseits Förderprogramme in Anspruch nehmen und von der Netzeinspeisung profitieren. Unabhängig von der sektoralen Verortung von Instrumenten sollte es bei der Gestaltung von Maßnahmen jedoch darum gehen, im Zusammenspiel der Sektoren effektiv und zeitnah Minderungen zu erreichen.

Abschließend ist zu sagen, dass die Abschätzung des THG-Minderungspotenzials nach dem Verursacherprinzip für ausgewählte Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich als sektorübergreifendes Querschnittsthema die Relevanz der Wechselwirkungen zwischen den Sektoren des KSG bestätigt. Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung einer sektorübergreifenden Betrachtung, die den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden umfasst und die Dynamik der Entwicklung des Gebäudebestandes in seiner Parallelität aus Errichtung, Erhalt, Betrieb und Rückbau abbildet. Die bestehende Trennung von Nutzungs-, Herstellungs-, und Entsorgungsphase von Gebäuden behindert die Transformation des Bau- und Gebäudebereichs aufgrund der mangelnden Adressierung durch politische Instrumente.

Durch die Einführung einer sektorübergreifenden, mehrjährigen Gesamtrechnung mit der aktuellen Weiterentwicklung des KSG wird zwar die Verbindlichkeit der bislang geltenden KSG-Sektorziele mit jahresscharfen Vorgaben für alle KSG-Sektoren gelockert, wodurch auch eine anteilige Verrechnung von Emissionsminderungen auf die Sektoren des KSG an

Bedeutung verliert. Die Relevanz einer sektorübergreifenden Betrachtung im Bau- und Gebäudebereich als eigenes Handlungsfeld bleibt aber erhalten.

Die Etablierung des Bau- und Gebäudebereichs als Handlungsfeld könnte zur Definition von CO₂- bzw. THG-Budgets und Transformationspfaden unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus führen. Bei der Planung von Einzelbauwerken gewinnt die Betrachtung des vollständigen Lebenszyklus unter Anwendung der Lebenszyklusanalyse bereits an Bedeutung. Parallel dazu steigt die Bedeutung eines zusätzlichen sektorübergreifenden Ansatzes in der jährlichen Statistik der nationalen THG-Emissionen, ihrer Quellen und Ursachen.

7 Anhang

7.1 Informationen zum Primärenergieaufwand und Treibhauspotenzial über den Lebenszyklus von Dämmstoffen

Tabelle 17: Primärenergieaufwand nach verschiedenen Kategorien für verschiedene Dämmstoffe in den Modulen A1-A3, C3 und D [in kWh/m³]

Material	A1-A3				C3				D			
	PERE	PERM	PENRE	PE4NRM	PERE	PERM	PENRE	PENRM	PERE	PERM	PENRE	PENRM
EPS-Hartschaum (Rohdichte 25 kg/m³)	11	0	321	243	1	0	244	-241	-30	0	-152	0
Zellulosefaser Einblas- Dämmstoff	12	214	29	0	260	-214	7	0	-43	0	-112	0
Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS)	65	0	381	361	2	0	402	-361	-68	0	-176	0
Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE)	355	1038	625	36	0	-986	6	-32	668	0	-733	0
PIR Hartschaum	37	0	301	154	1	0	174	-154	29	0	73	0
Mineralwolle (Schrägdach-Dämmung)	34	0	159	0	1	0	10	0	0	0	0	0

Quelle: ÖKOBAUDAT

Tabelle 18: Treibhauspotential nach verschiedenen Kategorien für verschiedene Dämmstoffe in den Modulen A1-A3, C3 und D [in kg CO₂äq pro m³]

Material	A1-A3			C3			D		
	GWP fossil	GWP biogenic	GWP total	GWP fossil	GWP biogenic	GWP total	GWP fossil	GWP biogenic	GWP total
EPS-Hartschaum (Rohdichte 25 kg/m³)	71	0	71	77	0	77	-32	0	-32
Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff	12	-94	-82	2	94	96	-27	0	-27
Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS)	93	1	94	118	0	118	-41	0	-41
Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE)	126	-356	-230	2	338	340	-149	0	-149
PIR Hartschaum	68	0	68	53	0	53	-17	0	-17
Mineralwolle (Schrägdach- Dämmung)	45	0	45	1	0	1	1	0	1

