

STUDIE

Reduktion und Regulierung von Embodied-Carbon-Emissionen im deutschen Gebäudesektor

Schaffung von Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe



Bitte zitieren als:

Agora Industrie, ifeu, RISE und Ramboll (2024): Reduktion und Regulierung von Embodied-Carbon-Emissionen im deutschen Gebäudesektor: Schaffung von Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe.

Studie

Reduktion und Regulierung von Embodied-Carbon-Emissionen im deutschen Gebäudesektor: Schaffung von Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe

Im Auftrag von

Agora Industrie
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
www.agora-industrie.de
info@agora-industrie.de

Projektpartner

ifeu – Institut für Energie- und
Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstraße 3 | 69120 Heidelberg
www.ifeu.de

RISE Institute for Regenerative Spatial Systems
Science e. U.
Krakauer Straße 19 | 1020 Wien, Österreich
www.riselabs.at

Ramboll Management Consulting Brussels SA/NV.
Square de Meeûs 35 | 1000 Brüssel, Belgien
www.ramboll.com

Projektleitung

Eleanor Batilliet
eleanor.batilliet@agora-industrie.de

Autorinnen und Autoren

Eleanor Batilliet, Kathy Reimann, Helen Rolfing,
Marie Westhof (alle Agora Industrie); Corinna Fischer
(Agora Energiewende); Florian Maiwald, Martin Pehnt,
Patrick Zimmerman (alle ifeu); Martin Röck (RISE);
Matteo Caspani, Xavier Le Den, Jacob Steinmann
(alle Ramboll).

Danksagung

Für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung dieser Publikation danken wir insbesondere Frank Jordans, Dr. Julia Metz, Frank Peter, Oliver Sartor, Aylin Shawkat (alle Agora Industrie); Simon Müller, Uta Weiß (alle Agora Energiewende); Arnaud Brizay, Dr. Christine Chemnitz, Wilhelm Klümper (alle Agora Agrar); Kaisa Amaral, Alexandra Steinhardt, Anja Werner (alle Agora Think Tanks); Prof. Michael Haist (Leibniz Universität Hannover) sowie Prof. Christian Glock (Rheinland-Pfälzische Technische Universität).

Wir sind auch allen Workshop-Teilnehmer:innen dankbar, die uns wichtiges und konstruktives Feedback gegeben haben, um die Qualität des Berichts zu verbessern, insbesondere: Patrick Biegon (Deutsche Umwelthilfe e. V.), Anna Braune (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), Macielle Vivienne Deiters (Leibniz Universität Hannover), Anne-Caroline Erbstößer (Hauptverband der Deutschen Bauindustrie), Lisa Graaf (Buildings Performance Institute Europe), Dora Griechisch (Deutsche Umwelthilfe e. V.), Joachim Hein (Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.), Stela Ivanova (BMWK IVE2), Nicolas Kerz (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung), Constanze Krüger (VELUX Deutschland GmbH), Thomas Lützkendorf (Karlsruher Institut für Technologie), Mathias Oliva y Hausmann (BMWSB B I 4), Jörg Schumacher (Bundesarchitektenkammer), Karl Thies (CEMEX Deutschland AG), Martin Wittjen (Bund Deutscher Baumeister).

Wir danken auch allen Beteiligten, die uns in Interviews wertvolle Informationen geliefert haben, insbesondere: Harpa Birgisdottir (AAU BUILD), Jacques Chevalier (Alliance HQE, INIES Coordinator), Elise Pischetsrieder (Weberbrunner Architekten), Christophe Rodriguez (Institut Français pour la Performance du Bâtiment, IFPEB), Duygu Yüçetas (ee concept) sowie Gebäudeplaner:innen bei Ramboll und Branchenexpertinnen und -experten beim Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) und der Wirtschaftsvereinigung (WV) Stahl.

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten ist entscheidend, um die Transformation der Industrie in Richtung Klimaneutralität bis Mitte des Jahrhunderts sicherzustellen.

Der Bausektor ist einer der größten Konsumenten von Grundstoffen wie Zement oder Stahl. Er eignet sich damit auch dazu eine Vorreiterrolle als Leitmarkt für klimafreundliche Materialien einzunehmen. In der Bauindustrie gibt es bereits erste Akteure, die aktiv dazu beitragen die Nachfrage nach weitgehend emissionsfreien und zirkulären Baumaterialien zu fördern. Diese Ansätze gilt es nun weiter auszubauen, um so den Bedarf für klimaneutrale Materialien zu stimulieren und so für die Industrie die notwendige Nachfrage zu schaffen, um weiter in die Transformation zur Klimaneutralität investieren zu können.

Zunächst geht es darum die Embodied-Carbon-Emissionen (ECE) für Baumaterialien zu ermitteln und transparent zu machen. Eine schrittweise Einführung von Grenzwerten bezüglich der CO₂-Intensität der im Neubau eingesetzten Materialein trägt dann dazu bei, die Nachfrage im Bausektors nach klimafreundlichen Produkten zu stimulieren und Barrieren für neue emissionsarme Produkte abzubauen. Die nachfrageseitigen Impulse sollten dabei in der EU und in Deutschland in Abstimmung mit Instrumenten wie den Klimaschutzverträgen erfolgen, die die Angebotsseite adressieren.

Wir zeigen mit dieser Studie auf, wie dieser politische Rahmen aussehen kann.

Ich wünsche eine angenehme Lektüre!

Frank Peter
Direktor, Agora Industrie

→ Ergebnisse auf einen Blick

- 1 **Die Herstellung von Baustoffen wie Stahl, Beton und Ziegeln, sowie deren Verarbeitung am Bau, machen derzeit bis zu 90 Prozent der CO₂-Emissionen im Lebenszyklus neuer Gebäude aus.** Diese sogenannten Embodied-Carbon-Emissionen beliefen sich in Deutschland 2023 auf ca. 73 Millionen Tonnen CO₂-Äq. Um Klimaneutralität effizient zu erreichen ist es zentral, dass diese Emissionen bis 2045 nahezu vollständig vermieden werden.
- 2 **Der Umstieg auf klimafreundliche Baustoffe schafft eine langfristige Geschäftsgrundlage für Investitionen in weitgehend emissionsfreie Produktionstechnologien – und ist daher ein Schlüssel für die Transformation der Industrie.** Eine kosteneffiziente und nachhaltige Strategie sollte klimaneutrale Grundstoffe durch zirkuläre und effizientere Baupraktiken ergänzen. Dazu gehören das Recyclen und Wiederverwenden von Grundstoffen sowie der Umstieg von mineralischen auf erneuerbare Materialien.
- 3 **Ein Umstieg auf klimafreundliche Grundstoffe wird die Konstruktionskosten im nächsten Jahrzehnt nur marginal erhöhen.** Obwohl weitgehend emissionsfreier Stahl und Beton derzeit noch um bis zu ein Drittel teurer sind, erhöhen sie die Baukosten lediglich in dem Maße wie andere, nicht-klima-bezogenen Änderungen, z. B. die Wahl einer bestimmten Fassade. Bis 2040 können die Kosten konventioneller Baustoffe erreicht und bis 2050 sogar unterschritten werden.
- 4 **Um Embodied-Carbon-Emissionen zu verringern, ist eine wirksame Kombination aus Maßnahmen nötig.** Eine Implementierung schrittweise strengerer Grenzwerte, wie in den überarbeiteten EU-Gebäuderichtlinie (EPBD) vorgegeben, ist dafür zentral. Es braucht aber zusätzlichen Maßnahmen, wie ein modernisiertes Baurecht, um die Emissionen schon bis 2030 deutlich zu senken und Anreize für kreislaforientierte und klimafreundliche Baupraktiken zu schaffen.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	5
Glossar	7
Zusammenfassung	9
1 Embodied-Carbon-Emissionen als Strategie für die Dekarbonisierung	14
1.1 Einleitung und Definition	14
1.2 Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen als Schlüsselstrategie für die Klimaziele	16
1.3 Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen als Antrieb für grüne Leitmärkte	18
2 Embodied-Carbon-Emissionen in Gebäuden und Dekarbonisierungsoptionen	23
2.1 Status quo Embodied-Carbon-Emissionen in Gebäuden	23
2.2 Maßnahmen zur Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen für den Neubau	27
3 Auswirkungen der Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen	32
3.1 Klimaschutzpotenziale	32
3.2 Auswirkungen auf die Materialkosten	38
4 Der politische Rahmen für Embodied-Carbon-Emissionen in Europa und Deutschland	42
4.1 Politische Instrumente in der EU und Deutschland	42
4.2 Bestehende Herausforderungen	48
4.3 Anforderungswerte: Erkenntnisse aus anderen EU-Ländern	51
5 Empfehlungen für einen Policy-Mix	55
5.1 Schrittweise ordnungsrechtliche Einführung von Anforderungswerten	55
5.2 Ergänzende Instrumentenvorschläge	63
Anhang	67
Methodik und Annahmen zu Kapitel 2.1	75
Methodik und Annahmen zu Kapitel 3.1	77
Methodik und Annahmen zu Kapitel 3.2	82
Literaturverzeichnis	83

Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Erläuterung
AVV Klima	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Beschaffung klimafreundlicher Leistungen
BauPVO	Bauprodukteverordnung
BAU	<i>Business as usual</i>
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
BECCS	<i>Bioenergy with carbon capture and storage</i> (Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoffdioxidemissionen aus biogenen Energieträgern)
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BF	<i>Blast Furnace</i> (Hochofenroute der Primärstahlherstellung)
BG	Bürogebäude
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauen
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
CBAM	<i>Carbon Border Adjustment Mechanism</i>
CCS	<i>Carbon capture and storage</i> (Abscheiden und Speichern von Kohlenstoffdioxid)
CCU	<i>Carbon capture and utilisation</i> (Filtern und Weiterverwenden von Kohlenstoffdioxid)
CCfDs	<i>Carbon Contracts for Difference</i> (Klimaschutzverträge)
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DGNB	Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen
DPP	Digitaler Produktpass
EAf	<i>Electric arc furnace</i> (Sekundärstahlherstellung im Elektro-Lichtbogenofen)
ECE	Embodied-Carbon-Emissionen
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i> (EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden)
EPC	<i>Energy performance certificate</i> (Energieausweis)
EPD	<i>Environmental product declaration</i> (Umweltproduktdeklaration)
EPS	Expandiertes Polystyrol
ESPR	<i>Ecodesign for Sustainable Products Regulation</i> (Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte)
ETA	<i>European technical assessment</i> (Europäische Technische Bewertung)
ETS	<i>Emissions trading system</i> (Emissionshandelssystem)
EZFH	Ein- und Zweifamilienhäuser
G-DR	<i>Direct Reduction with natural gas</i> (Direktreduktion mit Erdgas)
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GWP _{biogen}	<i>Global warming potential</i> (Treibhauspotenzial) biogener Energieträger und Stoffe
GWP _{fossil}	Treibhauspotenzial fossiler Energieträger und Stoffe

GWP_{gesamt}	Treibhauspotenzial insgesamt
GWP_{luluc}	Treibhauspotenzial der Landnutzung und Landnutzungsänderung (<i>Land use and land use change</i>)
H-DR	Direktreduktion mit Wasserstoff
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
KFN	Förderprogramm Klimafreundlicher Neubau
KfW	Bundeseigene Förderbank
KG	Kostengruppe nach DIN 276
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KSG	Klimaschutzgesetz
LBO	Landesbauordnung
LCA	<i>Life cycle assessment</i> (Lebenszyklusbetrachtung)
LESS	<i>Low Emission Steel</i> Standard
LPH	Leistungsphase nach der HOAI
MBO	Musterbauordnung
MFH	Mehrfamilienhäuser
MtO	<i>Methanol to olefins</i> (Herstellung von Olefinen aus Methanol)
NaWoh	Qualitätssiegel Nachhaltiger Kleinwohnungsbau
NKWS	Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
NRF	Nettoraumfläche nach DIN 277
NWG	Nichtwohngebäude
OSB-Platten	<i>Oriented structural board</i> (Grobspanplatte)
PCR	<i>Product category rules</i> (Produktkategorie-Regeln)
PU	Polyurethan-Hartschaum
PV	Photovoltaik
QNG	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
THG	Treibhausgas
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TRL	<i>Technology readiness level</i> (Entwicklungsstand einer Technologie in Bezug auf die Marktreife)
UBA	Umweltbundesamt
vBG	vorhabenbezogene Bauartgenehmigung
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
WG	Wohngebäude
WLC	<i>Whole life carbon emissions</i> (Treibhausgasemissionen aller Lebenszyklusmodule nach DIN EN 15978)
XPS	Extrudiertes Polystyrol

Glossar

CO₂-Äquivalent (CO₂-Äq) ist die Menge Kohlenstoffdioxid, die dieselbe Umweltauswirkung wie ein anderes Treibhausgas verursacht.

Embodied-Carbon-Emissionen bezeichnen in dieser Studie die THG-Emissionen aus den Lebenszyklusphasen der Gebäudeherstellung – Rohstoffbereitstellung (A1), Transport (A2) und Produktherstellung (A3). Anders als Lebenszyklusemissionen umfassen *Embodied Carbon*-Emissionen keine Emissionen, die während der Nutzungsphase eines Produkts entstehen (Energieverbrauch). Vgl. „Lebenszyklusemissionen“.

Emissionsarm bezieht sich auf Grundstoffe oder Produkte mit deutlich reduzierten CO₂-Emissionen im Vergleich zu einer *Baseline*. Die CO₂-Reduktion lässt sich als absolute Zahl oder relativer Wert (z. B. in Prozent) berechnen.

Funktionelle Einheit ist eine quantifizierbare Einheit zur Messung des gesamten Lebenszyklus-Fußabdrucks des Gebäudes (z. B. kg CO₂/m² Jahr).

Grüne Prämie ist der Preisaufschlag, den Käufer:innen von klimafreundlichen Grundstoffen oder damit im Zusammenhang stehenden Gütern zahlen müssen, damit der Hersteller die zusätzlichen Kosten für deren Produktion über den Markt decken kann.

Treibhausgaspotenzial (*Global Warming Potential, GWP*) ist ein Maß für die Fähigkeit eines Treibhausgases zur globalen Erwärmung beizutragen, indem es die Wärmestrahlung in der Atmosphäre über einen bestimmten Zeitraum einfängt. Es wird als Verhältnis der Wärmewirkung einer bestimmten Menge eines Gases im Vergleich zur gleichen Menge CO₂ berechnet, wobei CO₂ ein GWP von 1 hat.

Klimaneutral bezieht sich im vorliegenden Bericht auf die Klimaneutralität eines Grundstoffs oder Produkts. Es entstehen bei der Herstellung des Grundstoffs oder Produkts bilanziell keine Treibhausgasemissionen.

Klimafreundlich dient im vorliegenden Bericht als Oberbegriff für die Herstellung von Grundstoffen und Produkten, welche emissionsarm, weitgehend emissionsfrei oder klimaneutral ist. CO₂-Emissionen müssen dabei so reduziert werden, dass sie mit dem Ziel der Klimaneutralität bis Mitte des Jahrhunderts vereinbar sind

Kreislauffähige Grundstoffe und Produkte sind in diesem Bericht Grundstoffe und Produkte, die recycelt sind, eine höhere Materialeffizienz haben (Leichtbauweise, Verlustminimierung), Substitute für CO₂-intensive Primärgrundstoffe oder länger nutzbar sind (verlängerte Nutzungsdauer und Wiederverwendung von Komponenten).

Lebenszyklusanalyse ist eine Ökobilanzierung, die die Umweltauswirkungen von Gebäuden und Baustoffen während des gesamten Lebensweges systematisch analysiert und bewertet.

Lebenszyklusemissionen bezeichnen die Gesamtheit der Emissionen im Zusammenhang mit einem Produkt vom Beginn der Produktionswertschöpfungskette bis hin zur endgültigen Entsorgung.

Lebenszyklusphasen umfassen einzelne Phasen der Planung, Herstellung/Errichtung, Nutzung, Entsorgung sowie Auswirkungen außerhalb der direkten Systemgrenzen von Gebäuden und dazu benötigten Baustoffen.

Leitmärkte sind Märkte, die mithilfe von Politikmaßnahmen geschaffen oder unterstützt werden, um Innovationen zu beschleunigen und Marktteilnehmer:innen darin zu bestärken, eine bestimmte Art von Produkt oder Grundstoff oder ein neues Design einzuführen.

Materialeffizienz ist ein Maß dafür, inwiefern ein bestimmter Materialeinsatz in einem Produktionsprozess zu einem entsprechenden *Output* an materiellem Servicewert führt. Bei ansonsten gleichen Bedingungen erfordert ein materialeffizienteres

Produkt weniger Material, um gegenüber einem vergleichbaren Produkt den gleichen oder einen höheren Nutzen zu erbringen.

Weitgehend emissionsfrei bezeichnet die Verringerung der CO₂-Emissionen (gemessen in CO₂-Äquivalenten) aus der Herstellung eines Grundstoffs oder Produkts auf ein Niveau, das fast klimaneutral (im Vergleich zum heutigen Stand) ist, wobei weiterhin eine kleine Menge Restemissionen entsteht.

Zusammenfassung

Hintergrund, Ziel und Gegenstand dieser Studie

Ab 2023 und 2030 gelten neue Berichtspflichten und Grenzwerte für Neubauten und deren Treibhausgaspotenzial (*Global Warming Potential*, GWP) über den Lebenszyklus gemäß der novellierten EU-Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (*Energy Performance of Buildings Directive*, EPBD).

In Deutschland steht dieses Thema bereits weit oben auf der politischen Agenda. Es ist unter anderem im Koalitionsvertrag verankert und der Bericht des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) zu *Methodiken zur ökobilanziellen Bewertung von Wohn- und Nichtwohngebäuden* bescheinigt, dass die methodischen Grundlagen für die Einführung von Emissionsgrenzwerten in Deutschland bereits gegeben sind. Für letzteres plädieren auch diverse Stakeholder:innen.

Die vorliegende Agora-Studie zeigt, wie die Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen (ECE) im Gebäudebereich in doppelter Hinsicht einen Beitrag zur Klimaneutralität leistet.

Einerseits ist sie eine Schlüsselstrategie, um die Klimaziele sektorübergreifend einzuhalten, weil ECE einen relevanten Anteil an den Gesamtemissionen ausmachen. Andererseits ist die Errichtung von Gebäuden der zentrale Nachfragesektor von industriellen Grundstoffen, etwa Stahl, Zement und Kunststoffen, und kann damit, bei entsprechender Ausgestaltung, eine Leitmarktrolle übernehmen. Letzteres ist ein zentraler Schlüsselfaktor für die industrielle Transformation, wie das neuste Konzeptpapier des BMWK und die politischen Prioritäten der EU-Kommissionspräsidentin von der Leyen für die nächste EU-Kommission zeigen.

In dieser Studie wird der Begriff Embodied-Carbon-Emissionen (ECE) für die Treibhausgasemissionen aus den Lebenszyklusphasen der Herstellung – Rohstoffbereitstellung (A1), Transport (A2) und Produktherstellung (A3) – verwendet.¹

Die Studie befasst sich schwerpunktmäßig mit Neubauten (Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser und Büros), da diese einen hohen Anteil der Emissionsintensität des gesamten Baugewerbes und der Bau-tätigkeit verantworten und den künftigen EPBD-Anforderungen unterliegen.

Zunächst wird basierend auf einem Top-Down-CO₂-Budget – gestützt auf das deutsche Klimaneutralitätsziel für 2045 – ein Zielpfad für die ECE nach Gebäudetypen berechnet.

Dabei werden zwei *Downscaling*-Strategien verglichen, die festlegen, wie die Zuteilung des Gesamtbudgets erfolgt, um ein konkretes Budget für den Gebäudesektor zu erstellen (*Grandfathering* und wirtschaftliche Wertschöpfung). Die entwickelten Pfade beinhalten erhebliche Reduktionen der ECE pro Quadratmeter, konkret eine Reduktion um etwa 38 Prozent bis 2030 und eine Reduktion um 90 Prozent bis 2045 im Vergleich zu 2025 (Abbildung A).

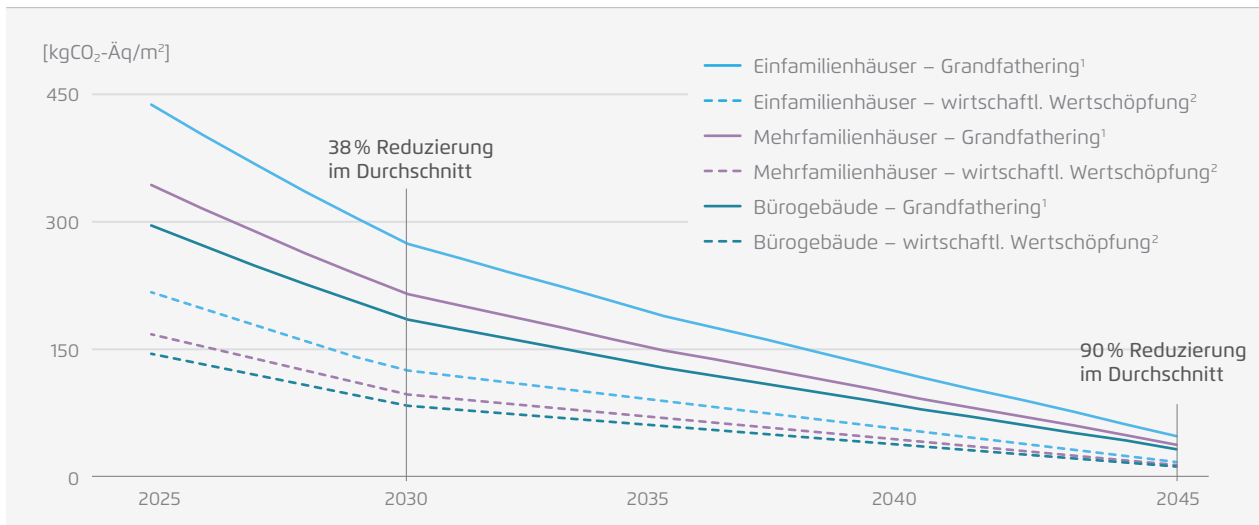
Für die zielkompatible Reduktion und Instrumentierung von ECE im Gebäudebereich ist daraus folgend die Kenntnis des Ausgangszustands wesentlich. Diese Studie klärt, wie viel ECE jährlich im Gebäudesektor in Deutschland entstehen.

Dies hängt von mehreren Faktoren ab. Zentraler Faktor ist dabei die Frage, wie viele und welche Arten von Wohn- und Nichtwohngebäuden gebaut werden. Die grundlegende Bauweise, also das überwiegend für die Tragstruktur verwendete Baumaterial,

¹ In anderen Studien werden unter Embodied-Carbon-Emissionen weitere Lebenszyklusmodule verstanden. Die Einschränkung ist in Kapitel 5.1.3 begründet.

Zielpfade zur Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen basierend auf dem Klimaschutzgesetz

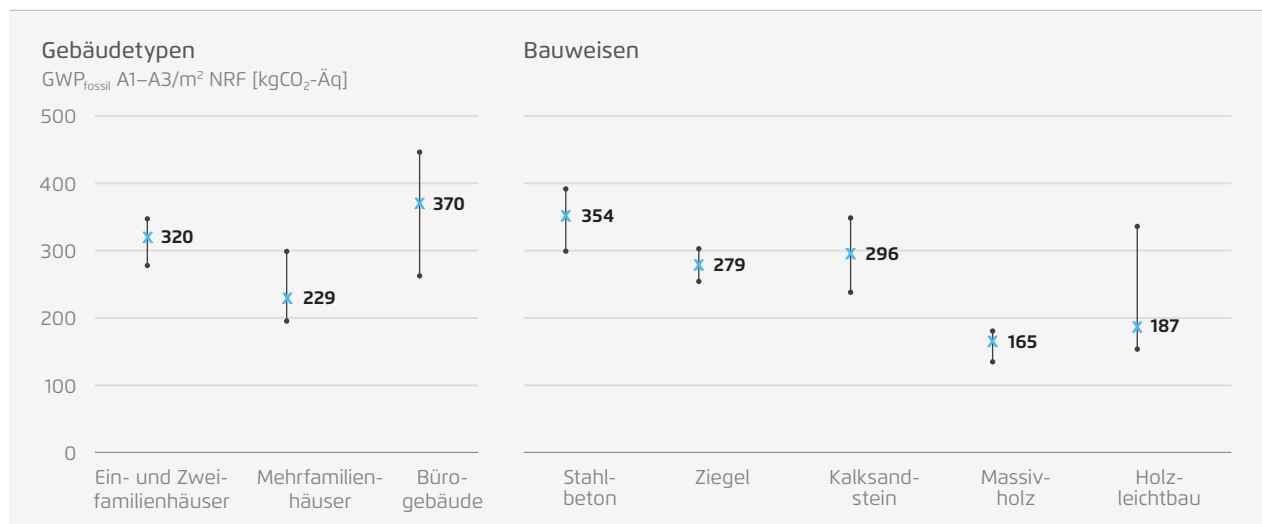
→ Abb. A



Agora Industrie, ifeu und Ramboll (2024). Werte siehe Tabelle 8 im Anhang. ¹Beim Grandfathering als Downscaling-Strategie wird das verbleibende Emissionsbudget anhand historischer oder aktueller Emissionswerte auf die Sektoren verteilt. ²Die wirtschaftliche Wertschöpfung bestimmt das verbleibende Emissionsbudget auf Grundlage der gesamten Bruttowertschöpfung jedes Sektors und seines Anteils an der gesamten Wirtschaftstätigkeit.

Kennwerte von Embodied-Carbon-Emissionen in heutigen Gebäuden in Deutschland nach Gebäudetypen und nach Bauweisen

→ Abb. B



Agora Industrie und ifeu (2024). GWP = Global warming potential; NRF = Nettonraumfläche nach DIN 277

beeinflusst die beim Bau entstehenden Emissionen genauso wie die Produktionsprozesse der verwendeten Baustoffe. Aus einer Metaanalyse der Literatur und dokumentierten Bauprojekten (Praxiswerten)

wurden konkrete ECE-Werte für heute in Deutschland geplante beziehungsweise gebaute Einfamilien-, Mehrfamilien- und Bürohäuser in fünf verschiedenen Bauweisen ermittelt (Abbildung B).

Hinsichtlich der Gebäudetypen lässt sich als übergeordnete Erkenntnis festhalten, dass Wohngebäude im Median weniger ECE verursachen als Bürogebäude (370 kg/m^2). Das ergibt sich unter anderem aus der sehr hohen Relevanz der Stahlbeton-Bauweise bei Bürogebäuden. Bei den Wohngebäuden kommt es zu geringeren Auswirkungen. Mehrfamilienhäuser (MFH) (229 kg/m^2) erzeugen weniger ECE als Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH) (320 kg/m^2).

Für die Reduktion der ECE von Gebäuden ergeben sich verschiedene Möglichkeiten. Dazu gehören die zunehmende Verwendung von kreislauffähigen Materialien und Komponenten, eine höhere Materialeffizienz in der Herstellung und die Umstellung auf weitgehend emissionsfreie Materialien. Auf die Marktreife dieser Ansätze muss jedoch nicht gewartet werden. **Bereits mit heute verfügbaren Produkten, Techniken und Maßnahmen lassen sich signifikante Emissionsminderungen erreichen.**

Die Studie vergleicht verschiedene Entwicklungspfade hin zu Klimaneutralität bis 2045. Die Berechnungen zielen darauf ab, mögliche

Emissionseinsparungen bis 2045 für den Neubau von Gebäuden in Deutschland zu beziffern.

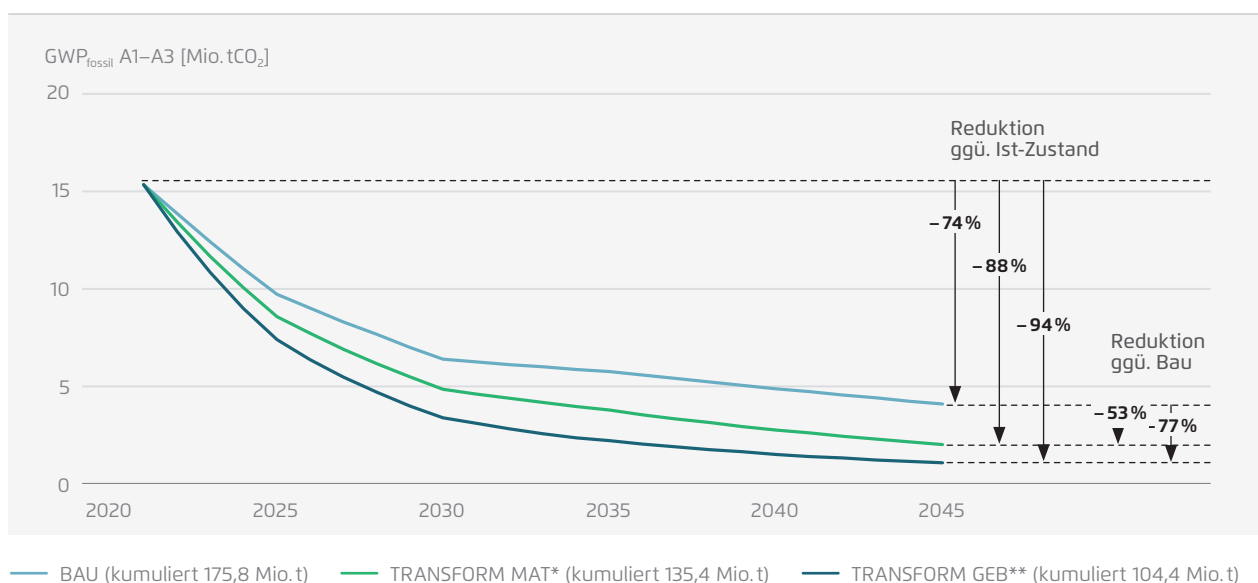
Ausgangspunkt für die Modellierung war die Festlegung eines Basisszenarios (*Business as usual*, BAU) und zweier Transformationsszenarien bis 2045 (Abbildung C). Das erste Optimierungsszenario TRANSFORM MAT setzt auf eine schnellere Dekarbonisierung der Baustoff- beziehungsweise Materialherstellung. Es zeigt damit die Potenziale in der Baustoffindustrie auf. Das zweite Transformationsszenario TRANSFORM GEB baut auf dem vorherigen Szenario auf und betrachtet verbesserte Bauverfahren, höhere Materialeffizienz, Materialsubstitution (Umstellung von mineralischen auf nachwachsende Baustoffe) und Recycling sowie Wiederverwendung.

Ein BAU-Szenario wäre für das Erreichen der Klimaschutzziele bei gleichbleibendem Neubau-Niveau nicht ausreichend.

Das BAU-Szenario erzielt über das gesamte Neubausvolumen betrachtet bis 2045 nennenswerte Einsparungen gegenüber dem Startjahr der Modellierung

Dekarbonisierungsszenarien für Embodied-Carbon-Emissionen im Neubau bis 2045 – jährliche gesamte Treibhausgasemissionen

→ Abb. C



Agora Industrie und ifeu (2024). *Das Optimierungsszenario TRANSFORM MAT setzt auf eine schnellere Dekarbonisierung der Baustoff- bzw. Materialherstellung. **TRANSFORM GEB baut auf dem vorherigen Szenario auf und betrachtet verbesserte Bauverfahren, höhere Materialeffizienz, Materialsubstitution (Umstellung von mineralischen auf nachwachsende Baustoffe) und Recycling sowie Wiederverwendung. GWP = Global warming potential

(minus 74 Prozent). Quadratmeterbezogen zeigen sich im Vergleich deutlich geringere Emissions-einsparungen (minus 39 Prozent), was den hohen Einfluss der verringerten Neubauaktivität verdeutlicht. Es verblieben nennenswerte Restbeträge bis 2045, welche durch Senken allein nicht auszugleichen wären. Zusätzliche planerische und technische Maßnahmen sind also unabdingbar.

Das TRANSFORM-MAT-Szenario erreicht bereits deutlich tiefgreifendere Einsparungen (minus 88 Prozent Gesamtemissionen gegenüber 2021). Gegenüber einem BAU-Szenario können 2045 mit umfangreichen Verbesserungen der Baustoffherstellung 53 Prozent der ECE je Quadratmeter eingespart werden.

Eine ambitionierte Dekarbonisierung der Grundstoff- und Baustoffindustrie ist somit ein Grundpfeiler zur Reduktion von ECE, aber weitere nachfrageseitige Maßnahmen sind für das Ziel der Klimaneutralität notwendig.

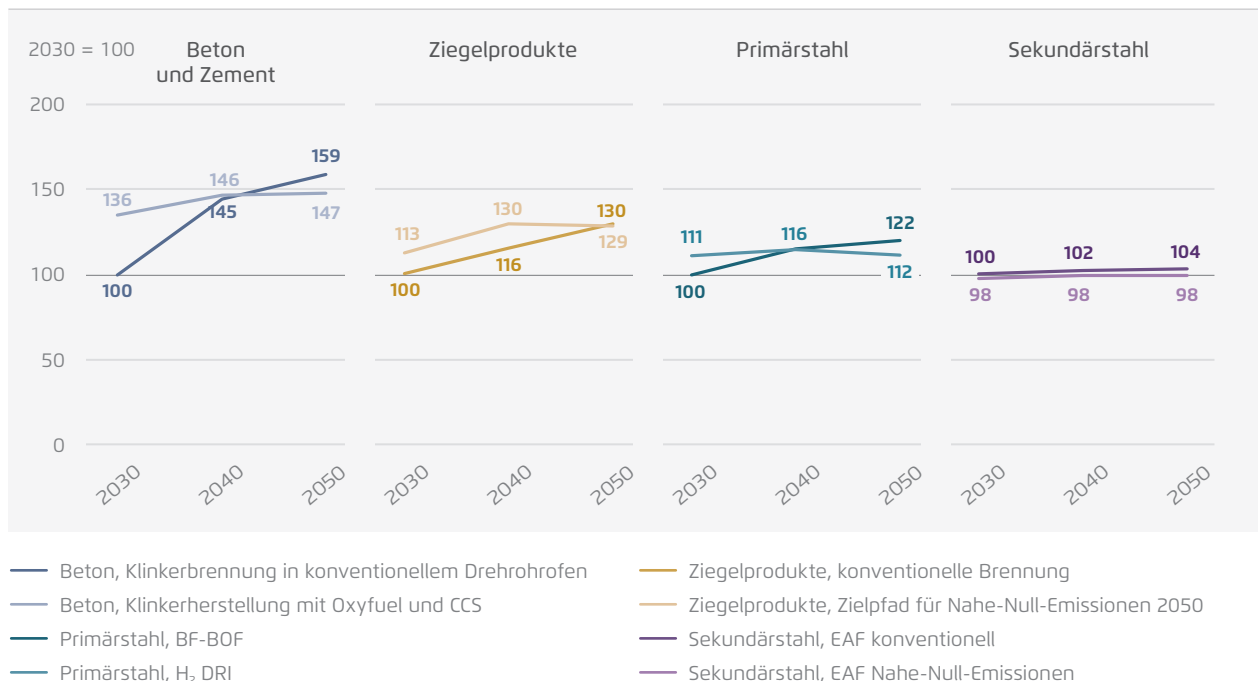
Diese Maßnahmen berücksichtigt das Optimierungsszenario TRANSFORM GEB, das im Vergleich die größten Einsparungen im Sinne der Klimaneutralität erzielt (minus 94 Prozent Gesamtemissionen gegenüber 2021). Auch hier verbleiben gewisse Restemissionen durch nicht vermeidbare Prozessemissionen, doch sind diese in diesem Umfang durch technische und natürliche Reduktion realistisch ausgleichbar.

Diese Entwicklung signalisiert, dass es in Zukunft gesteigerte Nachfrage nach klimafreundlichen Materialien geben wird. Damit wird die Grundlage für ein solides, langfristiges Geschäftsmodell für Investitionen in eine klimafreundliche Produktion geschaffen.

Die Studie zeigt, welche Auswirkungen auf die Materialkosten damit einhergehen. Die Analyse konzentriert sich einerseits auf die Kosten der wichtigen Baumaterialien Beton, Stahl und Ziegel, die in großen Mengen verwendet werden (Abbildung D). Andererseits werden auch die Kosten für

Geschätzte Kosten für die Herstellung wichtiger Baumaterialien

→ Abb. D



Agora Industrie und Ramboll (2024), siehe Anhang. Indexwerte, in denen der Wert 100 den Kosten des konventionellen Produktionsprozesses im Jahr 2030 widerspiegelt. BF-BOF = Blast Furnace and basic Oxygen Furnace; EAF = Electric Arc Furnace; CCS = Carbon Capture and Storage; DRI = Direct Reduced Iron

den Holzbau analysiert. Bis 2040 ist zu erwarten, dass klimaneutrale oder weitgehend emissionsfreie Materialien zu vergleichbaren Kosten wie herkömmliche Materialien hergestellt werden. Bis 2050 sollen diese Materialien die kosteneffizientere Option sein.

Zum einen werden kohlenstofffreie Produktionstechnologien günstiger: Die Produktionskapazitäten steigen, womit Skaleneffekte und Lernkurven verbunden sind, ebenso werden die CO₂-Infrastruktur sowie erneuerbare Energieträger ausgebaut. Zum anderen verteuert sich die konventionelle Produktion: Der CO₂-Preis steigt, weil Emissionsobergrenzen im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems (ETS) sinken und kostenlose Zuteilungen auslaufen. Dies setzt voraus, dass die Investitionen in kohlenstoffarme Technologien in diesem Jahrzehnt konkretisiert werden. **Leitmärkte können diesen Prozess vorantreiben.**

Da die Kosten für den Einsatz von Grundstoffen an sich nur einen Bruchteil an den Gesamtkosten im Bau ausmachen, würde zumindest kurzfristig die Verwendung von kohlenstoffarmen Materialien die Baukosten nur geringfügig (um ein Prozent) erhöhen. Diese geringen Zusatzkosten sind vergleichbar mit

anderen, nicht-klimabezogenen Ausgaben beim Bau, wie z.B. der Wahl einer anderen Fassade.

Handlungsempfehlungen

Diese Studie empfiehlt als zentrales Instrument eine schrittweise ordnungsrechtliche Einführung von ECE-Anforderungswerten auf Grundlage der Vorgaben der EPBD, der positiven Erfahrungen anderer Länder und der damit einhergehenden Planungssicherheit für die Baustoffindustrie, das Baugewerbe, die Planer:innen sowie die Bauherr:innen (Abbildung E).

Allein wird dieses Leitinstrument den komplexen Transformationsherausforderungen allerdings nicht gerecht. Ergänzend bedarf es weiterer Instrumente, die im Rahmen dieser Studie allerdings nicht vollumfänglich ausgearbeitet wurden.

Dazu zählen unter anderem die Modernisierung des Baurechts, finanzielle Unterstützung, Aus- und Weiterbildungen und die Erstellung einer verbesserten Datengrundlage.

Empfohlener Zeitplan zur Einführung von Anforderungswerten an Embodied-Carbon-Emissionen

→ Abb. E

	2025	2026	2027	2028	2029	ab 2030
EU Vorgaben aus <i>Energy Performance of Buildings Directive</i>	Delegierter Rechtsakt zur Methodenharmonisierung		Nationale Fahrpläne für Grenzwerte für Neubauten	Berechnungs- und Transparenzpflicht für neue Gebäude > 1.000 m ²		Berechnungs- und Transparenzpflicht für alle neuen Gebäude
Deutschland Allgemein	Studie zur Bestimmung der Anforderungswerte	Erarbeitung und Veröffentlichung eines Fahrplans				
Deutschland Neue öffentl. Gebäude und neue Gebäude > 1.000 m ²			Berechnungs- und Transparenzpflicht		Verpflichtende Anforderungswerte	
Deutschland Neue Gebäude < 1.000 m ²			Berechnungs- und Transparenzpflicht			Verpflichtende Anforderungswerte

Agora Industrie, ifeu und Ramboll (2024). *Die EPBD betrachtet Lebenszyklusemissionen, für eine pragmatische Umsetzung bieten sich separate Anforderungen für Embodied-Carbon-Emissionen (ECE) und Betriebsphase an.

1 Embodied-Carbon-Emissionen als Strategie für die Dekarbonisierung

Die Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen (ECE) im Gebäudebereich kann in doppelter Hinsicht einen Beitrag zur Klimaneutralität leisten. Einerseits ist sie eine Schlüsselstrategie, um die Klimaziele sektorübergreifend einzuhalten, weil ECE einen relevanten Anteil an den Gesamtemissionen ausmachen (Kapitel 1.1). Andererseits ist die Errichtung von Gebäuden der zentrale Nachfragesektor von industriellen Grundstoffen, wie Stahl, Zement und Kunststoffen, und kann damit, bei entsprechender Ausgestaltung, eine Leitmarktrolle übernehmen (Kapitel 1.3).

1.1 Einleitung und Definition

Im Lebenszyklus eines Gebäudes (Abbildung 1) entstehen zu verschiedenen Zeitpunkten Treibhausgasemissionen. Diese können ganzheitlich mit einer Lebenszyklusanalyse erfasst werden. Betrachtet man die gesamte Wertschöpfungskette, beziehungsweise den gesamten Lebenszyklus², so sind Gebäude in Deutschland für rund 40 Prozent der deutschen THG-Emissionen verantwortlich. Zusätzlich ergeben sich durch Importe von Baustoffen indirekte, vorgelegerte THG-Emissionen im Ausland (Schubert et al., 2023).

Der Betrieb von Gebäuden, also der (direkte) Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser, verursacht in Summe rund 15 Prozent der THG-Emissionen (Schubert et al., 2023).³ Diese THG-Emissionen werden nach dem Klimaschutzgesetz (KSG) dem Gebäudesektor zugeordnet und werden – wenn auch angesichts mehrfach verfehlter Sektorziele nicht

ausreichend – bereits durch politische, planerische und technische Maßnahmen bearbeitet (Expertenrat für Klimafragen, 2023).

Der restliche Anteil entsteht „indirekt“ in anderen Sektoren, allen voran der Industrie mit der Herstellung von Baustoffen und der Errichtung von Gebäuden. Der industrielle Sektor war 2023 für 23 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich (UBA, 2024a). Davon entfallen rund 30 Prozent auf die Herstellung von Stahl, 10 Prozent auf Zement und Beton sowie weitere 10 Prozent auf die Kunststoffherstellung (Agora Industrie und Systemiq, 2023). 28 Prozent des Stahls, 79 Prozent des Zements und Betons sowie 24 Prozent der Kunststoffe werden für den (Neu-)Bau und die Sanierung von Gebäuden verbraucht (Agora Industrie und Systemiq, 2023) (Abbildung 7). Die THG-Emissionen, die bei der Herstellung, der Konstruktion, dem Transport und dem Abriss von Gebäuden sowie der Entsorgung von Baustoffen – also materialbedingt – entstehen, belaufen sich für Deutschland je nach Betrachtungsweise auf 29 bis 73 Millionen Tonnen CO₂-Äq.⁴

Betrachtet man das Einzelgebäude, wird zudem klar, dass bei aktuellen Neubauten diese materialbedingten Emissionen 50 bis 90 Prozent der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus ausmachen (Röck et al., 2020). Die Relevanz der materialbedingten THG-Emissionen wird zusätzlich durch die Tatsache verdeutlicht, dass etwa zwei Drittel davon

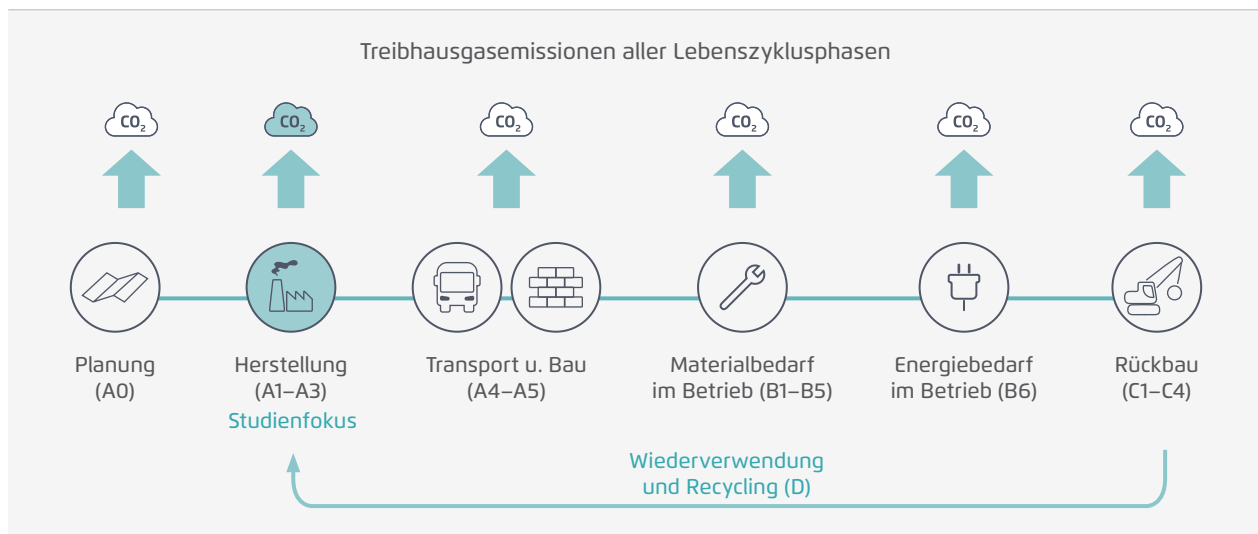
² Im Englischen oftmals *Whole Life Carbon* (WLC).

³ Diese THG-Emissionen werden nach dem Klimaschutzgesetz (KSG) dem Gebäudesektor zugeordnet.

⁴ Die kleinere Zahl wurde aus dem Gewichtsanteil von Stahl, Beton/Zement und Kunststoffen hergeleitet, der im Gebäudebereich eingesetzt wird (Rheude und Röder, 2022). Die größere Zahl umfasst alle Baustoffe sowie die Baustoffproduktion im Ausland und beruht methodisch auf Input-Output-Tabellen, nationalen Statistiken und Ökobilanzdaten (Schubert et al., 2023). Beide Werte aus den genannten Studien wurden auf die THG-Emissionsanteile aus 2023 – unter der Annahme konstant bleibender Anteile – umgerechnet (UBA, 2024a). Für die ausländischen THG-Anteile wurden die gleichen Dekarbonisierungsraten angenommen wie in Deutschland.

Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus von Gebäuden*

→ Abb. 1



Agora Industrie und ifeu (2024). * nach DIN EN 15978

bereits vor der Gebäudenutzung, nämlich für die Herstellung und Errichtung, anfallen und somit das Emissionsprofil von Neubauten zumindest über die nächsten 30 Jahre dominieren. Dies entspricht jenem Zeitraum, der kritisch für effektive Klimawandelabschwächung ist (Röck et al., 2020).

In dieser Studie wird der Begriff Embodied-Carbon-Emissionen (ECE) für die THG-Emissionen aus den Lebenszyklusphasen der Herstellung – Rohstoffbereitstellung (A1), Transport (A2) und Produktherstellung (A3) – verwendet⁵ (Abbildung 1).

Der Fokus auf die Herstellungsphase erfolgt aus mehreren Gründen, die im Vorschlag für ECE-Anforderungswerte in Kapitel 5.1 hergeleitet werden:

→ **Größter Anteil:** Es werden damit rund 75 Prozent der Embodied-Carbon-Emissionen eines Gebäudes berücksichtigt (Abbildung 2).

→ **Größte Einflussmöglichkeit** durch Planende: Sie sind die zeitlich kritischsten Lebenszyklusphasen, weil die Emissionen direkt heute freigesetzt werden (Abbildung 2).

→ **Mehr Sicherheit:** Die Auswirkungen der späteren Lebenszyklusphasen, wie zum Beispiel Austausch (B4), *End-of-Life* (C) und Gutschriften (D), entstehen aufgrund der langen Lebensdauer von Bauteilen und Gebäuden erst langfristig. Die Berechnung dieser THG-Emissionen ist somit mit großen Unsicherheiten behaftet, weil die Herstellung von Ersatzprodukten, zum Beispiel neuen Fassadenbekleidungen, in Zukunft klimafreundlicher erfolgen wird als heute.