Quelle: ÖKOBAUDAT

7.2 Ergänzende Ergebnisse zu Kapitel 3

Abbildung 35 zeigt den Primärenergieaufwand, getrennt nach Primärenergieaufwand als Energieträger und zur stofflichen Nutzung, für die verschiedenen Szenarien im Dämmstoffmarkt. Es wird deutlich, dass der Primärenergieaufwand zur stofflichen Nutzung bei einer Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus nahezu null ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die im Material gebundene und in Modul A1 aufgenommene Energie wird in Modul C3, also bei Ausbau des Materials, wieder ausgebucht wird. Die Differenz ergibt sich durch den Primärenergieaufwand in den Modulen A2 und A3.

Der Primärenergieaufwand als Energieträger unterscheidet sich in den Modulen A1 bis A3 bei den Dämmstoffen je nach Produktionsverfahren und Energieintensität. Im Vergleich der Szenarien steigt aufgrund des höheren erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergieaufwands von Holzfasern der gesamte Primärenergieaufwand bei einem höheren Anteil von Dämmstoffen aus nawaRo (hauptsächlich Holzfasern). In Modul D1 werden dagegen die Gutschriften aus der potenziellen Substitution von Strom und thermischer Energie erfasst.

Abbildung 35: Primärenergieaufwand (energetisch und stofflich) der verschiedenen Szenarien im Dämmstoffmarkt über den gesamten Lebenszyklus



Quelle: Eigene Darstellung

7.3 Modellbeschreibung Invert/ee-Lab

Methodisch stellt Invert/EE-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, techno-ökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von

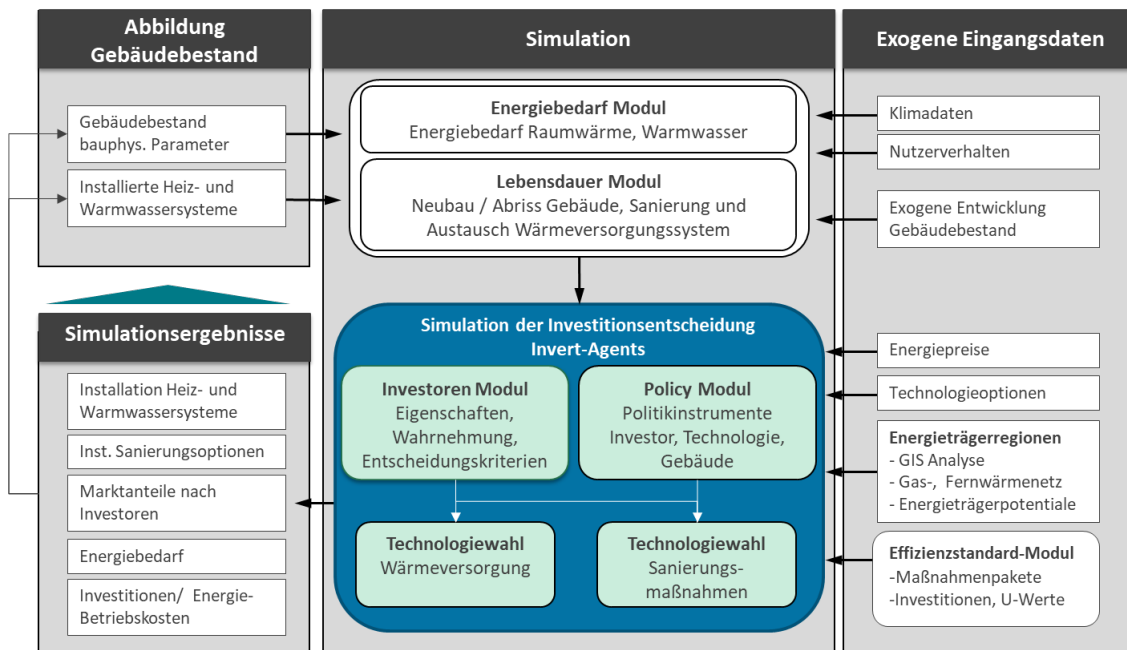
Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden können (Abbildung 36). Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen im Modul INVERT-Agents ermittelt (Steinbach, 2015)

Mit INVERT/EE-Lab ist es möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und Ausgestaltungsvarianten auf den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren. Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes Diffusion EE wird das Modell, um den Bereich der Intermediäre als zentrale Change Agents erweitert, um den Einfluss auf die Investitionsentscheidung im Gebäudebereich abzubilden.