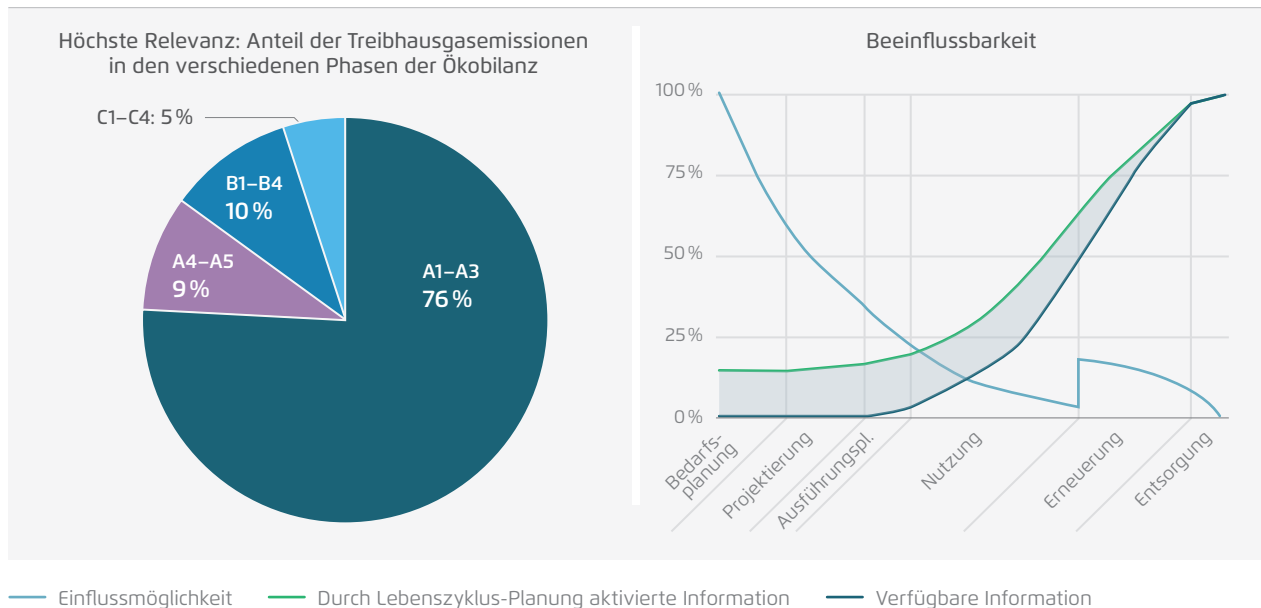
Schwerpunktmäßig befasst sich die Studie mit **Neubauten (Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser und Büros)**, da diese einen hohen Anteil der Emissionsintensität des gesamten Baugewerbes und der Bautätigkeit⁶ ausmachen und der Anwendungsbereich der künftigen EPBD-Anforderungen gegeben ist (Destatis, 2023) (Kapitel 2.1.1).

⁵ Alle THG-Emissionen, die nicht durch den Energiebedarf im Gebäudebetrieb entstehen, werden in der Literatur und im Planungsalltag durch verschiedene Begriffe mit unterschiedlichen Betrachtungsrahmen zusammengefasst (Embodied-Carbon-Emissionen, Graue Energie, verkörperte Emissionen, *Embodied Carbon*, etc.).

⁶ Durchschnittlich 150.000 neu errichtete Gebäude (Nichtwohn- und Wohngebäude) pro Jahr in Deutschland (Destatis, 2023).

Relevanz und Beeinflussbarkeit der Herstellungphase im Lebenszyklus von Gebäuden

→ Abb. 2



Agora Industrie (2024) basierend auf Ramboll, BPIE, KU Leuven (2023) (linke Abb.) und König, Kohler, Kreißig, Lützkendorf (2009) (rechte Abb.)

1.2 Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen als Schlüsselstrategie für die Klimaziele

Das Klimaschutzgesetz der Bundesregierung schreibt eine schrittweise Emissionsreduktion bis 2030 und 2040 vor, bevor 2045 Treibhausgasneutralität in der deutschen Wirtschaft erreicht werden soll.⁷ Mittels des festgelegten Gesamtemissionsbudgets für Deutschland soll die maximale Menge an in die Atmosphäre freigesetzten Treibhausgasen limitiert werden, um gesetzte Klimaziele zu erreichen. Im Falle der Überschreitung des Budgets sinkt dementsprechend die Wahrscheinlichkeit, die angestrebten Ziele im gesetzten Zeitrahmen zu erreichen, und die Risiken für schwerwiegende Folgen des Klimawandels steigen.

Die Anwendung des Klimaschutzgesetzes erfordert, dass die Emissionen aus dem Neubau von Gebäuden unverzüglich erheblich reduziert werden müssen.

Diese Studie berechnet ein **Emissionsbudget⁸ für ECE im Gebäudesektor zur Erreichung der Treibhausgasneutralität 2045**. Dafür nehmen wir an, dass die Emissionen im Gebäudeneubau – entsprechend dem Anteil an den deutschen Gesamtemissionen – gemindert werden sollten. Diese Herunterskalierung des nationalen Emissionspfads auf materialbezogene Emissionen aus dem aus dem Neubau von Gebäuden – hier mit dem englischen Begriff *Downscaling* bezeichnet – erfordert die Anwendung von speziellen Skalierungsmethoden.

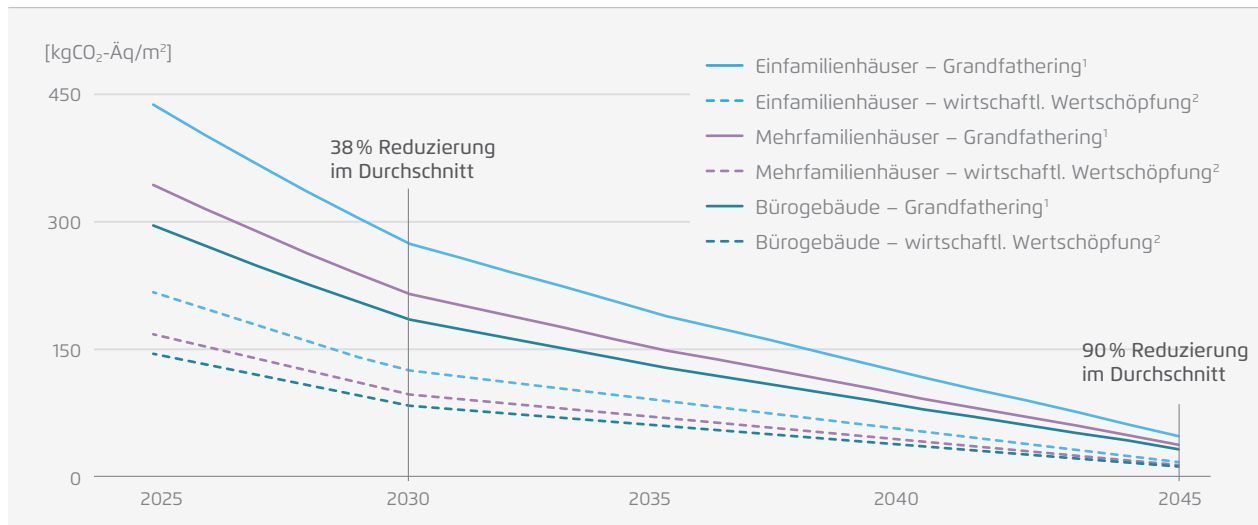
In der nachfolgenden Skalierungsmethodenbetrachtung ergibt sich, dass **unabhängig von der gewählten Downscaling-Methode der Reduktionspfad bis 2030 sehr steil verlaufen wird**. Die erwartete Zunahme der Bau- und der Renovierungsaktivität führt dazu, dass

⁷ Im Vergleich zu 1990 soll Deutschland bis 2030 eine Nettoemissionsreduktion von 65 Prozent und bis 2040 von 88 Prozent erreichen.

⁸ Ein Emissionsbudget beschreibt die maximal zulässige Menge an Treibhausgasen, die in die Atmosphäre freigesetzt werden darf, um die Erderwärmung auf ein bestimmtes Ziel, wie zum Beispiel im Klimaschutzgesetz oder im Pariser Abkommen definiert, zu begrenzen. Überschreiten wir dieses Budget, sinkt die Wahrscheinlichkeit, das Ziel zu erreichen, und die Risiken für schwerwiegende Klimaauswirkungen steigen erheblich.

Zielpfade zur Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen basierend auf dem Klimaschutzgesetz

→ Abb. 3



Agora Industrie, ifeu und Ramboll (2024). Werte siehe Tabelle 8 im Anhang. ¹Beim Grandfathering als Downscaling-Strategie wird das verbleibende Emissionsbudget anhand historischer oder aktueller Emissionswerte auf die Sektoren verteilt. ²Die wirtschaftliche Wertschöpfung bestimmt das verbleibende Emissionsbudget auf Grundlage der gesamten Bruttowertschöpfung jedes Sektors und seines Anteils an der gesamten Wirtschaftstätigkeit.

weniger Emissionen pro Quadratmeter entstehen können. Von 2030 bis 2040 verlangsamt sich damit jedoch die Reduktionsgeschwindigkeit (Abbildung 3).

In dieser Studie kombinieren wir Elemente von zwei *Downscaling*-Methoden, um den angemessenen Anteil der Emissionen des Bausektors an den national zulässigen Gesamtemissionen zu bestimmen. Die am weitesten verbreiteten *Downscaling*-Methoden sind *Grandfathering* und wirtschaftliche Wertschöpfung. Beide Methoden treffen normative Urteile über zukünftige Emissionen, wobei die jeweilige Perspektive zusätzliche Informationen zur Diskussion über das erforderliche Ambitionsniveau für die Reduktion von ECE liefert. Beim *Grandfathering* wird das verbleibende Emissionsbudget anhand historischer oder aktueller Emissionswerte auf die Sektoren verteilt. Kohlenstoffintensive Industrien erhalten somit einen höheren Anteil am künftigen Emissionsbudget. Die wirtschaftliche Wertschöpfung bestimmt das verbleibende Emissionsbudget auf der Grundlage der gesamten Bruttowertschöpfung jedes Sektors und seines Anteils an der gesamten Wirtschaftstätigkeit. Industrien mit hoher Wertschöpfung dürften demnach künftig mehr Emissionen ausstoßen, um den Wohlstand aufrechtzuerhalten.

Zur weiteren Definition eines Reduktionspfads werden Daten betrachtet, die es ermöglichen, die Emissionen des Bausektors zu bereinigen. Hierzu werden Emissionen von Baumaterialien herausgerechnet, die für Gebäudetypen und Lebenszyklusphasen anfallen. Diese Daten werden aber nicht konsistent erhoben und sind oft entweder nur aus unterschiedlichen Quellen wie der aktuellen Emissionsberichterstattung oder in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung als Wertschöpfungsanteil verfügbar. Daher ist ein Mix aus den beiden Ansätzen notwendig. Weitere Einzelheiten zur Methodik finden sich im Anhang.

Abbildung 3 zeigt den quantifizierten Reduktionspfad für ECE gemäß dem Ambitionsniveau des Klimaschutzgesetzes. Die resultierenden THG-Emissionen je Gebäudetyp, ausgedrückt in kg CO₂-Äq/m², sind in den jeweiligen Tabellen erfasst. *Grandfathering* führt zu einer größeren Menge an Emissionen, die dem Bauwesen zugewiesen werden, da kohlenstoffintensive Materialien wichtige Inputs sind. Im Gegensatz dazu ist die Menge bei der wirtschaftlichen Wertschöpfung geringer und folglich ergibt sich beim zweiten Ansatz ein geringerer Anteil.

Die entwickelten Pfade verlangen erhebliche Reduktionen der Treibhausgasemissionen pro Quadratmeter, konkret eine Reduktion um etwa 38 Prozent bis 2030 und eine Reduktion um 90 Prozent bis 2045 im Vergleich zu 2025. Bis 2045 wird jedoch nicht verlangt, dass die Pfade null kg CO₂-Äq/m² erreichen, da der Industriesektor weiterhin für Emissionen verantwortlich sein wird, die mithilfe von Technologien zur Kohlenstoffabscheidung verringert werden müssen.

1.3 Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen als Antrieb für grüne Leitmärkte

1.3.1 Grüne Leitmärkte als Motor des industriellen Wandels

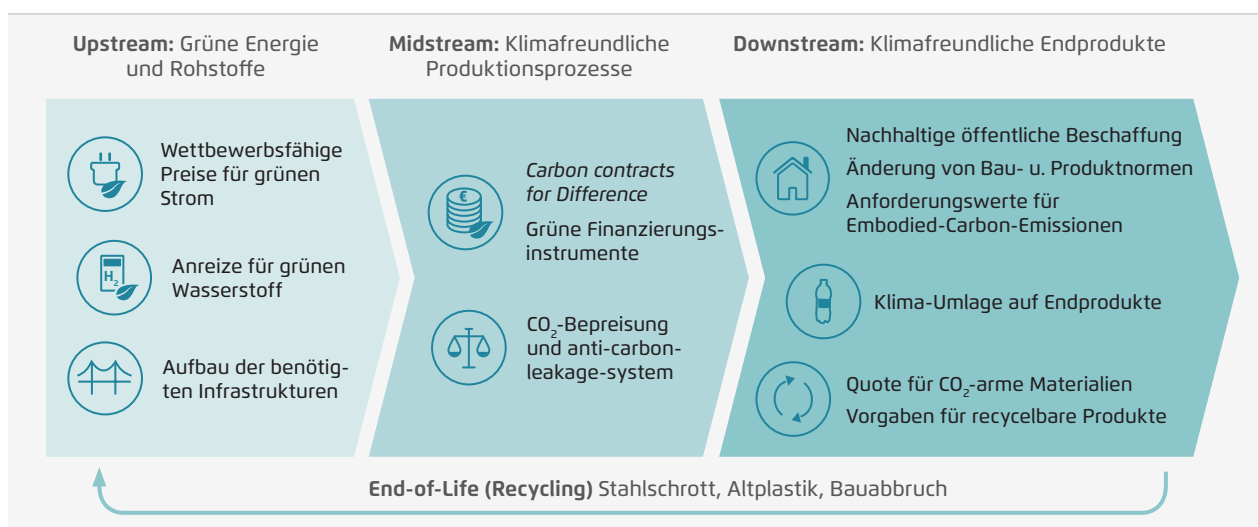
Die Transformation der Grundstoffindustrie hin zu Klimaneutralität muss entlang der gesamten industriellen Wertschöpfungskette erfolgen.

Dies schließt den Aufbau der Infrastruktur, die Umstellung der Produktion (Upstream und Midstream) wie auch die Schaffung von Nachfrage nach klimafreundlichen Grundstoffen und Endprodukten über Leitmärkte ein (Downstream) (Abbildung 4).

Auf der Seite der Materialproduktion hat die neueste umfassende Überarbeitung des europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS I) und die Einführung eines CO₂-Grenzausgleichssystems (*Carbon Border Adjustment Mechanism*, CBAM) einen klaren Weg und ein Ziel für die Dekarbonisierung der europäischen Schwerindustrie vorgegeben. Auf der Grundlage des überarbeiteten Emissionsminderungspfads werden im Rahmen des EU-ETS I bis 2039 keine neuen Emissionszertifikate mehr vergeben. Letztendlich bedeutet dies, dass die energieintensiven Industrien, die für die Herstellung der europäischen Grundstoffe verantwortlich sind, sicherstellen müssen, dass ihre Prozesse bis zu diesem Zeitpunkt netto keine Emissionen mehr erzeugen. Die Dringlichkeit dieser Transformation wird zusätzlich verstärkt, wenn – nach der Einführung des CBAM – die kostenlosen Zertifikate für Schlüsselindustrien wie Stahl, Grundstoffchemie, Zement und Aluminium zwischen 2026 und 2034 auslaufen. Darüber hinaus haben die CO₂-Preise im vergangenen Jahr historische Höchststände erreicht und liegen bei etwa 80–90 Euro pro Tonne Kohlendioxid (t CO₂). Es wird erwartet, dass die Preise bis 2030 auf etwa 130 EUR/t CO₂ steigen werden (IEA, 2023).

Politikinstrumente für die Industrietransformation entlang der gesamten Wertschöpfungskette

→ Abb. 4



Allerdings ist die bisherige CO₂-Bepreisung eingeschränkt, wenn es darum geht, das Angebot von und die Nachfrage nach klimafreundlichen Materialien zu steigern.

So gibt es nach wie vor fehlleitende Anreize im Bausektor, da sich der CO₂-Preis häufig nicht in den frühen Planungs- und Konzeptionsphasen beim Bau neuer Gebäude wiederfindet und somit klimafreundliche Materialien nicht bevorzugt verwendet werden. Die Grenzkosten der Emissionsminderung, zu denen klimafreundliche Materialien im Vergleich zu ihren mit konventionellen Technologien hergestellten Materialien wettbewerbsfähig sind, entsprechen in vielen Fällen noch nicht den bestehenden CO₂-Preisen im EU-ETS I (siehe zum Beispiel Agora Energiewende, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut, 2021). Aufgrund dessen sind eben solche klimafreundlichen Grundstoffe typischerweise mit gewissen anfänglich höheren Kosten verbunden – die sogenannte grüne Prämie. Für Produkte, die auf hart umkämpften Rohstoffmärkten wie dem für Beton verkauft werden, können derartige zusätzliche Kosten die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Verbraucher:innenmarkt erheblich beeinträchtigen.

Zudem können CO₂-Preise schwanken und tun das auch tatsächlich. Bei niedrigen Investitionskosten oder auf Märkten mit niedrigen Eintrittsbarrieren ist dies nicht unbedingt ein großes Problem. Der Einstieg in klimafreundliche Technologien in der Grundstoffindustrie ist jedoch oft sehr kapitalintensiv und bringt Infrastrukturkosten mit sich, die für die Versorgung mit erneuerbarem Wasserstoff und Strom oder für die CO₂-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung erforderlich sind. Angesichts des Umfangs dieser Investitionen sind Investor:innen mit gewissen Risiken konfrontiert, wenn die CO₂-Preise zu niedrig sind und über lange Amortisationszeiträume schwanken.

Die Klimaschutzverträge (*Carbon Contracts for Difference*, CCfDs) des BMWK können die Wettbewerbsfähigkeit der klimafreundlichen gegenüber der konventionellen Produktion sichern, indem sie die Mehrkosten der klimafreundlichen Produktion tragen, solange diese noch nicht am Markt erzielt

werden können (Abbildung 5). CCfDs können so dazu beitragen, Investitionssicherheit für Unternehmen zu schaffen und die Transformation frühzeitiger anzustoßen.

Eine wesentliche Grundlage für die Etablierung eines dekarbonisierten Industriesektors ist eine marktgesteuerte Nachfrage nach Endprodukten, die aus emissionsarmen und kreislauffähigen Materialien hergestellt werden.

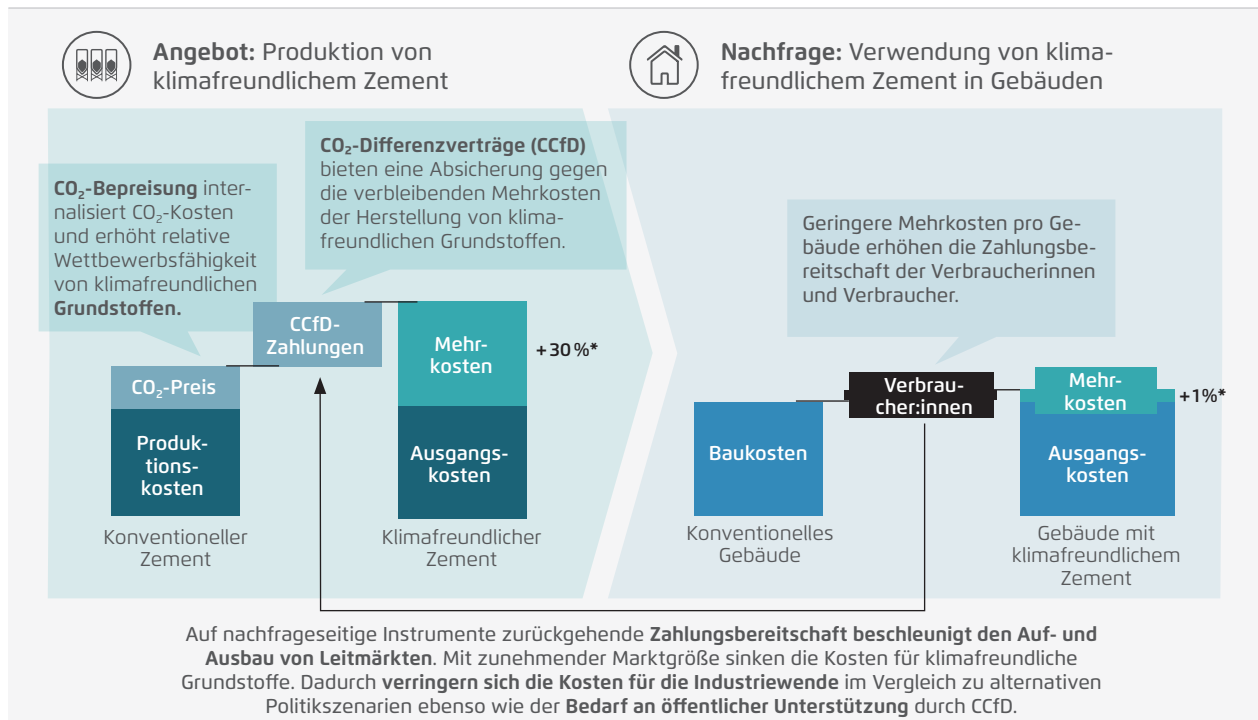
Damit die Hersteller in klimaneutrale Produktionsprozesse investieren, muss es eine Nachfrage und die Bereitschaft geben, für diese neuen (und oft teureren) Produkte zu zahlen. Solche Nachfrage ist für die Gesamtstrategie der Industrietransformation von entscheidender Bedeutung: Richtig umgesetzt kann sie wirtschaftliche Anreize für eine höhere Materialeffizienz in der Herstellung und Verarbeitung sowie den verstärkten Einsatz von Kreislaufmaterialien schaffen und den oft fehlenden wirtschaftlichen Anreiz für große Investitionen in die Produktion von klimaneutralen Materialien liefern.

Dies reduziert wiederum den Bedarf an zukünftiger Finanzierung des Übergangs zu einer klimafreundlichen Zement- oder Stahlproduktion durch CCfDs oder andere Subventionen (Vogl et al., 2021) (Abbildung 5). Dadurch wird nicht nur der Anteil der Transformationskosten verringert, der auf den öffentlichen Haushalt entfällt, sondern es sinken auch die Gesamtkosten der Transformation. Der Grund dafür ist intuitiv: Investitionen in einen Markt mit robuster und wachsender Verbraucher:innennachfrage sind wirtschaftlich sinnvoller und bergen ein geringeres Risiko, sodass weniger kostspielige öffentliche Subventionen erforderlich sind. Je schneller sich der Markt entwickelt und eine Lernkurve mit klimafreundlicher Produktion entsteht, desto schneller sollten Kostensenkungen eintreten.

Die Notwendigkeit der Entwicklung von Leitmärkten wurde auch vom BMWK erkannt. Das BMWK veranlasste 2023 eine interaktive Stakeholder:innenanalyse zum Thema Leitmärkte. Als Folge dieses Dialogs kündigte der deutsche Stahlverband Wirtschaftsvereinigung (WV) Stahl im April 2024 die

Komplementarität der Instrumente auf der Nachfrage- und Angebotsseite zur Schaffung eines grünen Leitmarktes für kohlenstoffarmen Zement

→ Abb. 5



Agora Industrie (2024) basierend auf Agora Industrie (2022) und ETC (2018). *Die endgültigen Mehrkosten können variieren, je nachdem, wie hoch Kostenfaktoren wie CO₂- oder Strompreise ausfallen.

Einführung eines Labels namens *Low Emission Steel Standard* (LESS) an, das vom BMWK unterstützt wird (WV Stahl, 2024). Im Nachgang zu diesen Prozessen veröffentlichte das BMWK im Mai 2024 sein Konzeptpapier zu Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe. Ein besonderer Schwerpunkt des Papiers liegt auf den Vorschlägen des Ministeriums zu Labels für Stahl, Zement und Basischemikalien. Das Ministerium fördert dabei auch andere Bestrebungen aus der Industrie, Labels voranzutreiben, darunter des Kunststoffrohrverbands (BMWK, 2024a).

1.3.2 Der Bausektor als Vorreiter

Die Analyse von Agora Industrie (2024) zeigt, dass der Bausektor das Potenzial besitzt, eine Vorreiterrolle einzunehmen, um einen Markt für emissionsarme und kreislauffähige Baumaterialien zu etablieren und zu erweitern (Abbildung 6).

Neben dem Infrastruktur-, Automobil- und Verpackungsssektor hat der Bausektor aufgrund von drei Hauptfaktoren großes Potenzial als Leitmarkt für klimafreundliche Baumaterialien: (1) der Kombination aus hoher Grundstoffintensität, (2) begrenzten Mehrkosten für Materialien und (3) einer mittleren Zahlungsbereitschaft der Konsumentinnen und Konsumenten (Abbildung 6) (Agora Industrie, 2024).

Der Gebäudesektor ist einer der größten Nachfragesektoren nach konventionellen Grundstoffen und damit eine Hauptquelle für materialbezogene CO₂-Emissionen (Abbildung 7). Kapitel 2.1.3 gibt einen Überblick über die derzeit verwendeten Baumaterialien.

Während die zusätzlichen Materialkosten bei weitgehend emissionsfreien Materialien anfangs wahrscheinlich höher sind, entsprechen diese Kosten einem vergleichsweise kleinen Teil der Gesamtkosten auf der Ebene des Gebäudes (Abbildung 5).

Analyse des Potenzials der Endverbrauchssektoren für die Schaffung von Leitmärkten

→ Abb. 6

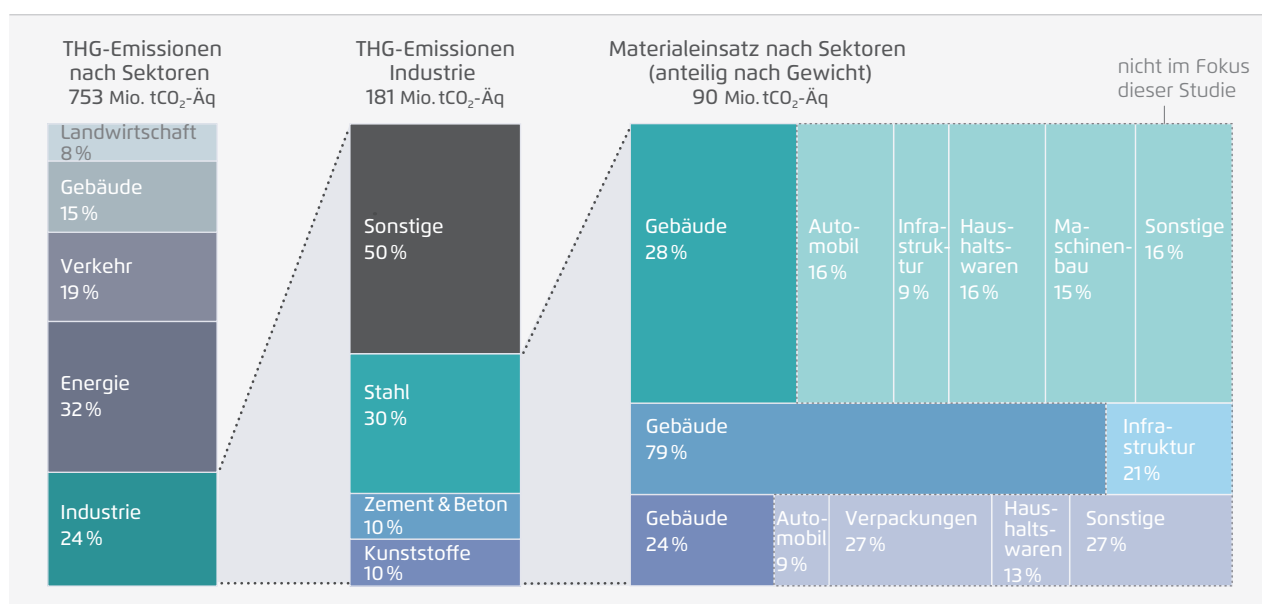
	Gebäude und Infrastruktur	Automobil	Schifftransport	Verpackung	Haushaltsgeräte
Anteil des Grundstoffs im Endprodukt					
Einfluss der Grundstoffkosten auf den Wert des Endprodukts			Keine Daten verfügbar		Keine Daten verfügbar
Zahlungsbereitschaft der Verbraucherinnen und Verbraucher					

- **Hohe Eignung für den Aufbau von Leitmärkten.** Anteil an EU-weiter Grundstoffnachfrage: mindestens 20 % des Verbrauchs an mindestens einem Grundstoff (Volumen pro Gewicht und Jahr). Einfluss von Grundstoffkosten auf Wert des Endprodukts: weniger als 3 %. Zahlungsbereitschaft: hoch (über 50 % der Verbraucher:innen geben in umfragebasierten Analysen an, sie würden einen Preisaufschlag zahlen).
- **Mittlere Eignung für den Aufbau von Leitmärkten.** Anteil an EU-weiter Grundstoffnachfrage: mindestens 10 % des Verbrauchs an mindestens einem Grundstoff (Volumen pro Gewicht und Jahr). Einfluss von Grundstoffkosten auf Wert des Endprodukts: 5–10 %. Zahlungsbereitschaft: mittel (bis zu 50 % der Verbraucher:innen geben in umfragebasierten Analysen an, sie würden einen Preisaufschlag zahlen).
- **Geringe Eignung für den Aufbau von Leitmärkten.** Anteil an EU-weiter Grundstoffnachfrage: unter 10 % des Verbrauchs an mindestens einem Grundstoff (Volumen pro Gewicht und Jahr). Einfluss von Grundstoffkosten auf Wert des Endprodukts: über 10 %. Zahlungsbereitschaft: gering (bis zu 25 % der Verbraucher:innen geben in umfragebasierten Analysen an, sie würden einen Preisaufschlag zahlen).

Agora Industrie (2024) basierend auf Eurofer (2023), Cembureau (2023), CRU (2022), Plastics Europe (2023), Accenture (2019), Ecorys SCS Group (2009), ETC (2018), UNFCCC (2023), SBTi (2023) und Sandbag (2024), BCG (2023), BCG (2022), Statista (2023)

Gebäude als Hauptverwendungssektor energieintensiver Grundstoffe in Deutschland, 2021

→ Abb. 7



Agora Industrie und Systemiq (2023), Umweltbundesamt (2022a), Mission Possible Partnership (2022). THG-Emissionen nach Sektoren beziehen sich auf die Betriebsemissionen. THG-Emissionen in den Nachfragesektoren beziehen sich auf die durch den Materialeinsatz bedingten Industrie-emissionen („eingebettete Emissionen“).

Unsere Analyse (Kapitel 3.2) zeigt, dass der Bau eines Hauses mit emissionsarmen Baumaterialien die Gesamtbaukosten um rund ein Prozent erhöht. Allerdings werden die Kosten für weitgehend emissionsfreie Materialien mit der Zeit und unter Berücksichtigung der Planungshorizonte für 2040 und 2050 die kosteneffektive Wahl sein, auch wenn sie heute noch teurer sind.

Vor dem Hintergrund dieses vergleichsweise geringen Kostenanstiegs sind einige Verbraucher:innen möglicherweise eher bereit, die damit verbundene Umweltprämie zu zahlen. Die meisten Einschätzungen zur Zahlungsbereitschaft der Konsumenten und Konsumentinnen beruhen auf Umfragen. Für das Baugewerbe geben rund 30 Prozent der Teilnehmenden einer deutschen Umfrage an, dass sie bereit wären, eine Nachhaltigkeitsprämie zu zahlen (Statista, 2023).

In der Bauindustrie gibt es bereits Vorreiter, die dazu beitragen, die Nachfrage nach klimafreundlichen Baumaterialien zu fördern. Diese Zusicherungen sind zwar ein bemerkenswerter Schritt, **erreichen aber nicht** das Ausmaß der Investitionen, das erforderlich

ist, um die Industrie bis 2045 klimaneutral zu machen (CISL und Agora Energiewende, 2021; Agora Industrie, 2024).

Das Bestreben des Bausektors, die Embodied-Carbon-Emissionen zu reduzieren, kurbelt die Nachfrage nach emissionsarmen, zirkulären Materialien an. Dieser Trend schafft Anreize für Investitionen in Technologien für klimaneutrale Baumaterialien und fördert Innovationen und neue wirtschaftliche Möglichkeiten im Bereich des nachhaltigen Bauens.

Für die Minderung von Embodied-Carbon-Emissionen im Gebäudeneubau und die Erschließung von Leitmärkten für klimafreundlich produzierte Baustoffe bedarf es **eines komplementären Ansatzes aus Instrumenten auf der Angebots- (Grundstoff-/Baustoffindustrie) und der Nachfrageseite (Bauherr:innen, Planer:innen, Bauindustrie, verarbeitendes Gewerbe)** (Kapitel 5). Damit wird den Herausforderungen entlang der Wertschöpfungskette – *upstream* bis *downstream* – am besten begegnet und es werden zielgerichtet sowie zielgruppenspezifisch Transformationsanreize gesetzt.

2 Embodied-Carbon-Emissionen in Gebäuden und Dekarbonisierungsoptionen

Entsprechend dem klimapolitischen Handlungsdruck und den industriepolitischen Chancen müssen die ECE zukünftig reduziert werden. Dazu sind zunächst die Fragen zu klären, wie viele ECE jährlich im Gebäudesektor in Deutschland entstehen (Kapitel 2.1). Dies hängt von mehreren Faktoren ab. Der entscheidende Faktor ist dabei die Frage, wie viel und welche Art von Wohn- und Nichtwohngebäuden gebaut werden (Kapitel 2.1.1). Die grundlegende Bauweise, also das überwiegend für die Tragstruktur verwendete Baumaterial, beeinflusst die beim Bau entstehenden Emissionen ebenfalls grundlegend (Kapitel 2.1.2). Die Produktion der verwendeten Baustoffe beziehungsweise -materialien und deren Dekarbonisierungsfortschritt sind die angebots- beziehungsweise industrieseitige Stellschraube hinsichtlich der ECE (Kapitel 2.1.3). Entlang dieser Fragestellungen leiten sich auch die breiten und wechselwirkenden Minimierungsansätze ab (Kapitel 2.2).

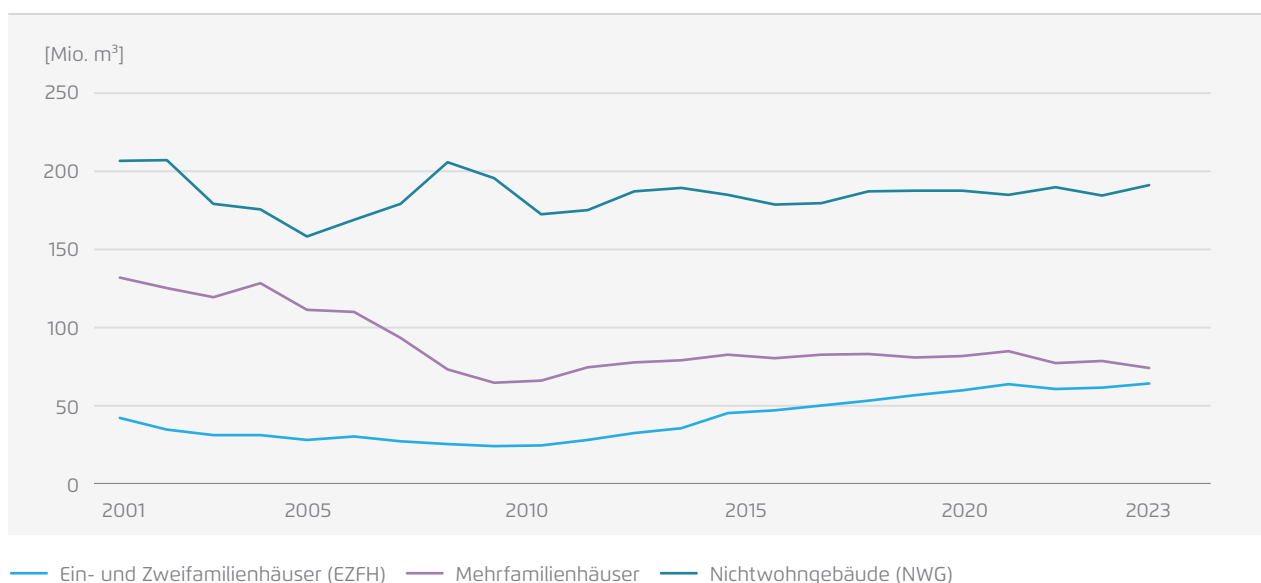
2.1 Status quo Embodied-Carbon-Emissionen in Gebäuden

2.1.1 Wie viele und welche Gebäude werden gebaut?

Jeder neu entstehende Quadratmeter oder Kubikmeter umbauter Raum verursacht heute noch zwangsläufig ECE. Bereits der benötigte oder gewählte Gebäudetyp hat einen Einfluss auf die entstehenden THG-Emissionen in der Herstellungsphase. Dies ergibt sich aus den unterschiedlichen an die jeweilige Nutzung gestellten Anforderungen. So verursachen Nichtwohngebäude, wie zum Beispiel Labor- oder Bürogebäude, in der Tendenz – unter anderem aufgrund höherer technischer und statischer Anforderungen – mehr ECE als zum Beispiel Mehrfamilienhäuser (Röck et al., 2022) (Kapitel 3.1.1).

Jährlicher Neubau je Gebäudetyp in Deutschland

→ Abb. 8



Destatis (2024)

Bei Bestandsgebäuden sind die ECE bereits zum Zeitpunkt der Errichtung, also in der Vergangenheit, entstanden und haben daher keine Relevanz für heutige Klimaschutzmaßnahmen. Erst wenn weitere Materialien für den Umbau, eine Erweiterung, Instandhaltungs- oder Sanierungsmaßnahmen von Bestandsgebäuden verbaut werden, entstehen neue THG-Emissionen. Diese liegen aber in der Regel deutlich unter denen von Neubauten, weil die emissionsintensive Tragstruktur bereits vorhanden ist (Zimmermann et al., 2023; Mahler et al., 2019). Deshalb stellt es einen wichtigen Klimaschutzbeitrag dar, wenn vorhandene Gebäude weitergenutzt oder umgebaut werden, statt diese abzureißen und neu zu bauen. So würde eine erneute Herstellung der im deutschen Gebäudebestand heute verbauten Materialien THG-Emissionen in Höhe von rund 6 Milliarden Tonnen CO₂-Äq verursachen (Bundesstiftung Baukultur und Nagel, 2022).

2.1.2 Womit wird gebaut?

Unterschiedliche Baustoffe verursachen unterschiedliche THG-Emissionen bei ihrer Herstellung. Insofern hat die Frage, mit welcher Konstruktionsart (Massivbau oder Leichtbau) beziehungsweise mit welchen Baustoffen überwiegend gebaut wird, großen Einfluss auf die ECE. **Bei allen Gebäudetypen dominieren heute mineralische Bauweisen, zum Beispiel aus Stahlbeton, Ziegel und Kalksandstein (Abbildung 9), wobei deutliche Unterschiede zwischen den Gebäudetypen erkennbar sind.** Durch Verfügbarkeiten, Trends und politische Rahmenbedingungen haben sich hier in der Vergangenheit bereits Verschiebungen ergeben. Zum Beispiel hat die Holzbauquote in den letzten Jahren zugenommen (Destatis, 2022).

Wie sich die ECE eines Gebäudes genau zusammensetzen, also welche Anteile bestimmte Bauteile und Baustoffe haben, lässt sich schwer pauschalisieren. Grundsätzlich gilt jedoch, dass die Materialität und Dimensionierung der Tragstruktur eines Gebäudes dessen Embodied-Carbon-Emissionen prägt (Röck et al., 2022; Mahler et al., 2019; De Wolf, 2017). Mit der Zielsetzung Klimaneutralität und den damit auch

einhergehenden höheren Anforderungen an die Emissionen der Nutzungsphase haben zwei weitere Parameter einen zentralen Einfluss auf die ECE.

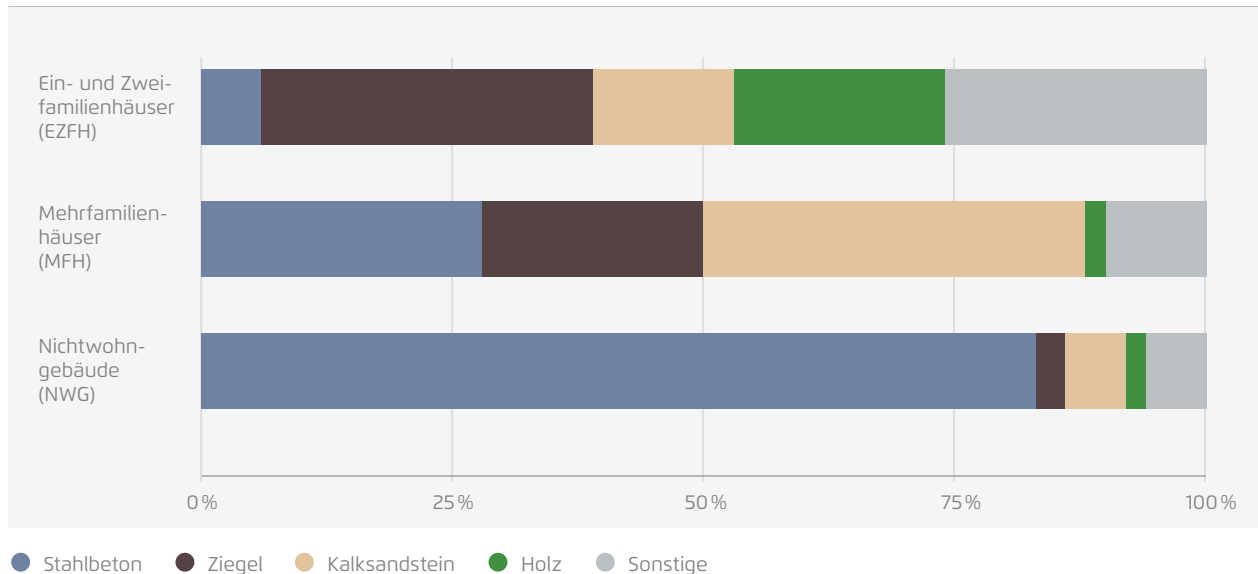
Zum einen geht es dabei um die technische Gebäudeausrüstung (Kapitel 3.3.1). Dazu zählen etwa Heizungen, wie Wärmepumpen und Solarthermie-Anlagen, die Wärmeverteilnetze und Übergabesysteme, wie Fußbodenheizungen und alle elektrischen Anlagen, wie zum Beispiel Aufzüge und Photovoltaik (PV)-Anlagen. Deren Anteil an den ECE über den gesamten Lebenszyklus variiert je nach Gebäudetyp, Effizienzstandard und technischer Ausstattung zwischen 3 und 37 Prozent (Weißenberger, 2016).

Zum anderen wird häufig über Effizienzstandards und damit einhergehende Dämmniveaus oder Dämmstoffdicken diskutiert. Zunächst lässt sich hierzu grundsätzlich festhalten, dass sich höhere Effizienzstandards, also ein niedrigerer Energieverbrauch in der Nutzungsphase, in Summe positiv auf die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus auswirken (Abbildung 10). Je nach Energieniveau ergeben sich unterschiedliche Anteile der nutzungsbedingten und materialbedingten Emissionen. In unsanierten Altbauten beispielsweise ist die Nutzungsphase für deutlich mehr THG-Emissionen verantwortlich als die Herstellung. Je besser der Energiestandard eines Gebäudes, also je höher die Effizienz und geringer der jährliche Energiebedarf ist, desto relevanter wird der Anteil der Herstellung. Im Kontext zunehmend treibhausgasarm versorgter Gebäude gewinnen deshalb ECE stärker an Bedeutung. Die Studienlandschaft zeigt jedoch eindeutig, dass sich die heute diskutierten Effizienzstandards bis hin zum Passivhaus aus einer ganzheitlichen Ökobilanz-Perspektive lohnen (Deurer und Steinbach, o. J.; Röck et al., 2022; Mahler et al., 2019; Reinhardt et al., 2019; König, 2017). Die Mehraufwendungen für höhere Dämmstoffdicken amortisieren sich ökologisch deutlich innerhalb der Nutzungsdauer der Dämmstoffe und Gebäude (Reinhardt et al., 2019).⁹

⁹ Bei dynamischen Betrachtungen (inkl. Dekarbonisierung des Hintergrundsystems) gibt es ggf. andere Ergebnisse. Dennoch ergeben sich andere Umwelteinsparungen (zum Beispiel Bedarf an erneuerbarer Energie).

Anteile verschiedener Hauptbaustoffe nach umbautem Raum je Gebäudetyp im Neubau 2021

→ Abb. 9



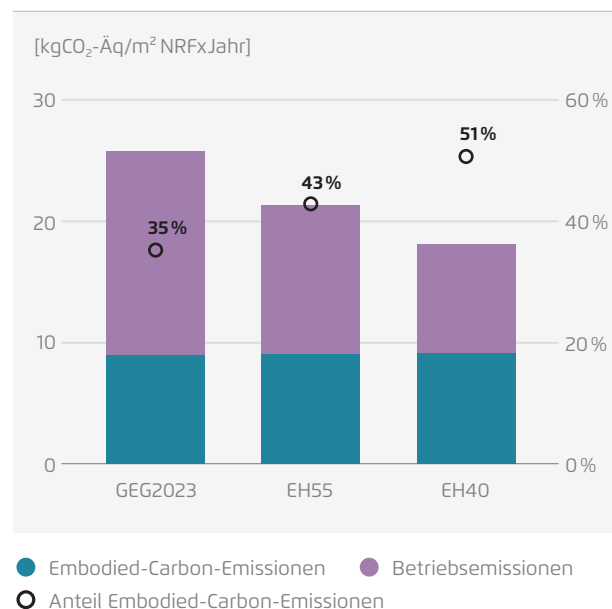
Destatis (2022)

Ein sparsamer Umgang mit Holz ergibt sich auch aufgrund bestehender Nutzungskonkurrenz mit anderen Sektoren. Die Verfügbarkeit von Holz ist bereits heute eingeschränkt. Bereits 2022 wurde von einer globalen Versorgungslücke zwischen 0,1 und 0,7 Milliarden Kubikmetern Holz mit Rinde ausgegangen. Würde die Weltbevölkerung so viel Holz wie Deutschland verbrauchen, würde sich die Lücke auf 8,6 Milliarden Kubikmeter vergrößern (Beck-O'Brien et al., 2022). Die Verfügbarkeit von Holz ist zudem mit großen Unsicherheiten behaftet. Zwar ist mit einer allmählichen Zunahme von Holz im Bauwesen bis 2030 zu rechnen, danach ist die Versorgungslage allerdings unsicher (Agora Industrie und Systemiq, 2023). Besonders bei den Nadelhölzern könnte sich bei weiterhin steigender Nachfrage danach eine potenzielle Knappheit beziehungsweise Versorgungslücke ergeben (Pfeiffer, 2023). Nicht nur deshalb kann das Bauen mit Laubholz zukünftig an Relevanz gewinnen (Merz et al., 2020).