Für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes erneuerbarer Energien im Gebäudebereich werden u.a. folgende relevante Zusammenhänge im Modell abgebildet:

- Berücksichtigung von investorenspezifischen Hemmnissen und Kalkülen bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen.
- Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, hier besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Bereitstellungstechnologien. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.
- Die Modellierung der Energiebereitstellung aus solarthermischen Anlagen erfolgt auf monatlicher Basis unter Berücksichtigung der entsprechenden solaren Einstrahlung. Zudem wird entsprechend der Geometrie der Referenzgebäude, die den solarthermischen Anlagen zur Verfügung stehende Dachfläche im Modell berücksichtigt.
- Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Effizienzmaßnahmen wie Investitionszuschüsse (Marktanreizprogramm), Nutzungspflichten (EEWärmeG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technologie- und gebäudespezifisch (Neubau, Bestand, öffentliche Gebäude) definiert.
- Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der Limitierung erneuerbarer Energieträger über definierte Kostenpotenziale inklusive deren Entwicklung über den Simulationszeitraum.

Abbildung 36: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab

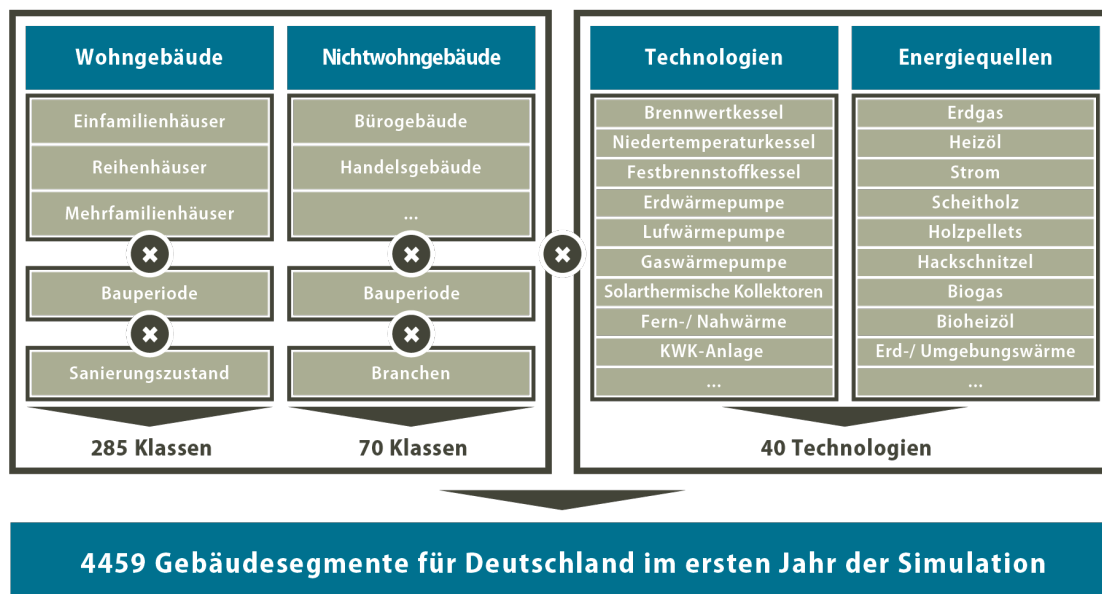


Quelle: (Steinbach, 2015)

Gebäudetypologische Abbildung von Referenzgebäuden und Wärmeversorgungstechnologien

Derzeit werden 40 verschiedene Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser unterschieden, welche über detaillierte technische und ökonomische Daten abgebildet werden. Die Referenzgebäudetypologie mit den entsprechenden Zuordnungen von Gebäuden und Technologien wird auf Basis der Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Diefenbach, Cischinsky and Rodenfels, 2010) und deren Aktualisierung aus dem Jahr 2018 (Cischinsky and Diefenbach, 2018). Die Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden basiert auf Daten aus dem Projekt dataNWG: Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (<https://www.datanwg.de>). Der aus der Modellrechnung resultierende Energiebedarf ist auf die temperaturbereinigten Werte der Anwendungsbilanzen sowie der EE-Wärmebereitstellung nach AGEE-Stat kalibriert.

Abbildung 37: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab

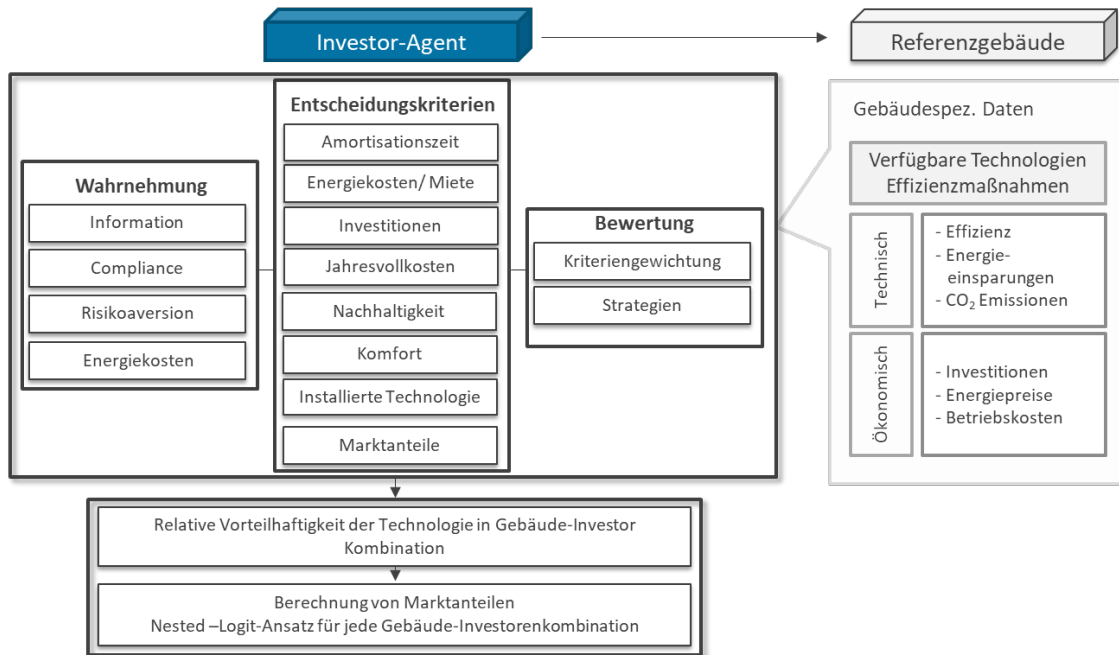


Quelle: (Steinbach, 2015)

Modellierung von Investoren im Gebäudebereich

Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer*, *Private Vermieter*, *Eigentümergeinschaften*, *Wohnungsbaugesellschaften*, *gewerbliche Gebäudebesitzer*. Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nicht – ökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, andererseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt werden.

Abbildung 38: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten



Quelle: (Steinbach, 2015)

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Beschreibung
BEG	Bundesförderung Effiziente Gebäude
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
DIDI	Dekarbonisierung in der Industrie
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energie-Gesetz
EEW	Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft
EPS	Expandiertes Polystyrol
ETS	Emission Trading System
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GWP	Global Warming Potential
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
KfN	Klimafreundlicher Neubau
KSG	Klimaschutzgesetz
LCA	Life Cycle Assessment
MW	Megawatt
PERE	Primary Energy Renewable Energy
PENRE	Primary Energy Non-Renewable Energy
PERM	Primary Energy Renewable Material
PENRM	Primary Energy Non-Renewable Material
PIR	Polyisocyanurat
PV	Photovoltaik
QNG	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgase
WZ	Wirtschaftszweige
XPS	Extrudiertes Polystyrol