Gleichzeitig stellt der Wald in seiner Funktion als Ökosystem Lebensraum für tausende Arten bereit, ist wesentlicher Bestandteil des Wasserkreislaufes, dient der Naherholung und schützt vor Überhitzung und Immissionen. Zudem wird er in seiner Funktion als Kohlenstoffsенke benötigt, um einen

Embodied-Carbon- und Gesamt-Lebenszyklus-Emissionen verschiedener Effizienzstandards

→ Abb. 10



Agora Industrie und ifeu (2024) basierend auf DUH (2024). Berechnung nach Systematik des Qualitätssiegels Nachhaltige Gebäude (QNG). Auszugsweise Darstellung. Betriebsemissionen: B6.1. Embodied-Carbon-Emissionen: A1–A3, B4, C3–C4, Sockelbetrag. Bei einer Dekarbonisierung der Nutzungsphase, die in QNG nicht ausreichend unterstellt wird, sind die Unterschiede zwischen den Varianten nicht so deutlich. Effizientere Gebäude sparen dann aber erneuerbar produzierte Endenergie ein. NRF = Nettonraumfläche nach DIN 277; GEG = Gebäudeenergiegesetz; EH55 = Energieeffizienzhausstandard 55; EH40 = Energieeffizienzhausstandard 40.



Infobox: THG-Bilanz und Verfügbarkeit von Holz und anderen nachwachsenden Baustoffen

Gebäude oder Bauprodukte aus Holz oder anderen nachwachsenden Baustoffen, wie zum Beispiel Stroh, Produkte der Paludikultur, Flachs und Hanf, können Vorteile für die THG-Bilanz eines Gebäudes bieten (Kapitel 3.1.1). Es bedarf hierbei jedoch einer kritischen Prüfung der Art und Herstellung der Produkte sowie der Substitutionswirkung auf Produkt- und Energieebene. Zudem sind für die Beurteilung transparente und vergleichbare Bilanzierungsregeln erforderlich, welche mit der DIN EN 15804 seit März 2022 vorliegen. Die Gesamtemissionen eines Baustoffs oder Bauprodukts, die für das Gesamt-THG-Potenzial herangezogen werden (GWP_{gesamt}), setzen sich demnach aus drei Bestandteilen zusammen: fossile THG-Emissionen (und damit GWP_{fossil}), biogene THG-Emissionen (und damit GWP_{biogen}) und THG-Emissionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderung (und damit GWP_{luluc}). Bei Bauprodukten aus mineralischen Rohstoffen entfällt der Großteil der THG-Emissionen meist auf die Verbrennung fossiler Energieträger und Stoffe beim Herstellungsprozess (GWP_{fossil}). Bei nachwachsenden Rohstoffen überwiegt der biogene Anteil (GWP_{biogen}), wobei dieser in der Herstellungsphase negativ ausgewiesen wird, da die nachwachsenden Rohstoffe während ihres Wachstums Kohlenstoff binden, der im gebundenen Zustand keine Treibhauswirkung entfaltet (Gärtner et al., 2013). Im verbauten Zustand stellen die Baustoffe damit einen Kohlenstoffspeicher dar. Der negative biogene Anteil der Herstellungsphase wird zum Ende des Lebenszyklus (in der C-Phase) in exakt gleicher Höhe als positiver Wert angesetzt, was den Lebenszyklus des Bauprodukts realitätsnah abbildet. Dadurch können biogene Baustoffe hinsichtlich dieser Teilemissionen über den Lebenszyklus als klimaneutral angesehen werden. Dennoch gehen auch bei nachwachsenden Baustoffen fossile THG-Emissionen mit der Herstellung und dem Transport einher, die es zu reduzieren gilt. Nicht nur deshalb empfiehlt sich auch für diese Baustoffe ein überlegter und effizienter Einsatz, der ökobilanziell jeweils zu prüfen ist. Letztendlich werden alle Holzsortimente am Ende des Lebenszyklus energetisch genutzt, weshalb eine vorherige stoffliche Kaskaden-Nutzung Umweltvorteile mit sich bringt (Reinhardt et al., 2019; Gärtner et al., 2013) (Abbildung 11). Dazu braucht es ein sortenrein rückbaubares Design von Holzprodukten, welches durch eine schad- und stofffreie Produktzusammensetzung unterstützt werden kann, sowie eine möglichst lange Verwendung des Holzbaustoffs im Bauwerk (Köppen und Fehrenbach, 2024).

nennenswerten Beitrag zur Kompensation von anderweitigen beziehungsweise nicht vermeidbaren (Rest-)Emissionen zu leisten (Köppen und Fehrenbach, 2024). Daraus ergeben sich eindeutige Handlungsempfehlungen für eine effiziente, nachhaltige und umweltschonende Holznutzung in Deutschland.

2.1.3 Wie werden die Baustoffe beziehungsweise -materialien produziert?

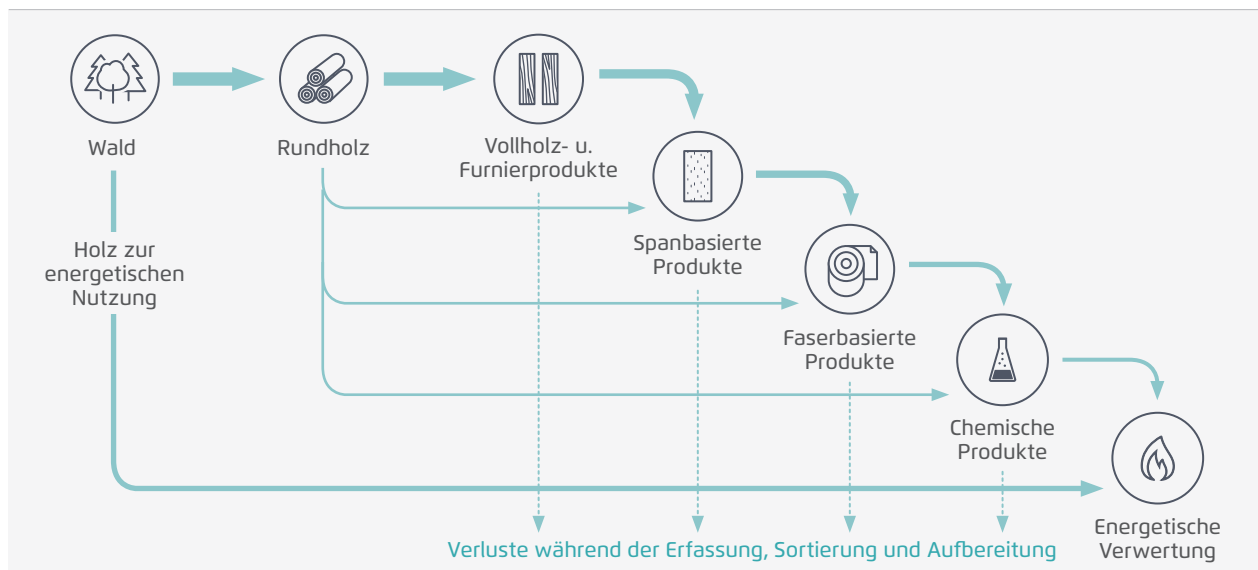
Neben der grundsätzlichen Auswahl der Baustoffe beziehungsweise -materialien hat deren jeweiliger Produktionsweg Einfluss auf die spezifischen Emissionen. So konnten bei einzelnen Materialien durch technologische Verbesserungen bereits

Einsparungen erzielt werden. Die deutsche Zementindustrie hat ihre Emissionen pro Tonne Zement seit 1990 um 21 Prozent reduziert (Schneider et al., 2020). Die Stahlindustrie konnte im selben Zeitraum die spezifischen energiebedingten CO_2 -Emissionen pro Tonne Rohstahl um rund 11 Prozent verringern (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2023). Diese einzelnen Effizienzsteigerungen spiegeln sich aber, unter anderem aufgrund langer Investitionszyklen und unzureichender Vorgaben, bislang noch nicht in absoluten strukturellen Emissionsminderungen wider.

Für die Transformation der Industrie bedarf es großer Investitionen in neue Technologien zur klimaneutralen Herstellung von Baustoffen wie Stahl, Beton, Ziegel und Kalksandstein.

Ökologisch anzustrebende Kaskadennutzung von Holz

→ Abb. 11



Agora Industrie (2024) basierend auf Weidner et al. (2021)

Die gute Nachricht dabei ist, dass die meisten notwendigen Technologien (siehe Kapitel 2.2.3) bereits heute zur Verfügung oder kurz vor der Marktreife stehen (Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019).

2.2 Maßnahmen zur Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen für den Neubau

Zur Reduktion der ECE als Beitrag zur Klimaneutralität bis 2045 stehen vielfältige Maßnahmen zur Verfügung (Abbildung 12). Sie sind an anderer Stelle bereits breit und detailliert diskutiert, weshalb sie an dieser Stelle nur überblicksartig dargestellt werden. Die Maßnahmen haben jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile, Umsetzungspotenziale (heute und zukünftig), Entwicklungsstände (*Technology Readiness Level*, TRL), Skalierbarkeit, weitere Umweltwirkungen und Kosten. Dennoch sind signifikante Emissionsminderungen mit diesen Maßnahmen bereits heute realisierbar. Fast alle relevanten Stakeholder:innen sind sehr zuversichtlich, was das Potenzial und die Durchführbarkeit derzeit verfügbarer Maßnahmen und klimafreundlicher Lösungen zur Reduktion von ECE angeht (Europäische Kommission, 2024a).

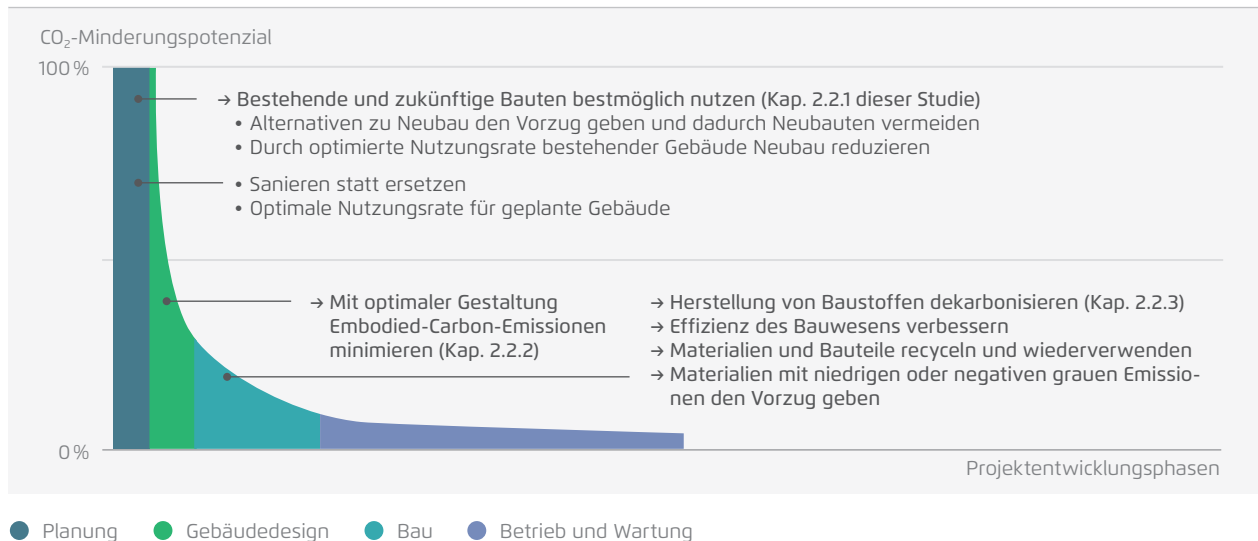
Für die Klimazielerreichung ist es notwendig, dass sowohl die Akteur:innen auf der Angebotsseite – die Baustoff-Industrie – als auch auf der Nachfrageseite – die Planenden und Ausführenden sowie Bauherr:innen – ambitioniert, zeitnah und flächendeckend mindestens einen Großteil der folgenden Dekarbonisierungsmaßnahmen umsetzen oder den für deren zukünftige Umsetzung notwendigen Transformationsprozess jetzt starten.

2.2.1 Weniger und andere Gebäude bauen

Während mit der Errichtung von neuen Gebäuden heute noch inhärent ECE einhergehen, sind diese beim zurückliegenden Bau von Bestandsgebäuden bereits in der Vergangenheit entstanden. Gleichzeitig wird ein Großteil der grauen Emissionen durch das Tragwerk eines Gebäudes verursacht (Röck et al., 2022). Damit stellt eine verlängerte, angepasste oder erweiterte Nutzung von Bestandsgebäuden – als ein Ansatz von Suffizienz im Gebäudebereich – einen zentralen Klimaschutzbeitrag dar und wirkt sich positiv auf weitere Umweltaspekte aus (Zimmermann et al., 2023). So spart eine Komplettisanierung gegenüber einem Mehrfamilienhaus (MFH)-Neubau in Stahlbeton-Massivbauweise rund 50 Prozent

Potenzial für eine Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen in verschiedenen Projektentwicklungsphasen*

→ Abb. 12



Agora Industrie (2024) basierend auf Shifting Paradigms (2023). *schematische Darstellung

der ECE über den Lebenszyklus ein (Mahler et al., 2019). Der Vorrang für Renovierung, Reparatur und Instandhaltung vor Abriss und Neubau hat einer Mehrheit von befragten Expertinnen und Experten zufolge demnach das größte THG-Einsparpotenzial (Europäische Kommission, 2024a). Auch die Art der Gebäude stellt eine Stellschraube dar, zumindest bei Wohngebäuden. So weisen MFH in der Tendenz niedrigere ECE auf als Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH) (Kapitel 3.1.1).

2.2.2 Neue Gebäudedesigns und emissionsarme Baustoffe einsetzen

Allen voran das Gebäudedesign kann hinsichtlich der Materialeffizienz bereits heute optimiert werden. Trotz strengem Normengerüst bestehen insbesondere bei der Tragwerksplanung Stellschrauben für mehr Materialeffizienz, zum Beispiel durch Hohlkörperdecken oder durch 3D-Druckverfahren. Allein die Anwendung dieser neuartigen Planungsansätze, die bereits heute unkompliziert und hemmnisarm umsetzbar sind, birgt ein Potenzial von insgesamt circa einer Million Tonnen THG-Einsparung bis 2045 (dies entspricht ca. 1 Prozent der Gesamtemissionen

des Gebäudesektors 2022) (Tauer und Aechtner, 2023). Auch eine kritische Auseinandersetzung mit Standards oder Normen, zum Beispiel beim Schallschutz, kann emissionsmindernd wirken. Die Initiativen zum „einfachen Bauen“ (Jarmer et al., 2021), „Lowtech“ (Auer et al., 2023) oder dem „Gebäudetyp-E“ (Bayerische Architektenkammer, o. J.; BMWBS, 2024) (Kapitel 4.1.4) könnten in ihrer Umsetzung zur Effizienzsteigerung im Gebäudedesign beitragen und durch die Schonung von Ressourcen und Einsparung von Materialien auch einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Besonders emissionsintensive Baustoffe können ab sofort durch klimafreundlichere Alternativen substituiert werden. Der Ersatz mineralischer oder fossiler durch nachwachsende Baustoffe, wie zum Beispiel Holz, bietet zudem Potenziale, die nicht lediglich THG-Minderungen bedeuten. Zusätzlich sind hier positive Effekte auf die Wohngesundheit, das Behaglichkeitsempfinden und bauphysikalische Aspekte nachweisbar (Gebäudeforum Klimaneutral, 2021; Zeumer et al., 2014). Durch den Einsatz von Kohlefasern kann Baustahl eingespart werden. Sogenannter *Carbonbeton* ermöglicht neben der Reduktion des Stahlverbrauchs vor allem eine

enorme Verschlankung der Betonbauteile, da die aus Gründen des Korrosionsschutzes für die Stahlbewehrung übliche Mindestüberdeckung nicht mehr notwendig ist (Scheerer, 2023; HENN GmbH, 2022; Haberle, 2018). Die THG-Emissionseinsparungen wurden bisher nur überschlägig mit bis zu 50 Prozent gegenüber konventioneller Stahlbetonbauweise quantifiziert (HENN GmbH, 2022).

Weitere Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft im Hinblick auf den Einsatz von Zement und Beton sind möglich, insbesondere durch eine längere Nutzung der Bauwerke und eine erhöhte Materialeffizienz.

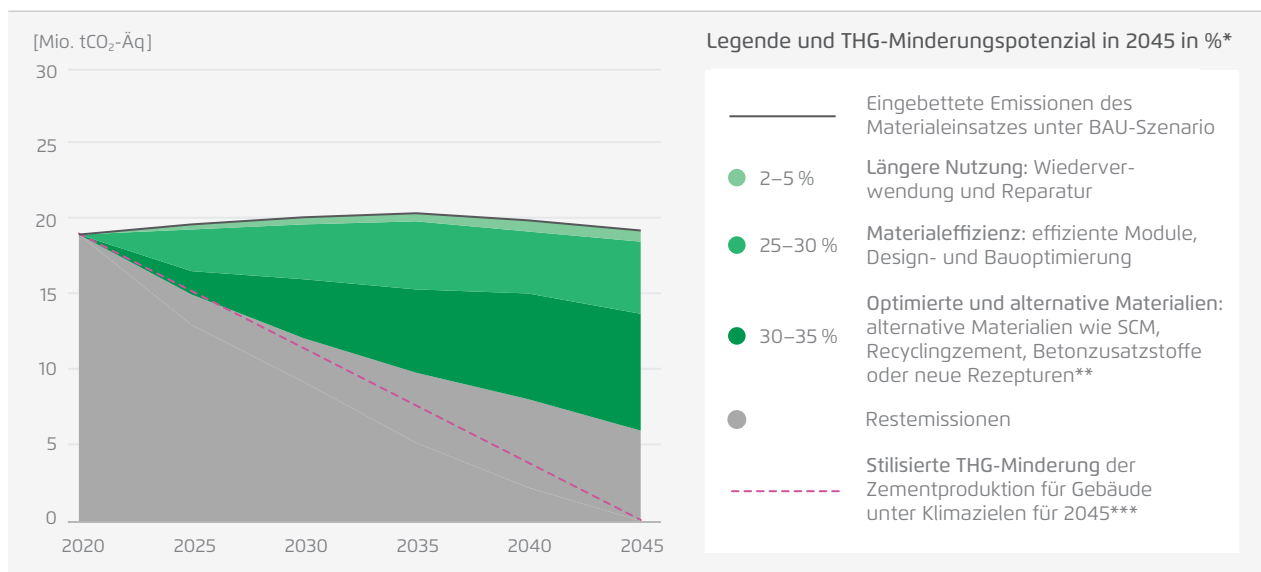
Gemeinsam haben diese Maßnahmen das Potenzial, die Emissionen bis 2045 um 13 Millionen Tonnen (mehr als 65 Prozent) gegenüber einem BAU-Szenario ohne vermehrten Einsatz von kreislauffähigen Materialien zu reduzieren. Bereits bis 2030 ist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um etwa 40 Prozent möglich (Abbildung 13).

2.2.3 Baustoffe anders produzieren

Auch die Baustoffproduktion selbst kann transformiert werden. Als erster Baustein für die Dekarbonisierung der Produktion von Baustoffen können Effizienzpotenziale mobilisiert werden. Bei der Zementproduktion sind 33 Prozent, bei Kalksandstein 20 Prozent, bei Tonziegelsteinen 70 Prozent und bei Stahl circa 33 Prozent der Herstellungsemissionen auf Verbrennungsprozesse zurückzuführen (Geres et al., 2021a; 2021b; Schneider et al., 2020; Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019). Diese können durch (Energie-) Effizienzmaßnahmen an den Anlagen selbst oder überwachende Maßnahmen wie Energiemanagementsysteme optimiert werden (Geres et al., 2021a; 2021b). Für die Kalksandsteinproduktion etwa wird ein Effizienzpotenzial von bis zu 11 Prozent ausgewiesen (Geres et al., 2021a), bis zu 10 Prozent Effizienzsteigerung beim Brennstoffeinsatz sind in der Ziegelindustrie möglich (Geres et al., 2021b). Je nach Branche werden die Potenziale mehr oder weniger

Treibhausgas-Minderungspotenzial des Zement- und Betoneinsatzes im Gebäudesektor in Deutschland

→ Abb. 13



Agora Industrie und Systemiq (2023). *Der konkrete Beitrag der THG-Minderung durch Kreislaufwirtschaftshebel zum Erreichen der deutschen Klimaziele ist nicht eindeutig bestimmbar, da in der Studie keine Annahmen zur Entwicklung von Importen/Exporten getroffen wurden.

Diese Hebel werden von Expert:innen zum Teil nicht als Strategien der Kreislaufwirtschaft, sondern zur Dekarbonisierung der Primärproduktion klassifiziert. * Die Modellierung des Dekarbonisierungspaths der Zementindustrie ist nicht Teil dieser Studie. Gemäß der deutschen Klimaziele muss die Zementindustrie spätestens 2045 klimaneutral sein. Die EU-ETS-Reform und die Einführung des CBAM erfordern jedoch eine schnellere Transformation.

bereits ausgeschöpft. Die Priorität bei Investitionen in Technologien sollte jedoch auf neuen Prozessen liegen, um *Lock-in*-Effekte zu vermeiden.

Zudem gibt es eine Bandbreite neuer Produktionsprozesse für die Dekarbonisierung der Primärproduktion von Grund- und Baustoffen sowie Kreislaufwirtschaftstechnologien mit unterschiedlichen Marktreifestadien und Einsparpotenzialen (Abbildung 15). Die neuen Prozesse zahlen dabei überwiegend auf die prozessbedingten THG-Emissionen bei der Herstellung ein (Agora Energiewende et al., 2021). So lassen sich in der chemischen Grundstoffindustrie, welche die Grundstoffe für erdölbasierte Dämmstoffe liefert, bisher weitestgehend fossil betriebene Cracker auch elektrisch heizen – und damit zukünftig erneuerbar und klimafreundlich. Auch die Primärstahlproduktion wird künftig über Wasserstoff-Direktreduktion klimafreundlicher werden, während die Sekundärroute über elektrisch beheizte Lichtbogen-Öfen von der fortschreitenden Dekarbonisierung des Strommixes in Deutschland profitiert (Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019).

Die Zementindustrie befindet sich in einer besonderen Situation, da circa zwei Drittel der Produktionsemissionen prozessbedingt anfallen (Schneider et al., 2020). Der **Ersatz von Zement-hauptbestandteilen** birgt ein gewisses Dekarbonisierungspotenzial (Schneider et al., 2020). So kann der Klinkerfaktor¹⁰ – in Abhängigkeit der Anforderungen an die Aushärtungsgeschwindigkeit und Endfestigkeit des Betons – abgesenkt und der Anteil der ferner im Zement enthaltenen Stoffe erhöht werden (in Abbildung 15 unter „Optimierte Betonrezepturen“ und „Recycling von Zement“). Ein niedrigerer Klinkeranteil im Beton mindert den CO₂-intensivsten Bestandteil. Dies verringert die Kohlenstoffintensität und trägt dazu bei, die zukünftige Notwendigkeit der Kohlenstoffabscheidung zu reduzieren. Übliche Ersatzstoffe sind beispielsweise Hüttensand als Abfallprodukt der Stahlherstellung im Hochofen sowie Flugasche aus Kohlekraftwerken. Die Dekarbonisierung der Energieerzeugung und der Stahlherstellung führen jedoch zu einer verringerten Verfügbarkeit dieser Stoffe. Calcinierte Tone und Brechsande sind zwei weitere mögliche Ersatzstoffe,

¹⁰ Anteil des Klinkers am Zement.

Die Kombination verschiedener Strategien ermöglicht eine klimaneutrale Industrie → Abb. 14



Agora Industrie (2024)

die die entstehende Lücke füllen könnten. Es ist derzeit nicht abschließend untersucht, ob calcinierte Tone in ausreichender Menge hergestellt werden können und ob eine normative Zulassung von Brech-sanden als Zementbestandteil möglich ist (Schneider et al., 2020).

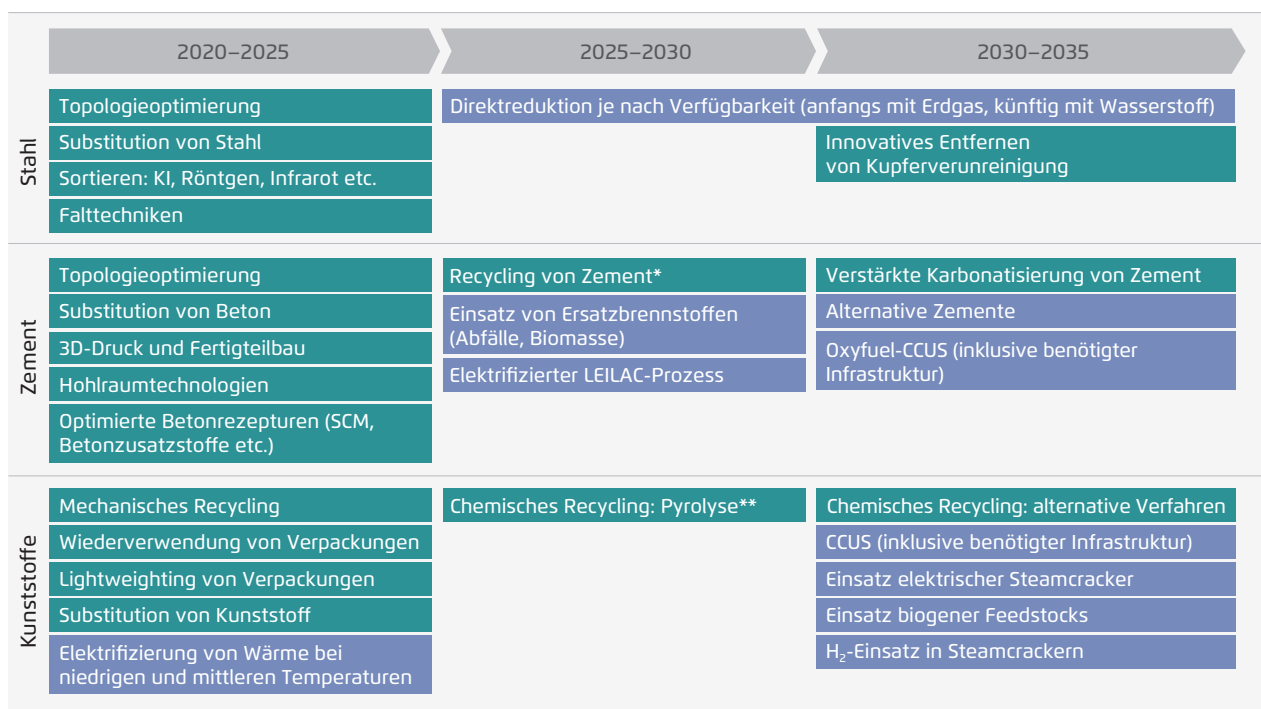
Auch **der vollständige Ersatz des Klinkers als Bindemittel** ist eine Möglichkeit, die THG-Emissionen bei der Zementherstellung zu senken. So werden derzeit Calcium-Sulfoaluminate, Calciumhydrosilicate sowie Calcium-Silicathydrate als mögliche Substitute erforscht. Je nach Quelle könnten durch Substitute

0,1 Millionen Tonnen THG-Emissionen bis 2045 (Tauer und Aechtner, 2023) bis hin zu 3,8 Millionen Tonnen THG-Emissionen bis 2050 (Schneider et al., 2020) eingespart werden.

Letztlich kann bei der Herstellung ein Teil des Zements auch durch **alternative zementartige Materialien** ersetzt werden, wodurch der Zementgehalt im Beton reduziert wird (New Climate Institute, 2020). Schließlich können die restlichen Emissionen mit *Carbon Capture and Utilisation* (CCU) und *Carbon Capture and Storage* (CCS) reduziert werden (Abbildung 15).

Erwartete Marktreife von Technologien zur Dekarbonisierung der Primärproduktion und der Kreislaufwirtschaft

→ Abb. 15



● Dekarbonisierung der Primärproduktion ● Kreislaufwirtschaftstechnologien

Agora Industrie und Systemiq (2023) basierend auf Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2021), Systemiq (2022), Mission Possible Partnership (2022a), Systemiq (2022). * Recycling von Zement: Wiederverwertung von Betonbestandteilen, die als Gesteinskörnung in neuem Beton verwendet werden können. ** Zur Marktreife der Pyrolyse gibt es auch abweichende Expert:innenmeinungen. SCM = Supplementary Cementitious Materials

3 Auswirkungen der Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen

Aus der Ableitung heutiger ECE-Kennwerte von Neubauten in Deutschland wird deutlich, dass sich bereits mit heute verfügbaren Produkten, Techniken und Maßnahmen signifikante Emissionsminderungen erreichen lassen (Kapitel 3.1.1). Wie verschiedene Entwicklungspfade hin zu Klimaneutralität bis 2045 aussehen könnten, beleuchtet Kapitel 3.1.2. Welche Auswirkungen auf die Materialkosten damit einhergehen, zeigt Kapitel 3.2.

3.1 Klimaschutzpotenziale

3.1.1 Embodied-Carbon-Emissionen-Kennwerte heutiger Gebäude

Für eine zielkompatible Reduktion von ECE im Gebäudebereich ist die Kenntnis des Ausgangszustands wesentlich. Dazu wurden konkrete Werte für die ECE heute in Deutschland geplanter beziehungsweise gebauter Gebäude unterschiedlicher Gebäudetypen und Bauweisen aus der Literatur und aus dokumentierten Bauprojekten (Praxiswerten) ermittelt. Insgesamt standen 16 Studien bzw. Datenpakete zur Verfügung, die 38 Gebäude in 187 baulichen Varianten umfassen.

Für diese Studie wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit, der Relevanz für den Klimaschutz und der Neubauaktivitäten folgende Festlegungen getroffen. Es wurden drei Gebäudetypen ausgewählt, wobei der Anteil am Neubau (Wohngebäude) und die Datenverfügbarkeit die maßgeblichen Faktoren für diese Entscheidung waren. Zudem fand eine Unterscheidung in fünf Bauweisen anhand des überwiegend verwendeten Materials statt (1). Zur Bewertung der Klimaschutzwirkung wurde, wie auch im DGNB-Zertifizierungssystem für Neubauten (DGNB, 2023), das fossile Erderwärmungspotenzial GWP_{fossil}

herangezogen.¹¹ Es fokussiert auf die Nutzung beziehungsweise Verbrennung fossiler Energieträger und ermöglicht eine faire Vergleichbarkeit von mineralischen und nachwachsenden Rohstoffen in der Herstellungsphase. Für die Kennwertermittlung aus älteren Studien wurden dazu Umrechnungsfaktoren ermittelt und angewandt.

Um die heute freigesetzten und am besten beeinflussbaren ECE abzudecken, wurde die Analyse auf die Lebenszyklusphasen Rohstoffbereitstellung (A1), Transport (A2) und Produktherstellung (A3) begrenzt.¹² Diese stellen gleichzeitig die größte Stellschraube dar (Abbildung 2). Es werden nach gängiger Systematik die gesamten Gebäude betrachtet, also Baukonstruktion (Kostengruppe (KG) 300)¹³ und Gebäudetechnik (KG 400, ohne Photovoltaik). Die Ergebnisse werden zur Vergleichbarkeit – ähnlich zu QNG und DGNB – auf die Netto-Raumfläche (NRF (R))¹⁴ in m² bezogen (Tabelle 1). Für die Mittelung von Kennwerten nach Gebäudetypen und Bauweisen wurden die amtlichen Statistiken zu Fertigstellungen im Jahr 2022 nach umbautem Raum verwendet (Destatis, 2024).¹⁵

11 Zur Begründung für diesen Faktor siehe Kapitel 5.1.

12 Eine Ausweitung auf A1–A5 ist grundsätzlich denkbar, allerdings liegt der Beitrag der Phasen A4 und A5 (Transport und Errichtung/Einbau) bei lediglich neun Prozent (Ramboll, 2023).

13 Die Systemgrenze der Erfassung wird im QNG nach Kostengruppen festgelegt. Kostengruppe 300 aus der DIN 276 umfasst die Kosten für Bauwerk und Baukonstruktion. Dazu gehören die kompletten Baukörper einschließlich des Kellers/der Tiefgarage. KG 400 enthält die Technische Gebäudeausrüstung (TGA).

14 Nach der 2016 neu erschienenen DIN 277 wird nur noch zwischen dem Regelfall (R) und dem Sonderfall (S) für die Ermittlung der Brutto-Grundfläche unterschieden. Den Regelfall der Raumumschließung (R) stellen Bereiche des Bauwerks dar, die Nutzungen der Netto-Raumfläche (NRF) nach Tabelle 1 aufweisen und die bei allen Begrenzungsflächen des Raums vollständig umschlossen sind. Dazu gehören nicht nur Innenräume, die von der Witterung geschützt sind, sondern auch solche allseitig umschlossenen Räume, die über Öffnungen mit dem Außenklima verbunden sind (z.B. über Rollgitter in Garagen).

15 Da keine verlässlichen und praxisnahen Daten zur Aufteilung zwischen den beiden Holzbauweisen ermittelt werden konnten, wurde eine 50-50-Aufteilung gewählt.

Eine ausführlichere Beschreibung der Methodik und der Annahmen findet sich im Anhang.

Hinsichtlich der Gebäudetypen lässt sich als übergeordnete Erkenntnis festhalten (Abbildung 16), dass **Wohngebäude (320 kg/m²) im Median¹⁶ weniger ECE verursachen als Bürogebäude (370 kg/m²)**.¹⁷ Dies ergibt sich unter anderem aus dem sehr **hohen Anteil der Stahlbeton-Bauweise bei Bürogebäuden** (83 Prozent der Bürogebäude bezogen auf umbauten Raum) (Destatis, 2024). Für Wohngebäude ergeben sich geringere Auswirkungen bei den MFH (229 kg/m²) als bei den EZFH (320 kg/m²), was durch die geringere Flächeneffizienz und das schlechtere Verhältnis der Gebäudehüllfläche zum -volumen begründet ist.

Die Bandbreiten zwischen oberen und unteren Quartilen¹⁸ verdeutlichen jedoch, dass pauschale Aussagen nur schwierig zu treffen sind.

Aus dem Vergleich der Bauweisen lassen sich mehrere Feststellungen ableiten. Zunächst verdeutlicht Abbildung 16 die Relevanz des überwiegend verwendeten Materials, vor allem für die Tragstruktur, für die ECE. **Zudem ist eindeutig erkennbar, dass die mineralischen Massivbauweisen im Median emissionsintensiver sind als die beiden Holzbauweisen.** Bei den MFH ergeben sich zum Beispiel durch einen Materialwechsel von Stahlbeton auf Massivholz Einsparungen von rund 65 Prozent (Medianwerte: 290 kg/m² bzw. 106 kg/m²).

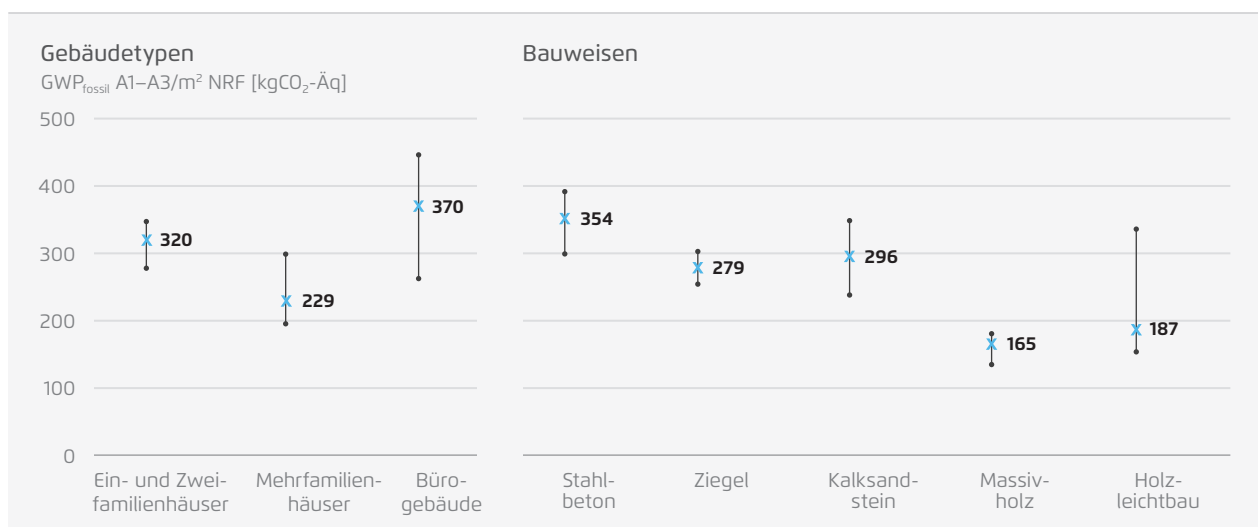
Die deutlichen Unterschiede innerhalb der Bauweisen zeigen auch, dass die Auswahl der weiteren Materialien für den Ausbau oder die Umsetzung von Materialeffizienzmaßnahmen Einfluss haben und schon heute einen Beitrag zur Reduktion der ECE leisten können. Bei den MFH aus Stahlbeton ergibt

- 16 Der Median beschreibt den Wert einer Datenverteilung, für den die Hälfte aller Individualdaten kleiner, die andere größer ist.
- 17 Wichtig bei der Interpretation der Ergebnisse bzw. generell bei LCA-Studien ist die Berücksichtigung des Untersuchungsrahmens. Die Zahlenwerte sind nicht ohne Weiteres mit anderen Berechnungen vergleichbar, vor allem auch nicht mit LCA-Kennwerten aus anderen Ländern, da hier andere Scopes und Datengrundlagen verwendet werden sowie bei der Baustoffherstellung andere Energiesysteme zugrunde liegen.

- 18 Das obere Quartil entspricht dem 75-Prozent-Quartil. 75 Prozent der Werte der Stichprobe liegen darunter. Das untere Quartil entspricht dem 25-Prozent-Quartil. 25 Prozent der Werte der Stichprobe liegen darunter.

Kennwerte von Embodied-Carbon-Emissionen in heutigen Gebäuden in Deutschland nach Gebäudetypen und nach Bauweisen

→ Abb. 16



Agora Industrie und ifeu (2024). GWP = Global warming potential; NRF = Nettonraumfläche nach DIN 277

Festlegungen für die Kennwertbestimmung

→ Tabelle 1

Betrachtete Gebäudetypen	→ Ein- und Zweifamilienhäuser inkl. Reihenhäuser (EZFH) → Mehrfamilienhäuser (MFH) → Bürogebäude (BG)
Untersuchte Bauweisen	→ Stahlbeton → Ziegel → Kalksandstein → Massivholz → Holzleichtbau
Wirkungsindikator	Erderwärmungspotenzial aus fossilen Emissionen (GWP_{fossil})
Berücksichtigte Lebenszyklusphasen	Rohstoffbereitstellung (A1), Transport (A2), Produktherstellung (A3)
Bezugseinheit	Netto-Raumfläche (NRF (R)) in m^2
Betrachtete Gebäudeteile	Baukonstruktion (Kostengruppe (KG) 300), Technische Gebäudeausrüstung (KG 400) exkl. Photovoltaik-Anlagen*

Agora Industrie und ifeu (2024). *Nur eine Studie berücksichtigt Photovoltaik-Anlagen, weshalb diese aus Gründen der Vergleichbarkeit herausgerechnet wurden.

sich zum Beispiel zwischen oberem (379 kg/m^2) und unterem (190 kg/m^2) Quartil ein Einsparpotenzial von rund 50 Prozent. Beim Holzleichtbau hängt die große Bandbreite zudem mit unterschiedlichen Brandschutzvorgaben je nach Gebäudegröße (Gebäudeklasse) und dem methodischen Vorgehen zusammen (siehe Anhang).

Trotz bestehender normativer Vorgaben für die Durchführung von Ökobilanzen sind die Studien ohne Fachkenntnis und detailliertes Verständnis der Annahmen teilweise nicht miteinander vergleichbar. Mehrere Aspekte fallen dabei besonders auf:

- So liegt bisher erst eine Studie vor (Deurer und Steinbach, o. J.), die die aktuelle Version der ÖKOBAUDAT als Basis hat. Hier gibt es weiteren Forschungsbedarf und Baustoff-Herstellende sind gefragt, zügig EPDs für ihre Produkte nach der neuen Norm zu erstellen, zu veröffentlichen und in die Datenbanken einzupflegen. Dies ist als Vorbereitung für eine Regulierung von ECE (Kapitel 5) mit Nachdruck zu verfolgen.
- Für die Bürogebäude konnten lediglich Werte für zwei Bauweisen – Stahlbeton und Holzleichtbau – bestimmt werden, da viele Studien keine konkreten Informationen zu Bauweisen angeben

und deshalb nicht detaillierter ausgewertet wurden. Der Fokus der Studien deckt sich aber auch mit der aktuellen Baupraxis, bei der Stahlbeton das dominierende Baumaterial ist (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2022).

- Besonders bei der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) wird in den Studien mit sehr unterschiedlichen Detaillierungsgraden gerechnet. Teilweise werden nur pauschale Aufschläge für die TGA angenommen, teilweise finden sich detaillierte Sachbilanzen. Auch der Umfang der Berücksichtigung der TGA unterscheidet sich, insbesondere der Einbezug von Photovoltaik-Anlagen. Zudem ist die Datenverfügbarkeit in der ÖKOBAUDAT hinsichtlich der Gebäudetechnik weiterhin eingeschränkt. So sind nur 12 Prozent¹⁹ der ÖKOBAUDAT-Datensätze in der Kategorie Gebäudetechnik zu finden.
- Der Großteil der Datensätze entstammt wissenschaftlichen Studien, welche auf (fiktive) Modellgebäude zurückgreifen und auf „progressive“ Variantenuntersuchungen fokussieren. Es liegt die Vermutung nahe, dass die ermittelten Kennwerte daher nicht die gesamte Bandbreite des Neubaus

¹⁹ Stand Februar 2024.

von Gebäuden abdecken (*Mainstream*), sondern das bereits eher klimafreundliche Spektrum umfassen.

- Es gibt bisher keine verpflichtenden Vorgaben zur Durchführung von Ökobilanzen von Gebäuden in Deutschland (Kapitel 4.2.3). Dementsprechend finden LCAs in der Baupraxis nur freiwillig Anwendung, wenn dies entsprechend beauftragt oder ein Nachhaltigkeitszertifikat angestrebt wird, was die Annahme verstärkt, dass tendenziell das progressive Spektrum abgebildet wird. So wurden 2021 schätzungsweise weniger als ein Prozent der Neubauvorhaben mit einem Nachhaltigkeitszertifikat ausgezeichnet.²⁰ Dieser Datenschatz der öffentlichen und privatwirtschaftlichen Zertifizierungssysteme könnte besser genutzt werden, indem verstärkt (anonymisierte) Auswertungen der Zertifizierungsstellen durchgeführt und veröffentlicht werden, wie dies in der vorliegenden Studie passiert.

3.1.2 Dekarbonisierungsszenarien bis 2045

Auf Basis der vorangegangenen Kennwertermittlung wurden mögliche Szenarien für die Reduktion der ECE modelliert. Die Berechnungen zielen darauf ab, mögliche Emissionseinsparungen bis 2045 für den Neubau von Gebäuden in Deutschland zu beziffern.

Ausgangspunkt für die Modellierung war die Festlegung eines Basisszenarios und zweier Transformationsszenarien bis 2045. Das Basisszenario *Business as usual* (BAU) dient als Vergleich. Es schreibt bisherige Entwicklungen bezüglich Emissionsreduktion bei der Baustoffherstellung fort und belässt die Aufteilung zwischen den Bauweisen konstant. **Das erste Optimierungsszenario TRANSFORM MAT setzt auf eine schnellere Dekarbonisierung der Baustoff- beziehungsweise Materialherstellung.** Es zeigt damit die Potenziale in der Baustoffindustrie auf und fokussiert auf Maßnahmen der Angebotsseite. Dazu zählen Effizienzsteigerung, Elektrifizierung, Wasserstoffnutzung, CCU, CCS und Recycling.

Aufbauend auf dem vorherigen Szenario, nimmt das Transformationsszenario **TRANSFORM GEB** neben der Angebotsseite **auch die Nachfrageseite und damit die gesamte Bauindustrie inklusive des Planungsprozesses sowie den vollständigen Gebäudelebenszyklus in den Blick.** Dekarbonisierungsmaßnahmen, die bereits frühzeitig zusätzlich in diesem Szenario umgesetzt werden, sind verbesserte Bauverfahren, höhere Materialeffizienz, Materialsubstitution (Umstellung von mineralischen auf nachwachsende Baustoffe) und Recycling sowie Wiederverwendung.

Alle drei Szenarien betrachten analog zur Kennwertbestimmung die in Kapitel 3.1.1 untersuchten Gebäudetypen EZFH, MFH und Büro. Für diese wurde eine abnehmende Neubauaktivität aufgrund annähernd stagnierender Bevölkerungsentwicklung, Sättigungsprozessen, Flächenverfügbarkeiten und geringeren Abgangsraten angenommen.²¹ Für die Modellierungen wurden die GWP_{fossil}-Kennwerte der verschiedenen Gebäudetypen und Bauweisen als Ausgangswerte im Basisjahr 2021 verwendet. Als maßgebend wurden die oberen Quartilswerte angesetzt, wodurch die aktuelle Bautätigkeit praxisnäher abgebildet wird als mit den Medianwerten.

Für die beiden Optimierungsszenarien wurden **acht repräsentative Baustoffe** – vier tragende (Beton, Stahl, Tonziegel, Kalksandsteinziegel) und vier Dämmstoffe (Expandiertes Polystyrol (EPS), Extrudiertes Polystyrol (XPS), Mineralwolle, Polyurethan-Hartschaum (PU)) – analysiert. Ausgangswert für jeden Baustoff war eine nach Relevanz gewichtete Mittelung der THG-Emissionen (GWPgesamt) in den Modulen A1 bis A3 (Herstellung) aus der ÖKOBAUDAT. Die Entwicklung bis 2045 wurden mit zwei parallelen Ansätzen abgeschätzt. Einerseits wurden Interviews mit produzierenden Unternehmen (oder entsprechenden Verbänden) geführt. Daraus konnten spezifische Treibhausgas-Minderungsfaktoren für die anteiligen Baustoffe entsprechend den Marktanteilen der jeweiligen

²⁰ Agora Industrie basierend auf Destatis (2022), Anders et al. (2022) und BNP Paribas (2021).

²¹ Die Annahmen für die Neubauaktivitäten sind mit der Studie von Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2024): *Klimaneutrales Deutschland 2045* (erscheint demnächst) im Auftrag von Agora Think Tanks und Agora Verkehrswende harmonisiert.

Unternehmen ermittelt werden. Andererseits wurden für die Baustoffe der verbliebenen Marktanteile Werte aus der Literatur beziehungsweise aus Branchendaten, wie den jeweiligen Klimaneutralitäts-Fahrpläne, abgeleitet. Für die Entwicklung des deutschen Strommixes wurde ein Modell und Szenario des ifeu herangezogen (ifeu Strommaster basierend auf Repenning et al., 2021). Aus diesen Berechnungen konnten für die acht Baustoffe jährliche Dekarbonisierungsraten zwischen zwei und zehn Prozent bestimmt werden.

Eine detailliertere Beschreibung der Annahmen findet sich im Anhang.

In der Betrachtung der Gesamtemissionen aus dem Neubau der drei betrachteten Gebäudetypen ergibt sich folgendes Bild in der Gesamtschau (Abbildungen 17 und 18).

Bereits das BAU-Szenario erzielt über das gesamte Neubauvolumen betrachtet bis 2045 nennenswerte Einsparungen gegenüber dem Startjahr der Modellierung (minus 74 Prozent). Quadratmeterbezogen zeigen sich im Vergleich deutlich geringere Emissionseinsparungen (minus 39 Prozent), was den hohen Einfluss der verringerten Neubauaktivität verdeutlicht. **Die quadratmetergemittelte Darstellung verdeutlicht, dass ein BAU-Szenario für das Erreichen der Klimaschutzziele bei gleichbleibendem Neubaulniveau nicht ausreichend wäre. Es verblieben nennenswerte Restbeträge bis 2045, welche durch Senken allein nicht auszugleichen wären.** Zusätzliche planerische und technische Maßnahmen sind also unabdingbar.