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der THG-Emissionen der Sektoren des Klimaschutzgesetz	20
Abbildung 2: Lebenszyklus von Bauwerken nach DIN EN 15804	22
Abbildung 3: Sektoren nach amtlicher Statistik im Bau- und Gebäudebereich – Teil 1	24
Abbildung 4: Sektoren nach amtlicher Statistik im Bau- und Gebäudebereich – Teil 2	25
Abbildung 5: Direkte Verflechtungen der Sektoren des Klimaschutzgesetzes unter Berücksichtigung der Wirtschaftszweige	28
Abbildung 6: Unterscheidung des Energieaufwands in die Kategorien der Primärenergie	30
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Lebenszyklus von Photovoltaikanlagen im Kontext der Sektoren des Klimaschutzgesetzes.....	31
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Lebenszyklus von Wärmepumpen im Kontext der Sektoren des Klimaschutzgesetzes.....	32
Abbildung 9: Entwicklung verschiedener Szenarien für den Vermeidungsfaktor von Strom aus Photovoltaik	33
Abbildung 10: Installierte Leistung und Ertrag von Dachanlagen nach Leistungsklassen im Jahr 2022	34
Abbildung 11: Prognostizierter Zubau der installierten Leistung von Dachanlagen bis 2045.....	35
Abbildung 12: Entwicklung des Strombedarfs von Wärmepumpen bis 2045	36
Abbildung 13: Vergleich des Bedarfs und des Angebots von Strom im Bau- und Gebäudebereich	37
Abbildung 14: Treibhausgasemissionen aus Strombedarf und Treibhausgasminderungspotenziale aus Stromangebot.....	37
Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der Stromerzeugung aus Photovoltaik und Strombedarf einer Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus	39
Abbildung 16: Primärenergieaufwand in der Herstellung, Nutzung, Abfallbehandlung und Beseitigung sowie mögliche Einsparung durch Recycling für Wärmepumpen und Photovoltaik im Jahr 2022	41
Abbildung 17: Treibhausgasemissionen (fossil) in der Herstellung, Nutzung, Abfallbehandlung und Beseitigung sowie mögliche Reduktion durch Recycling für Wärmepumpen und Photovoltaik im Jahr 2022.....	42
Abbildung 18: Vergleich von Primärenergieaufwand und Treibhauspotential über den Lebenszyklus mit dem Stromangebot aus Photovoltaik im Jahr 2022	43
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Lebenszyklus von Dämmstoffen im Kontext der Sektoren des Klimaschutzgesetzes.....	44
Abbildung 20: Dämmstoffabsatz im Jahr 2019 [in m ³]	46
Abbildung 21: Verteilung der im Jahr 2019 statistisch erfassten Dämmstoffe auf die Einsatzorte	47