Das TRANSFORM-MAT-Szenario, welches ausschließlich auf angebotsseitige Maßnahmen setzt, erreicht bereits deutlich tiefgreifendere Einsparungen (minus 88 Prozent Gesamtemissionen gegenüber 2021). Gegenüber einem BAU-Szenario können bis 2045 mit umfangreichen Verbesserungen der Baustoffherstellung 53 Prozent der ECE je Quadratmeter eingespart werden. **Eine ambitionierte Dekarbonisierung der Grundstoff- und Baustoffindustrie ist damit ein Grundpfeiler der Reduktion von ECE.** Das TRANSFORM-MAT-Szenario zeigt aber auch, dass

diese Maßnahmen für das Ziel der Klimaneutralität allein nicht ausreichen, es bedarf weiterer nachfrageseitiger Anstrengungen.

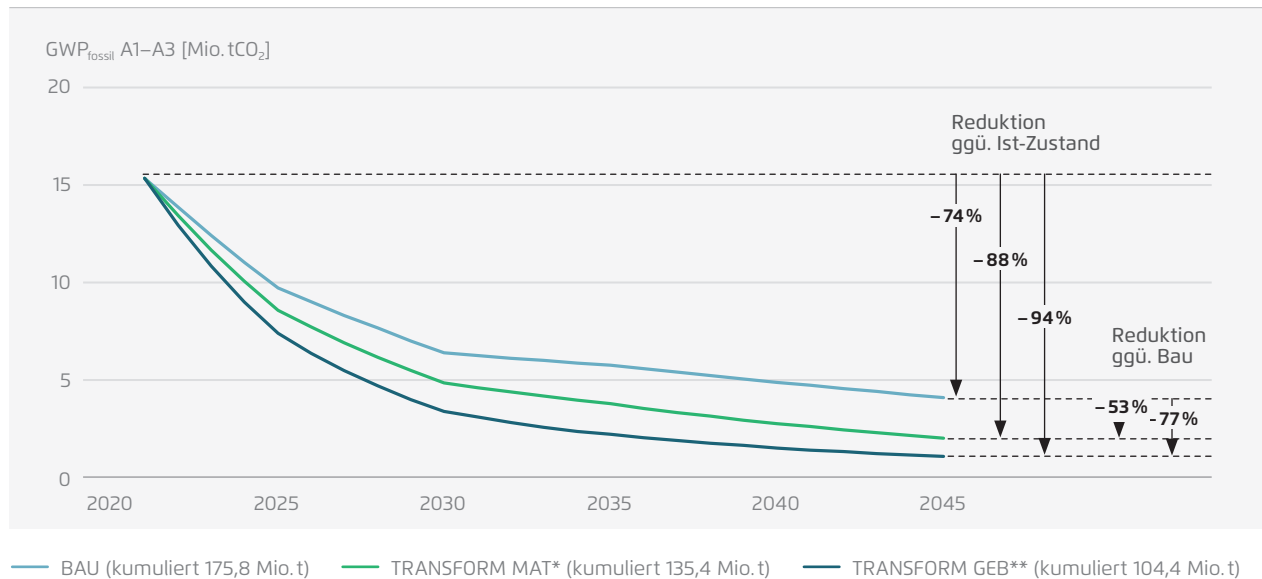
Diese berücksichtigt das Optimierungsszenarien TRANSFORM GEB, was im Vergleich die größten Einsparungen im Sinne der Klimaneutralität erzielt (minus 94 Prozent Gesamtemissionen gegenüber 2021). Auch hier verbleiben gewisse Restemissionen durch nicht vermeidbare Prozessemissionen, doch sind diese in diesem Umfang durch technische und natürliche Senken realistisch ausgleichbar. Quadratmeterbezogen sinken die ECE in diesem Szenario gegenüber dem Basisjahr um 86 Prozent und 2045 gegenüber dem BAU-Szenario um 77 Prozent.

Alle drei Szenarien erreichen im Einklang mit den notwendigen Reduktionsbedarfen (Kapitel 1.2) und den heutigen technischen Potenzialen (Kapitel 2.2) bereits signifikante Emissionsminderungen bis 2030.

Der Vergleich zwischen der Gesamtbetrachtung der Neubauaktivitäten in Deutschland (Abbildung 17) und der quadratmeterbezogenen Darstellungsweise (Abbildung 18) verdeutlicht die hohe Sensitivität der Ergebnisse gegenüber den prognostizierten Neubauraten. Der sehr steile Abfall der Gesamtemissionen bis 2030 hängt deutlich mit dem Rückgang der jährlichen Neubaumengen von EZFH, MFH und Bürogebäuden zusammen. Dieser Zusammenhang verdeutlicht, dass das Neubau-Niveau maßgeblichen Einfluss auf die Erreichung der Klimaziele hat. Daraus ergibt sich ein potenzieller Zielkonflikt in Bezug auf die Zielstellungen dieser Studie (Kapitel 1): Ein hohes Neubaulniveau schafft eine hohe Nachfrage nach emissionsarmen Baustoffen und damit einen Leitmarkt für die Transformation der Grundstoffindustrie. Gleichzeitig wirkt sich ein hohes Neubaulniveau negativ auf die Erreichung der Klimaneutralität und anderer Nachhaltigkeitsziele (zum Beispiel Reduktion der Flächeninanspruchnahme) aus. Umgekehrt ist ein niedriges Neubaulniveau vorteilhaft für die Klimaziele, schwächt aber die Nachfrage (aus dem Gebäudebereich) nach emissionsarmen Baustoffen. Dies kann im Rahmen dieser Studie nicht vollständig aufgelöst werden, es wird jedoch bei den Instrumentenvorschlägen in Kapitel 5 mitbedacht.

Dekarbonisierungsszenarien für Embodied-Carbon-Emissionen im Neubau bis 2045 – jährliche gesamte Treibhausgasemissionen

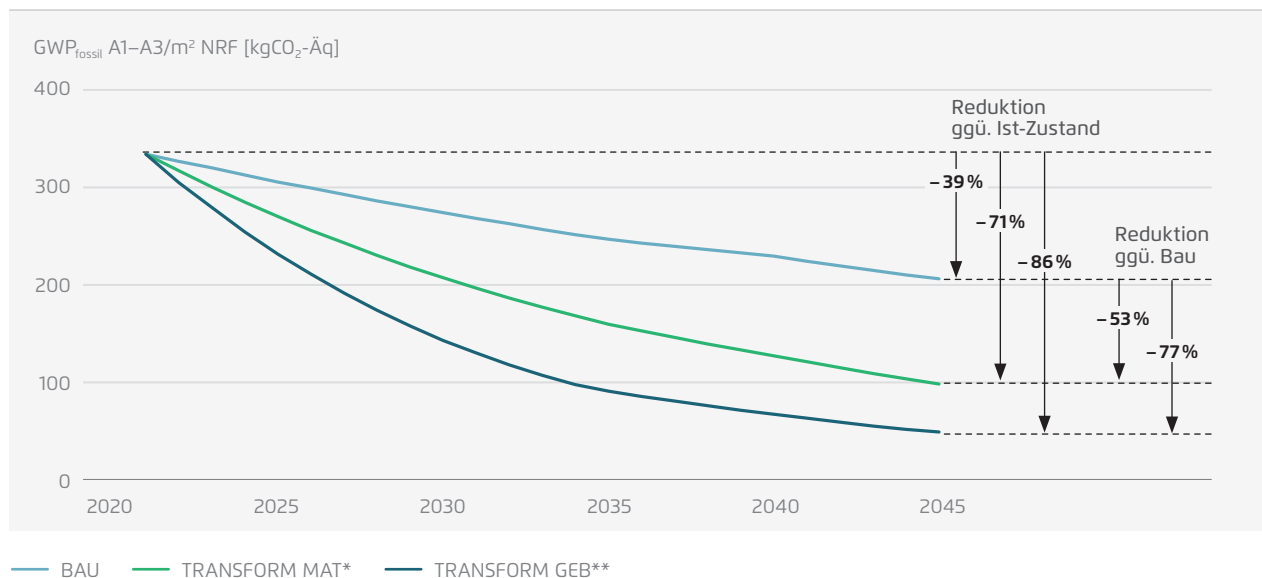
→ Abb. 17



Agora Industrie und ifeu (2024). *Das Optimierungsszenario TRANSFORM MAT setzt auf eine schnellere Dekarbonisierung der Baustoff- bzw. Materialherstellung. **TRANSFORM GEB baut auf dem vorherigen Szenario auf und betrachtet verbesserte Bauverfahren, höhere Materialeffizienz, Materialsubstitution (Umstellung von mineralischen auf nachwachsende Baustoffe) und Recycling sowie Wiederverwendung. GWP = Global warming potential

Dekarbonisierungsszenarien bis 2045 – jährliche quadratmeterbezogene Treibhausgasemissionen

→ Abb. 18



Agora Industrie und ifeu (2024). *Das Optimierungsszenario TRANSFORM MAT setzt auf eine schnellere Dekarbonisierung der Baustoff- bzw. Materialherstellung. **TRANSFORM GEB baut auf dem vorherigen Szenario auf und betrachtet verbesserte Bauverfahren, höhere Materialeffizienz, Materialsubstitution (Umstellung von mineralischen auf nachwachsende Baustoffe) und Recycling sowie Wiederverwendung. GWP = Global warming potential; NRF = Nettoraumfläche nach DIN 277

Überblick über betrachtete Szenarien und deren Annahmen

→ Tabelle 2

Szenario- bezeichnung/ Parameter	Angebotsseite (Industriesektor)	Nachfrageseite (Gebäudesektor)	
	Dekarbonisierung Baustoffe (THG-Reduktion pro Jahr)	Dekarbonisierung Bauteile (THG-Reduktion pro Jahr)	Holzbauquote (Anteil an neu fertig- gestelltem umbautem Raum im jeweiligen Jahr)
BAU	Fortschreibung historischer Entwicklungen (2 % pro Jahr)		Konstant ab 2021: → EZFH: 21% → MFH: 2% → Büro: 2%
TRANSFORM MAT	Fortschreitender Einsatz von Klimaneutralitätstechnologien in der Baustoffindustrie (5% pro Jahr)		analog BAU
TRANSFORM GEB	analog TRANSFORM MAT	→ Effizienterer Materialeinsatz und emissionsärmere Bauteilaufbauten (Erreichung der unteren Quartalswerte bis 2035) → Ausschöpfung des Potenzials zur Materialeinsparung durch Reuse und Recycling etc. bis 2045 (1 % pro Jahr)	Steigend bis 2045: → EZFH: 30 % → MFH: 12 % → Büro: 6 %

Agora Industrie und ifeu (2024)

Lösungsbausteine dafür wären neben der Umsetzung von Suffizienzansätzen (Zimmermann et al., 2023) die Entwicklung von alternativen Geschäftsmodellen und die Begleitung von anstehenden Strukturwandelprozessen in der Grundstoffindustrie. Gleichzeitig ergibt sich aber weiterhin eine Nachfrage nach klimafreundlichen Baustoffen aus den internationalen Märkten, durch den zunehmenden Modernisierungsmarkt und den Infrastrukturbau (Brücken, Tunnel, etc.).

3.2 Auswirkungen auf die Materialkosten

3.2.1 Kostenvergleich konventioneller und klimafreundlicher Materialien

Klimafreundliche Materialien werden häufig mit höheren Kosten in Verbindung gebracht. Ob und wie sehr sich durch sie jedoch tatsächlich die Baukosten erhöhen, ist wenig analysiert.

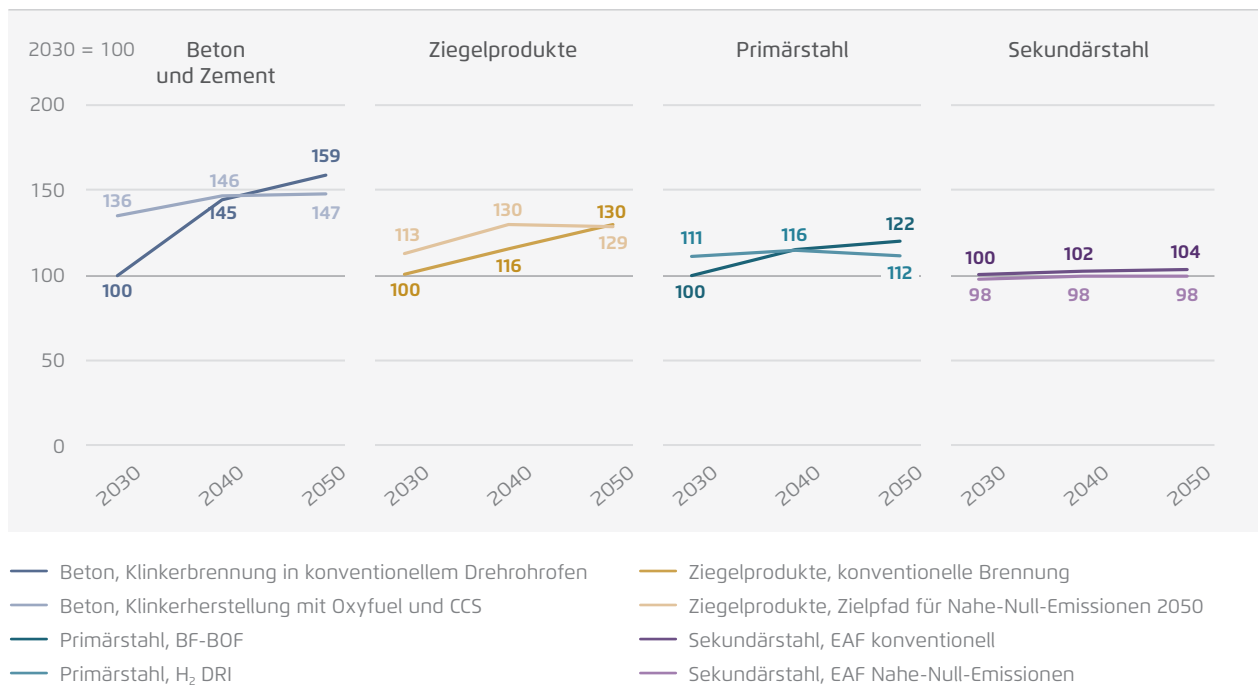
Im Rahmen dieser Publikation konzentriert sich die Analyse einerseits auf die wichtigen Baumaterialien Beton, Stahl und Ziegel, die in großen Mengen verwendet werden. Andererseits werden auch die Kosten für den Holzbau analysiert. Als Referenz für den Kostenvergleich dient in allen Fällen die gängige, konventionelle Baupraxis für Materialien und Konstruktionen.

Emissionsreduktionen sind in der Materialproduktion auf mehreren Wegen möglich (Kapitel 2.2.3). Für jeden Weg sind darüber hinaus unterschiedlich hohe Umsetzungsgrade möglich. Unterschieden werden muss daher zwischen klimafreundlichen Materialien und solchen, die dieses Niveau nicht erreichen, aber im Vergleich zu konventionellen Baustoffen eine substanzielle Reduktion schaffen.

Die Kosten für die Herstellung weitgehend emissionsfreier Produkte sind für die meisten Materialien aktuell noch höher als für konventionelle – sofern solche Materialien überhaupt in ausreichenden Mengen vorhanden sind. Das gilt insbesondere für

Geschätzte Kosten für die Herstellung wichtiger Baumaterialien

→ Abb. 19



Agora Industrie und Ramboll (2024), siehe Anhang. Indexwerte, in denen der Wert 100 den Kosten des konventionellen Produktionsprozesses im Jahr 2030 widerspiegelt. BF-BOF = Blast Furnace and basic Oxygen Furnace; EAF = Electric Arc Furnace; CCS = Carbon Capture and Storage; DRI = Direct Reduced Iron

die energieintensive Produktion der zentralen Baumaterialien Beton, (Sekundär-)Stahl, mineralische und synthetische Isolierungen sowie Ziegel. Verursacht werden die erhöhten Kosten beispielsweise durch die notwendigen Investitionen zur Änderung der Produktionsrouten sowie durch die begrenzte Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff zusammen mit der fehlenden Infrastruktur, was auch die Nutzung von Technologien zur CO₂-Abscheidung beeinflusst.

In Abbildung 19 veranschaulichen die Grafiken a), b) und c) die im Jahr 2030 erwarteten höheren Kosten für weitgehend emissionsfreie Beton-, Primärstahl- und Ziegelprodukte²² im Vergleich zu den konventio-

nellen Materialien (bei denen der Index im Jahr 2030 auf 100 festgelegt ist, relative Kosten verschieben sich jedoch mittelfristig).²³

Zum einen werden weitgehend emissionsfreie Produktionstechnologien günstiger: Die Produktionskapazitäten steigen, womit Skaleneffekte und Lernkurven verbunden sind. CO₂-Infrastruktur und erneuerbare Energieträger werden ausgebaut. **Zum anderen verteuert sich die konventionelle Produktion:** Der CO₂-Preis steigt, weil Emissionsobergrenzen im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems (ETS) sinken und kostenlose Zuteilungen auslaufen. Bis 2040 ist zu erwarten, dass klimaneutrale oder weitgehend emissionsfreie Materialien zu vergleichbaren Kosten wie herkömmliche Materialien hergestellt werden und bis 2050 sollen diese Materialien die kosteneffizientere Option sein. Dies setzt voraus, dass die Investitionen in kohlenstoffarme

²² Während für die anderen Materialien eine weitgehend emissionsfreie Produktion ab 2030 angenommen wurde, beziehen sich die Produktionskosten für Ziegelprodukte auf einen weitgehend emissionsfreien Pfad zu im Jahr 2050. Die Treibhausgasemissionen werden darin im Jahr 2050 im Vergleich zu 2020 um 88 Prozent reduziert, mit Reduktionsmeilensteinen von 46 Prozent im Jahr 2030 und 75 Prozent im Jahr 2040 (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie und Futurecamp, 2021).

²³ Angenommen werden hier ETS-Zertifikatspreise von 132 Euro im Jahr 2030, 179 Euro im Jahr 2040 und 210 Euro im Jahr 2050, basierend auf Projektionen von Agora Industrie.

Technologien in diesem Jahrzehnt konkretisiert werden. Leitmärkte können diese Entwicklung vorantreiben.

Die Grafiken zeigen lediglich eine ausgewählte Kombination von häufig vorgeschlagenen Technologien, die THG-Neutralität als Ergebnis von Anpassungen der Produktionsstätten erreichen können. Andere Produkttechnologien bieten jedoch kurzfristige Möglichkeiten, die CO₂-Intensität von Materialien und damit auch die ECE zu reduzieren. Zum Beispiel erzielen derzeit verfügbare klinkereffiziente Zemente in den meisten Regionen Deutschlands einen um 10–20 Prozent geringeren CO₂-Fußabdruck bei etwa vier Prozent Mehrkosten, wie öffentlich verfügbare Preislisten von Herstellern und Gespräche mit Betonexperten und -expertinnen von Ramboll zeigen (CEMEX, 2024; Holcim, 2024a, 2024b und 2024c). Für Stahl bewertet die Mission Possible Partnership (2022) eine Reihe von Technologien und deren nivellierte Produktionskosten. Für Europa zeigt der Vergleich, dass das konventionelle Sauerstoffaufblasverfahren im Jahr 2030 noch wettbewerbsfähig sein, ab 2035 jedoch von den meisten alternativen Technologien überholt werden wird.

Darüber hinaus stellt Sekundärstahl eine Ausnahme hinsichtlich der kurzfristig höheren Kosten klimaneutraler Materialien dar. Bereits im Jahr 2030 ist zu erwarten, dass recycelter Stahl aus erneuerbaren Energien wirtschaftlich sein wird (Abbildung 19). Zu dieser frühen Wirtschaftlichkeit tragen die begrenzten Auswirkungen auf die Produktionswege und der wachsende Anteil erneuerbaren Stroms in Deutschland und Europa bei. Auch der Einsatz von Sekundärstahl anstelle von Primärstahl reduziert die Emissionen und ist vielfach bereits Praxis.

Die bisher präsentierten Kostenvergleiche beziehen sich vor allem auf die Materialkosten des Bauwerks. **Andere Kosten für Bauprojekte, beispielsweise für Innenausbau, Grundstückserwerb, Arbeitskraft und Finanzierung, bleiben bei der Verwendung von CO₂-reduzierten Baumaterialien unverändert (Abbildung 20).**

Nach Angaben des Bundesverbandes Bauindustrie (2024) machen die Materialkosten etwa 40 Prozent der Baukosten für Neubauten aus (Abbildung 20). Verfügbare Betonmischungen mit reduzierter CO₂-Intensität erhöhen die Baukosten somit lediglich um ein bis zwei Prozent. Eine Einschätzung des Schweizerischen Baugewerbeverbands und des Hauseigentümerverbands Schweiz kommt auf einen vergleichbaren Anteil von 49 Prozent (Aeschi, 2023). Im Bericht werden Szenarien für allgemeine Materialkostensteigerungen im Bausektor aufgeschlüsselt: Fünf Prozent höhere Materialkosten führen zu mehr als zwei Prozent höheren Projektkosten. Wenn zusätzlich Grundstücks- und Finanzierungskosten einbezogen werden, die je nach Lage und Finanzierungsmodell stark variieren, sowie darüber hinaus Baunebenkosten, sinkt der prozentuale Anteil weiter. Der *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) geht von begrenzten Kostensteigerungen von weniger als einem Prozent aus, die auf kohlenstoffarmen Zement- und Stahlprodukten basieren (Bashmakov et al., 2022). Wie Abbildung 19 illustriert, können solche Zahlen daher auch für Deutschland erwartet werden.

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Kohlenstoffemissionen besteht darin, Baumaterialien zumindest teilweise durch Holz zu ersetzen (Kapitel 2.1.2).

Dies hat Auswirkungen auf die Gestaltung des Gebäudes und kann daher nicht einfach durch einen Vergleich auf Materialebene erfasst werden. Es sind unterschiedliche Austauschstufen möglich. Auf der untersten Ebene sind Holzdachkonstruktionen bei Einfamilienhäusern (EFH) bereits weit verbreitet. Laut Experteninterviews sind Holzdächer in den meisten Fällen kostengünstiger als Betondächer. Hybride Holz-Beton-Strukturen stellen eine zweite Ebene dar, allerdings sind die Daten und Erfahrungen begrenzter. Deutsche Beispiele und Berichte zu dieser Bauweise reichen von niedrigeren oder vergleichbaren Kosten pro Quadratmeter (Landkreis Karlsruhe und SBP Architekten, 2022; Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2020) bis hin zu einer Kostensteigerung von bis zu 10 bis 20 Prozent (Kalusche, 2023a). Schließlich sind

Bauweisen mit hohem Holzanteil wie bei Holzleichtbau- oder Massivholzgebäuden von EFH bis hin zu größeren Projekten möglich. Allerdings gibt es auch hierzu nur wenige direkte Kostenvergleiche. Die Analyse von acht Bauprojekten im Vereinigten Königreich, bei denen Ramboll Ökobilanzen und Szenarioanalysen zum CO₂-Fußabdruck durchführte, zeigt, dass die Kosten pro Quadratmeter für zwei Holzgebäude dem Durchschnitt von Stahlbetongebäuden sehr ähnlich sind, selbst für mehrstöckige Gebäude (Ramboll, 2023).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bereits heute mit geringem Mehraufwand nennenswerte Emissionsminderungen erreicht werden können.