Abbildung 22: Entwicklung der Anteile verschiedener Dämmstoff-Kategorien nach Einsatzbereichen im Jahr 2045.....	48
Abbildung 23: Primärenergieaufwand (energetisch und stofflich) der verschiedenen Szenarien über den gesamten Lebenszyklus	50
Abbildung 24: Erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergieaufwand (energetisch) der verschiedenen Szenarien über den gesamten Lebenszyklus.....	51
Abbildung 25: Treibhausgasemissionen der verschiedenen Szenarien über den gesamten Lebenszyklus	52
Abbildung 26: Primärenergieaufwand in verschiedenen Kategorien in der Herstellungsphase verschiedener Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen	54
Abbildung 27: Treibhauspotenzial (GWP) in verschiedenen Kategorien in der Herstellungsphase verschiedener Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen	55
Abbildung 28: Schematische Darstellung des Lebenszyklus von Ziegeln im Kontext der Sektoren des Klimaschutzgesetzes	56
Abbildung 29: Produktion von Ziegeln in Deutschland von 2007 bis 2020	58
Abbildung 30: Prozentuale Verteilung der direkten Treibhausgasemissionen (Scope 1) der Ziegelindustrie für 2020	59
Abbildung 31: Direkte Treibhausgasemissionen der Ziegelindustrie bis 2050 (Scope 1)	59
Abbildung 32: Energieträgereinsatz in den Dekarbonisierungspfaden der Ziegelherstellung	60
Abbildung 33: Verringerung der Treibhausgasmindungslücke im KSG-Gebäudesektor durch ausgewählte Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich.....	69
Abbildung 34: Bewertung der Wirkung von bestehenden und geplanten politischen Instrumenten auf die untersuchten Produkte	72
Abbildung 35: Primärenergieaufwand (energetisch und stofflich) der verschiedenen Szenarien im Dämmstoffmarkt über den gesamten Lebenszyklus.....	90
Abbildung 36: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab.....	92
Abbildung 37: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab.....	93
Abbildung 38: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten.....	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der THG-Minderungspotenziale von ausgewählten Aktivitäten im Bau- und Gebäudebereich für die Jahre 2030 und 2045 [in Mio. t CO ₂ äq]	7
Tabelle 2: Klassifikation der Wirtschaftszweige	21
Tabelle 3: Durchschnittliche Vermeidungsfaktoren für Photovoltaik und Emissionsfaktoren für Netzstrom im Jahresverlauf für 2020 [in g/kWh]	39
Tabelle 4: Primärenergieaufwand [in kWh] und Treibhauspotential [in kg CO ₂ äq] in verschiedenen Lebenszyklusmodulen von Wärmepumpen und Photovoltaikanlagen.....	41
Tabelle 5: Wärmeleitfähigkeiten und Einsatzmöglichkeiten von ausgewählten Dämmstoffen.....	45
Tabelle 6: Entwicklung des Dämmstoffvolumens bis 2045 [in Mio. m ³].....	46
Tabelle 7: Szenarien zur Entwicklung des Anteils von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bis 2045.....	47
Tabelle 8: Primärenergieaufwand in verschiedenen Kategorien in der Herstellungsphase (Module A1-A3) ausgewählter Dämmstoffe [in kWh/m ³]	49
Tabelle 9: Treibhauspotential (GWP) in verschiedenen Kategorien in der Herstellungsphase (Module A1-A3) ausgewählter Dämmstoffe [in kg CO ₂ äq/m ³].....	50
Tabelle 10: Ziegelproduktion im Jahr 2020 nach Produkten	58
Tabelle 11: Emissionsminderungspotenzial durch die Dekarbonisierung der Ziegelherstellung für den Einsatz im Bau- und Gebäudebereich [in Mio. CO ₂ äq]	61
Tabelle 12: Emissionswirkung des Stromverbrauchs der Dekarbonisierung der Ziegelherstellung auf den Energiebereich [in Mio. t CO ₂ äq]	61
Tabelle 13: Anteilige Zurechnung der Minderungspotenziale durch den Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten und Wärmepumpen auf den KSG-Gebäudesektor [in Mio. t CO ₂ äq].....	65
Tabelle 14: Anteilige Zurechnung der Minderungspotenziale durch erhöhten Anteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen auf den KSG-Gebäudesektor [in Mio. t CO ₂ äq].....	66
Tabelle 15: Anteilige Zurechnung der Minderungspotenziale durch Dekarbonisierung der Ziegelproduktion auf den KSG-Gebäudesektor [in Mio. t CO ₂ äq] ..	67
Tabelle 16: Übersicht an bestehenden und geplanten politischen Instrumenten für den Bau- und Gebäudebereich	70
Tabelle 17: Primärenergieaufwand nach verschiedenen Kategorien für verschiedene Dämmstoffe in den Modulen A1-A3, C3 und D [in kWh/m ³].....	88

Tabelle 18: Treibhauspotential nach verschiedenen Kategorien für verschiedene Dämmstoffe in den Modulen A1-A3, C3 und D [in kg CO₂äq pro m³] 89

Literaturverzeichnis

Bafa (2023) *Bundesförderung effiziente Gebäude - Förderprogramm im Überblick*. Available at: https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/Foerderprogramm_im_Ueberblick/foerderprogramm_im_ueberblick_node.html;jsessionid=CAB67B955AF6E2BE93F833598C9695E1.intranet232 (Accessed: 7 July 2023).

Bauzentrum München (2017) *Leitfaden Dämmstoffe 3.0*. Available at: <https://www.energieagentur-ebe-m.de/img/logolarge.png> (Accessed: 24 April 2023).

BDEW (2022) 'Jahresvolllaststunden'. Available at: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/jahresvolllaststunden/> (Accessed: 31 March 2023).

Bergner, J., Siegel, B. and Quaschnig, V. (2020) 'Hemmnisse und Hürden für die Photovoltaik'.

Beuth (2021) *DIN EN 15643 - 2021-12*. Available at: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-15643/335506755> (Accessed: 1 December 2022).

BMUV (2016) *Klimaschutzplan 2050*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz). Available at: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-klimaschutzplan-2050.html> (Accessed: 28 April 2023).

BMWK (2023) *Photovoltaik-Strategie*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

Bundesministerium für Justiz (2019) *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)*. Available at: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html> (Accessed: 28 April 2023).

Bundesregierung (2023) *Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigen*. Available at: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/novelle-eeg-gesetz-2023-2023972> (Accessed: 5 July 2023).

Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. (2021) 'Jahresbericht 2021'. Available at: https://ziegel.de/sites/default/files/2021-09/199-02_06_Jahresbericht_2021_RZfinal_0.pdf.

BWMSB (ed.) (2023a) 'Anlage 3 zum Handbuch des Qualitätssiegels Nachhaltige Gebäude'. Available at: https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG_Handbuch_Anlage-3_AnforderungenBund_v1-3.pdf.

BWMSB (ed.) (2023b) 'Handbuch Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude'. Available at: https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG_Handbuch_v1-2.pdf.

Ceramic Unie (2021) *Ceramic Roadmap to 2050*. Available at: <https://cerameunie.eu/media/ambd23os/ceramic-roadmap-to-2050.pdf> (Accessed: 5 July 2023).

Cischinsky, H. and Diefenbach, N. (2018) *Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 - Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand (1. Auflage)*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt (IWU).

co2online (2018) *Ökologisch dämmen in der Kommune*. Berlin: co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH.

DEHSt (2022) *Ausgestaltung des EU-ETS*. Available at: https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/EU-Emissionshandel-verstehen/Ausgestaltung-des-EU-ETS/ausgestaltung-des-eu-ets_node.html (Accessed: 25 August 2023).

Deutsches Institut für Normung e. V. (2022) 'Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021'. Beuth Verlag GmbH.

Diefenbach, D.N., Cischinsky, D.H. and Rodenfels, M. (2010) *Datenbasis Gebäudebestand*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.

Diestel, S. and Weimar, H. (2014) *Der Kohlenstoffgehalt in Holz- und Papierprodukten – Herleitung und Umrechnungsfaktoren*. 38. Hamburg: Universität Hamburg, Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie.

EEG 2023: *Das hat sich für Photovoltaik-Anlagen geändert* (2023) *Verbraucherzentrale.de*. Available at: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/erneuerbare-energien/eeg-2023-das-hat-sich-fuer-photovoltaikanlagen-geaendert-75401> (Accessed: 6 July 2023).

EnEff Gebäude 2050 - Demonstration einer innovativen und nachhaltigen Aufdachdämmung aus Rohrkolben (2020). Abschlussbericht. Holzkirchen, Ladenburg, Schönau: Fraunhofer Institut für Bauphysik, SAINT-GOBAIN ISOVER G+H, typha technik Naturbaustoffe.

energie-experten (2022) *Endenergie in Deutschland: Definition, Zahlen & Fakten, energie-experten*. Available at: <https://www.energie-experten.org/energie-sparen/energie-berechnen/energieformen/endenergie> (Accessed: 21 April 2023).

Fleschutz, M. and Murphy, M.D. (2021) 'elmada: Dynamic electricity carbon emission factors and prices for Europe', *Journal of Open Source Software*, 6(66), p. 3625. Available at: <https://doi.org/10.21105/joss.03625>.

FNR (2020) *Absatzvolumen von Dämmstoffen in Deutschland*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Available at: <https://mediathek.fnr.de/absatzvolumen-von-dammstoffen-in-deutschland-2019.html> (Accessed: 24 April 2023).

Frischknecht, R. et al. (2020) *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*. Report T12-19:2020. International Energy Agency.

Geres, R., Lausen, J. and Weigert, S. (2021) 'Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland. Ein Weg zur Klimaneutralität der Branche bis 2050'. Edited by Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.

Harthan, Dr.R.O. et al. (2022) *Klimaschutzbeitrag verschiedener CO2-Preispfade in den BEHG-Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Harthan, R.O. et al. (2023) *Projektionsbericht 2023 für Deutschland*. Umweltbundesamt.

Hawkes, A.D. (2010) 'Estimating marginal CO₂ emissions rates for national electricity systems', *Energy Policy*, 38(10), pp. 5977–5987. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.053>.

Hoxha, E. *et al.* (2020) 'Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods', *Buildings and Cities*, 1(1), pp. 504–524. Available at: <https://doi.org/10.5334/bc.46>.

Huckestein, Dr.B. (2021) *Der Weg zur treibhausgasneutralen Verwaltung*. Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/der-weg-zur-treibhausgasneutralen-verwaltung> (Accessed: 14 April 2023).

IEA (2022) *Solar PV Global Supply Chains*. International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains> (Accessed: 23 July 2023).

IPCC (2006) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 1 - General Guidance and Reporting*. Available at: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html> (Accessed: 1 December 2022).

Jochem, E. *et al.* (2004) *Werkstoffeffizienz - Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe*. Fraunhofer IRB Verlag (ISI-Schriftenreihe 'Innovationspotenziale').

Kander, A. *et al.* (2015) 'National greenhouse-gas accounting for effective climate policy on international trade', *Nature Climate Change* 2014 5:5, 5(5), pp. 431–435. Available at: <https://doi.org/10.1038/nclimate2555>.

Klann, U. and Schulz, V. (2001) 'Großflächige Ökobilanzen - Anwendung der umweltbezogenen Input-Output-Analyse'.

Klassifikation der Wirtschaftszweige (2008). Wiesbaden.

Koalitionsausschuss (2023) 'Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung'.

Lewicki, P. (2023) *Photovoltaik*, Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik> (Accessed: 14 April 2023).

Marktübersicht - Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (2019). Gülzow-Prüzen: FNR.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2023) *Fragen und Antworten zur Photovoltaikpflicht*, *Baden-Württemberg.de*. Available at: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/sonnenenergie/photovoltaik/photovoltaikpflicht/faq-photovoltaikpflicht> (Accessed: 6 July 2023).

Nullsteuersatz für Umsätze im Zusammenhang mit bestimmten Photovoltaikanlagen (§ 12 Absatz 3 Umsatzsteuergesetz (UStG)) (2023) *Bundesministerium der Finanzen*. Available at: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/BMF_Schreiben/Steuerarten/Umsatzsteuer/Umsatzsteuer-Anwendungserlass/2023-02-27-nullsteuersatz-fuer-umsaetze-im-zusammenhang-mit-bestimmten-photovoltaikanlagen.html (Accessed: 6 July 2023).

Penshorn, B. (2018) *Aus der Forschung: Lignin-Aerogele, baustoffwissen*. Available at: https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung_technik_trends/aus-der-forschung-lignin-aerogele/ (Accessed: 23 August 2023).

Ramseier, L. and Frischknecht, R. (2020) 'Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland'.

Reinhardt, J. *et al.* (2019) *Ganzheitliche Bewertung von verschiedenen Dämmstoffalternativen*. Heidelberg/Neckargemünd: Institut für Energie- und Umweltforschung.

Reinhardt, J. *et al.* (2022) *Der Gebäudebestand steht vor einer Sanierungswelle – Dämmstoffe müssen sich den Materialkreislauf erschließen*. Endbericht. Heidelberg: ifeu.

Repenning, J., Harthan, Dr.R.O. and Blanck, R. (2021) *Projektionsbericht 2021 für Deutschland*.

Ritter, D., Prof. Dr. Bauknecht, D. and Krieger, S. (2021) *Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Dachanlagen*. 66/2021. Freiburg: Umweltbundesamt.

Rüter, Dr.S. and Wolff, A. (2019) *Stärkung nachwachsender Rohstoffe am Dämmstoffmarkt*. Ergebnisbroschüre. Berlin/Hamburg: Thünen-Institut für Holzforschung, Deutsche Umwelthilfe e.V. Available at: https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/Ergebnisbroschuere_StaRDaemm_191217_Web.pdf.

Schlomann, Dr.B. *et al.* (2023) *Evaluation der „Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft“*. Karlsruhe, Basel, Stuttgart, Berlin: Prognos, Universität Stuttgart, Öko-Institut, Fraunhofer ISI.

Steinbach, Dr.J. (2015) *Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich*. Karlsruhe: Fraunhofer Verlag.

Steinbach, Dr.J. *et al.* (2021) *Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050*. Karlsruhe, Freiburg: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).

Sterchele, P. *et al.* (2021) *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen*. Fraunhofer ISE.

UBA (2023) *UBA-Prognose: Treibhausgasemissionen sanken 2022 um 1,9 Prozent*, Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/uba-prognose-treibhausgasemissionen-sanken-2022-um> (Accessed: 14 July 2023).

Weinhold, N. (2023) *7,5 Gigawatt Photovoltaik-Zubau 2022, Erneuerbare Energien*. Available at: <https://www.erneuerbareenergien.de/technologie/solar/75-gigawatt-photovoltaik-zubau-2022> (Accessed: 28 August 2023).