Der Bau eines Gebäudes mit klimafreundlichen Materialien würde im Vergleich zu herkömmlichen Projekten etwa ein Prozent höhere Kosten verursachen. Auch wenn sie heute noch teurer sind, werden klimafreundliche Materialien mit der Zeit die kosteneffektive Wahl sein. Letztlich ist es auch

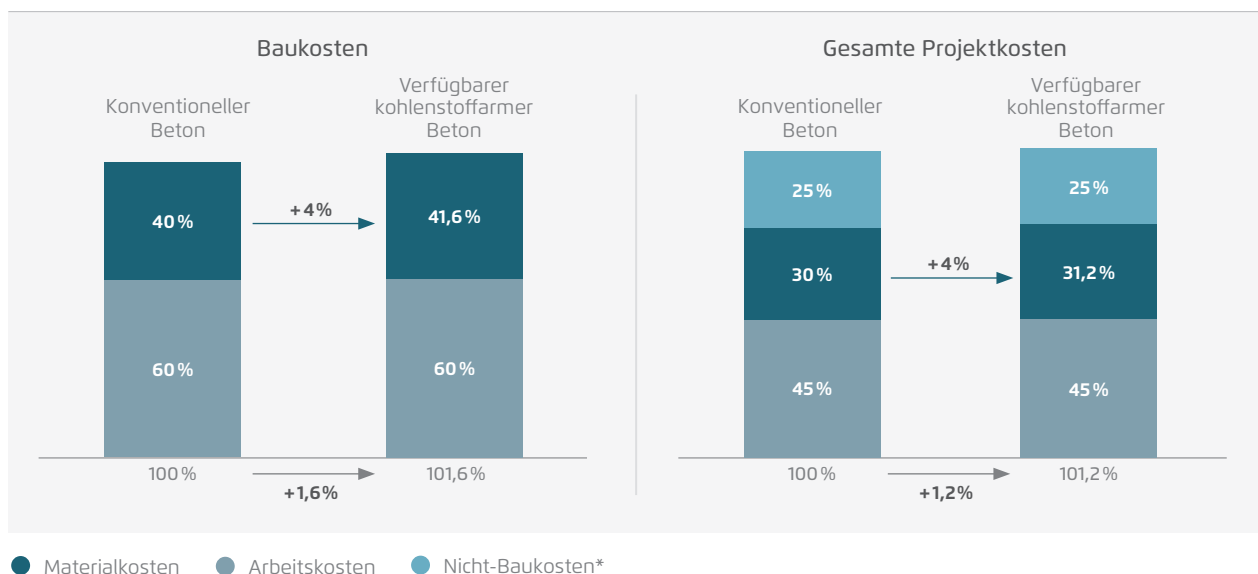
interessant, diesen leichten Kostenanstieg mit anderen, nicht klimarelevanten Baumaßnahmen zu vergleichen. Zum Beispiel kann bereits die Wahl der Fassadenverkleidung zwischen Putz-, Holz- und Klinkerfassade bei einem Einfamilienhaus einen Kosteneffekt von zwei bis drei Prozent haben (Hausbaugrundriss, 2023).

Unsere bisherige Analyse hat aufgezeigt, in welchem Umfang ECE reduziert werden müssen und welche Möglichkeiten hierfür zur Verfügung stehen. Da der Markt allein diese Aufgabe nicht bewältigen kann, ist der Einsatz politischer Instrumente erforderlich. Zudem wurde deutlich, dass die Dekarbonisierung der Industrie nur durch geeignete Anreize vorangetrieben werden kann. Dazu braucht es eine Kombination unterschiedlicher Politikinstrumente.

Im Folgenden wird untersucht, welche Instrumente bereits implementiert sind, und darauf basierend ein Vorschlag für geeignete Maßnahmen in Deutschland abgeleitet.

Vergleich der Bau- und Gesamtkosten von konventionellem Beton und verfügbaren kohlenstoffarmen Betonalternativen

→ Abb. 20



Agora Industrie und Ramboll (2024). Schätzungen für 2030. *Nicht-Baukosten fassen Kosten für Grundstückskauf, Finanzierung, Genehmigungen und weitere Nebenkosten zusammen. Sie werden hier mit 25% geschätzt. Der relative Anteil von Material- und Arbeitskosten wurde entsprechend jeweils um 25% reduziert.

4 Der politische Rahmen für Embodied-Carbon-Emissionen in Europa und Deutschland

Aufgrund der klimapolitischen Brisanz und industriepolitischer Chancen lässt sich auf europäischer Ebene (Kapitel 4.1) eine zunehmende politische Bearbeitung von ECE durch verschiedene Instrumente erkennen, die auch dabei helfen, Leitmärkte zu schaffen. Insbesondere die Novellierung der Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) und die damit anstehende Umsetzung in nationales Recht schafft dabei ein positives Momentum. Die Ausgangsvoraussetzungen in Deutschland für eine ordnungsrechtliche Regelung sind bereits vorhanden (Kapitel 4.1). Dafür kann Deutschland von der erfolgreichen Umsetzung von ECE-Regulierungen in anderen EU-Ländern lernen (Kapitel 4.3).

4.1 Politische Instrumente in der EU und Deutschland

Verschiedene politische Instrumente auf EU- und nationaler Ebene haben Einfluss auf die ECE von Gebäuden und beeinflussen auch das Wachstum eines Leitmarktes für klimafreundliche Materialien. Das EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) und das CO₂-Grenzausgleichssystem (CBAM) schaffen **finanzielle Anreize für die Umstellung auf neue, emissionsarme Produktionsprozesse**. Unternehmen sowie Bauherr:innen werden bereits heute mit **finanziellen Mitteln für den Einsatz von klimafreundlichen Materialien** unterstützt (Kapitel 4.1.1). Auch stellen der Bund und die EU schon aktuell **eine Datenbank und ein Tool als Grundlage für die Quantifizierung von ECE** zur Verfügung (4.1.2). Ebenso bestehen verschiedene Initiativen, **Klimafreundlichkeit von Materialien und Gebäuden transparent zu machen** (Kapitel 4.1.3). Die EU EPBD führt aktuell neue Anforderungen für die ECE von Neubauten ein, jedoch fehlen bislang verbindliche Vorgaben zur Reduktion von ECE im deutschen Rechtsrahmen (Kapitel 4.1.4).

4.1.1 Finanzielle Anreize für die Herstellung und den Einsatz von klimafreundlichen Materialien

4.1.1.1 EU

Auf Produktionsebene sollen das 2023 überarbeitete EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) und das CO₂-Grenzausgleichssystem (CBAM) Investitionen in die Produktion klimafreundlicher Baumaterialien fördern (EU-Richtlinie 2023/95). Ein solcher Anreiz soll durch die Erhöhung der Preise für stark emissionsverursachende Güter geschaffen werden. Das EU-Emissionshandelssystem erfordert nun eine Reduktion der Emissionen aus den erfassten Sektoren um 62 Prozent bis zum Jahr 2030, wobei die kostenlose Vergabe von Zertifikaten an die Industrie schrittweise von 2026 bis 2034 reduziert werden soll (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2023). Diese Maßnahmen zielen speziell auf Sektoren wie Zement, Eisen und Stahl sowie Aluminium ab, die für die Bauindustrie von entscheidender Bedeutung sind. Indem Anreize für die Einführung emissionsärmerer Alternativen in der Bau- und Verarbeitungsindustrie geschaffen werden, werden diese Auflagen die Materialauswahl beeinflussen und die Verwendung klimafreundlicher Alternativen fördern, wodurch die Embodied-Carbon-Emissionen in Gebäuden reduziert werden.

4.1.1.2 Deutschland

Carbon Contracts for Difference (CCfDs) (BMWK, 2024b) und das zinsvergünstige Kreditprogramm der Förderbank KfW „Klimaschutzoffensive für Unternehmen“ (KfW, o. J.) unterstützen in Deutschland die Industrie beim Umstieg auf klimaneutrale Produktionsprozesse.

Ein zentrales **Förderinstrument zur Dekarbonisierung des Gebäudebereichs** – also indirekt der ECE – ist die „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ (BEG) mit dem Teilprogramm „Klimafreundlicher Neubau“ (KFN) und dem bundeseigenen Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG). Das QNG ist ein freiwilliges Qualitätssiegel für die Nachhaltigkeit von Gebäuden, das die ökologischen, ökonomischen, technischen, prozessualen, soziokulturellen und funktionalen Qualitäten eines Gebäudes betrachtet. Zu seinen 17 Kriterien gehören auch die THG-Emissionen über den Lebenszyklus eines Gebäudes, also sowohl die ECE als auch die Emissionen aus der Nutzungsphase. Für die THG-Emissionen unterscheidet das QNG zwei Qualitätsstufen mit unterschiedlichen Benchmarks für Wohngebäude und fünf Nichtwohngebäudeklassen. In der Stufe QNG-PLUS dürfen die THG-Emissionen im Gebäudelebenszyklus maximal $24 \text{ kg CO}_{2-\text{Äq}}/\text{m}^2\text{a}$, in der Stufe QNG-PREMIUM maximal $20 \text{ kg CO}_{2-\text{Äq}}/\text{m}^2\text{a}$ betragen.

Im Förderprogramm KFN gibt es zwei Förderstufen. In der ersten Stufe, *Klimafreundliches Wohngebäude*, müssen geförderte Gebäude den Effizienzhaus-40-Standard erfüllen, dürfen nicht mit fossilen Energieträgern beheizt werden und müssen die Anforderungen der QNG-PLUS-Stufe zum THG-Ausstoß über den Lebenszyklus erfüllen. In der zweiten Stufe, *Klimafreundliches Wohngebäude mit QNG*, müssen Gebäude zusätzlich die übrigen Anforderungen des QNG-Plus oder QNG-PREMIUM erfüllen, bestätigt durch ein Nachhaltigkeitszertifikat. Die Abwicklung erfolgt über die KfW mit attraktiven zinsvergünstigten Krediten mit je nach Stufe 100.000 Euro beziehungsweise 150.000 Euro förderfähigen Kosten.

Als positive Wirkung daraus ergibt sich ein stärkerer Einsatz nachwachsender Rohstoffe für tragende Elemente und Dämmstoffe bei QNG-zertifizierten Gebäuden (Heinrich et al., 2024) (Abbildung 21). Gleichzeitig können alle an entsprechenden Bauprojekten Beteiligten schon Erfahrungen mit Ökobilanzen sammeln.

Neben der Bundesförderung gibt es einzelne Bundesländer und Kommunen, die den Einsatz emissionsarmer, nachwachsender oder zertifizierter Baustoffe

(zum Beispiel „Blauer Engel“ oder „natureplus“) zusätzlich fördern. Dies ist zum Beispiel in München der Fall (Stadtverwaltung der Landeshauptstadt München, o. J.).

Neben den finanziellen Anreizen finden sich weitere Bemühungen, den Umstieg auf klimafreundlichere Baustoffe zu erleichtern beziehungsweise anzu- stoßen. Zum einen soll mit der Holzbauinitiative des Bundes der Holzbau in mehreren Handlungsfeldern gestärkt werden (BMWBS und BMEL, 2023). Analog greifen dies auch einzelne Bundesländer auf und haben Holzbauoffensiven ausgerufen, zum Beispiel Baden-Württemberg und Bayern. In der Vergangenheit standen weitere Förderprogramme für die gesamte Innovationskette von klimafreundlichen Leichtbaumaterialien zu Verfügung.²⁴ Daten zur Klimafreundlichkeit von Materialien bereitstellen

4.1.1.3 EU

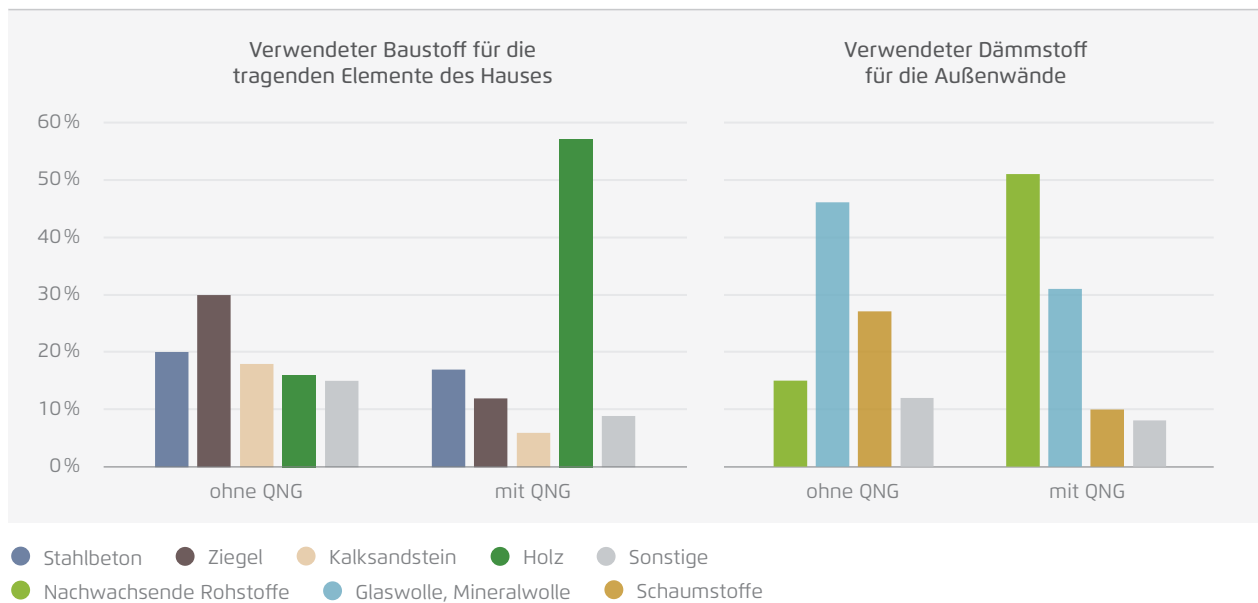
Die EU hat Normen entwickelt, die allgemeine Regelungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden (DIN EN 15978) sowie für Umweltproduktdeklarationen (EPDs) für Baumaterialien (DIN EN 15804) vorgeben.

Für die **Berechnung der Umweltauswirkungen von Gebäuden** sind Informationen über den Fußabdruck der verwendeten Produkte und Materialien über den gesamten Lebenszyklus erforderlich – oder zumindest über die Lebenszyklusabschnitte, die in eine mögliche gesetzliche Berichterstattung und Grenzwertberechnung einbezogen werden. Daher ist die Verfügbarkeit und Qualität dieser Daten eine wichtige Voraussetzung, um ECE zu regulieren und die Ökobilanzierung von Gebäuden vorschreiben zu können. Zwei Haupttypen von Daten bilden die Grundlage für die Durchführung von Ökobilanzen:

²⁴ Das Technologietransfer-Programm Leichtbau des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) bestand von Mai 2020 bis Oktober 2023 mit einem Fördervolumen von 351 Millionen Euro. Die Projekte sind meist über drei Jahre angelegt und haben Laufzeiten bis 2027 (BMWK, 2024c).

Einfluss der QNG-Förderung auf die Materialwahl für tragende Elemente des Hauses und Dämmstoffe für die Außenwände

→ Abb. 21



Agora Industrie und ifeu (2024) basierend auf Heinrich et al (2024). Angegeben sind die Anteile der befragten BEG-Zuwendungsempfängenden. QNG = Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude; BEG = Bundesförderung für effiziente Gebäude

→ **Generische Datensätze** über die Umweltauswirkungen von Produkten und Materialien liefern Informationen zu einer Produktgruppe (zum Beispiel einer bestimmten Betonart), nicht jedoch zu den spezifischen Produkten, die in dieser Gruppe erhältlich sind (zum Beispiel Beton, der mit Zement eines bestimmten Herstellers hergestellt wurde). Generische Daten werden normalerweise auf Grundlage allgemeiner Produktionsannahmen oder der gängigsten Produkte erstellt. Diese Art von Daten umfasst häufig Unsicherheits- oder Konservativitätsfaktoren, um zu berücksichtigen, dass es Produkte mit schlechterer Klimabilanz gibt. Ein großer Vorteil allgemeiner Daten zum ökologischen Fußabdruck besteht jedoch darin, dass sie den Vergleich von Designoptionen in einem frühen geplanten Stadium ermöglichen, in dem alternative Designs noch in Betracht gezogen werden können, jedoch genaue Kenntnisse über die verwendeten Materialien fehlen. Durch generische Daten können auch Informationslücken überbrückt werden, wenn herstellersistenspezifische Daten noch nicht verfügbar sind. Aus diesem Grund sind generische

Daten ein notwendiger Ausgangspunkt für die Bewertung der Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus.

→ **Spezifische Datensätze** liefern hingegen Informationen zu einem bestimmten Produkt eines Herstellers. Die übliche Form der Offenlegung dieser Daten sind Umweltproduktdeklarationen (EPDs), die vom Hersteller des Produkts erstellt und von Dritten überprüft werden.²⁵ Diese Art von Daten ermöglicht die Berechnung wesentlich genauerer Ergebnisse, sobald die spezifischen Materialien und deren Volumina bekannt sind. Aus diesem Grund eignen sie sich für abschließende Berechnungen nach Bauabschluss besser als generische Daten. In diesem Fall sind nach der Bauausführung die tatsächlichen Materialmengen und -hersteller bekannt und können mit den jeweiligen EPDs abgeglichen werden. Dies liefert

²⁵ EPDs liefern spezifische Daten für Bauprodukte, können aber in Teilen selbst generische Daten enthalten, um Annahmen zu Nutzungs- und End-of-Life-Studien abzubilden.

ein viel genaueres Bild der ECE. Allerdings können die Emissionen zu diesem Zeitpunkt nicht mehr reduziert werden. Zudem können spezifische Daten aber auch in der Entwurfsphase verwendet werden, etwa beim Vergleich von Materialtypen oder Beschaffungsoptionen.

Das Format beider Datentypen ist in einer europäischen Norm, DIN EN 15804, definiert. Sie existiert seit 2012 und wurde im Jahr 2022 mit Änderungen an den erforderlichen Indikatoren aktualisiert. Die Erweiterung +A2 ist nun die Grundlage für neue Umweltproduktdeklarationen. Als eine der wichtigsten Aktualisierungen schlüsselt die neue Version das globale Treibhauspotenzial eines Produkts detailliert nach fossilen Emissionsquellen, biogenen Quellen und Emissionen aus Landnutzungsänderungen auf. Um eine genaue Berechnung des Treibhauspotenzials zu ermöglichen, ist eine ausreichende Datengrundlage entsprechend der neuen Erweiterung erforderlich.

Die erforderliche Dateninfrastruktur zu CO₂-Emissionen von Baumaterialien sowie **Berechnungs- und Berichterstattungsleitlinien** werden derzeit auch auf der Materialebene entwickelt. Die überarbeitete Bauprodukteverordnung (BauPVO) wird die Hersteller verpflichten, die Umweltauswirkungen ihrer Produkte, wie Zement und andere Baumaterialien, während ihres gesamten Lebenszyklus durch Umweltproduktdeklarationen (EPDs) offenzulegen (EP, 2024c).²⁶ Der Zeitplan für die Umsetzung der aktualisierten BauPVO sieht Schritte bis in die 2040er-Jahre vor, um alle wichtigen Produktgruppen abzudecken. Produkte, die in kleineren Mengen verwendet werden, werden jedoch möglicherweise überhaupt nicht abgedeckt.

Auf der Gebäudeebene schreibt die Novellierung der Richtlinie über die Gesamteffizienz von Gebäuden (EPBD) die **Berechnung und Offenlegung der Lebenszyklusemissionen neuer Gebäude** (ab 2028

beziehungsweise 2030, je nach Gebäudegröße) auf der Grundlage bestehender Standards verbindlich vor.²⁷ Diese Lebenszyklusemissionen sollen zukünftig im Energieausweis (EPC) des Gebäudes angegeben werden. Auf Basis des Bewertungstools *Level(s)*²⁸ und der Norm DIN EN 15978 wird ein freiwilliger **Bewertungsrahmen für die Berechnung der Lebenszyklusemissionen neuer Gebäude** entwickelt. Eine komplette Angleichung von zuvor eingeführten Methodiken ist nicht vorgesehen. Allerdings wird der Wert von Harmonisierung der Herangehensweisen in Bezug auf zentrale Parameter, wie Lebenszyklusphasen, Funktionseinheiten oder der Definition von Grenzwerten auf EU-Ebene, hervorgehoben (Europäisches Parlament, 2024b).

Die EU-Taxonomie ist ebenfalls relevant, da sie die **Offenlegung der Lebenszyklus-THG-Emissionen und des CO₂-Fußabdrucks für große Bauprojekte** gegenüber Investor:innen sowie Kundinnen und Kunden verlangt (Europäische Kommission, 2020). Die EU-Taxonomie richtet sich in erster Linie an Investor:innen und Vermögensverwalter:innen, unterstützt nachhaltige Investitionen und fördert dadurch umweltfreundliche Bauweisen.

4.1.1.4 Deutschland

Deutschland ist in der komfortablen Situation, über Datenquellen und einen darauf aufbauenden Berechnungsrahmen zu verfügen. Die Datenbank ÖKOBAUDAT enthält Ökobilanz-Datensätze zu Baumaterialien und allen Lebenszyklusphasen. Sie existiert seit 2006 unter dem Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauen (BMWSB) und seinen Vorgängern. Sie ist im Laufe der Zeit gewachsen und umfasst mittlerweile etwa 1.300 Dateneinträge gemäß DIN EN 15804+A2, wobei etwas mehr

²⁶ Dies gilt für Produkte, die entweder durch eine von einer europäischen Standardisierungsbehörde entwickelte Richtlinie oder durch Europäische Technische Bewertungen (ETAs) abgedeckt sind.

²⁷ Ab 2028 für große Gebäude mit mehr als 1.000 Quadratmetern und ab 2030 für alle Gebäude.

²⁸ *Level(s)* ist ein von der Europäischen Kommission eingeführter standardisierter Bewertungsrahmen für die Nachhaltigkeitsperformance von Wohn- und Bürogebäuden und für die Berichterstattung über diese Performance. *Level(s)* verwendet sechs zentrale Nachhaltigkeitsindikatoren zur Messung der Auswirkungen von CO₂, Materialien, Wasser, Gesundheit, Wohnkomfort und Klimawandel während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes (Europäische Kommission, 2024b).

als die Hälfte generische und der Rest spezifische Daten (inklusive EPDs) sind. Die ÖKOBAUDAT enthält generische Datensätze, die für deutsche Baustoffe in acht Produktkategorien und für die deutschen Bauprozesse repräsentativ sind. Die verfügbaren Daten decken ein breites Spektrum gängiger Materialien und Bauelemente ab, was eine ausreichende Datengrundlage für konventionelle Baupraktiken bietet.

Neben den Daten selbst spielen Berechnungssoftwaretools eine wichtige Rolle dabei, diese Daten für Ökobilanzen nutzbar zu machen. Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) stellt hierfür das kostenlose Online-Tool eLCA zur Verfügung. Zudem sind in den letzten Jahren immer mehr solcher Tools von deutschen und internationalen Unternehmen verfügbar geworden, sodass das Angebot mittlerweile mehr als 20 Tools umfasst (DGNB, 2024). EPD-online zum Beispiel ist eine von der Industrie geführte Initiative, die verifizierte EPDs in einer eigenen Datenbank mit derzeit 1.800 Einträgen sammelt, wobei Überschneidungen mit der ÖKOBAUDAT vorhanden sind. Für internationale Produkte hat EcoPlatform eine Vielzahl von EPDs gesammelt, wiederum mit Überschneidungen zu EPD-online und ÖKOBAUDAT für deutsche Produkte. Diese Situation schafft einen guten Ausgangspunkt, um bei einer Berechnung stärker spezifische Daten zugrunde legen zu können.

4.1.2 Bewertung der Klimafreundlichkeit von Materialien und Gebäuden

4.1.2.1 EU

Die EU – durch die überarbeitete Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (*Ecodesign for Sustainable Products Regulation*, ESPR) – führt zurzeit die Nutzung eines **digitalen Produktpasses (DPP)** ein, um den Austausch von Informationen zwischen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette des Produkts zu ermöglichen, einschließlich klimarelevanter Aspekte. Der DPP soll für Produkte wie Eisen und Stahl, Aluminium, Chemikalien, Zement und Beton sowie andere Baumaterialien gelten

(Europäisches Parlament, 2024a). Dies stellt den Kernpunkt zur **Zentralisierung und Standardisierung des Informationsaustauschs entlang der Wertschöpfungskette der Materialien** dar und wird dazu beitragen, dass umweltfreundlichere Materialien als solche vermarktet und von konventionellen Produkten unterschieden werden können.

4.1.2.2 Deutschland

Sowohl der Koalitionsvertrag 2021 als auch die Leichtbaustrategie verweisen auf die Einführung eines **digitalen Gebäuderessourcenpasses** (BMWK, 2023). In ihm könnten in Ergänzung zum Energieausweis die wichtigsten Informationen über alle Lebenszyklusphasen eines Gebäudes zentral dokumentiert und kommuniziert werden. Er würde vor allem auch zukünftig zur Reduktion von ECE beitragen, weil Eigentümer:innen, Planende und Bauausführende Aufschluss darüber bekommen, welche Materialien verbaut sind und ob und wie diese wiederverwendet oder recycelt werden könnten (DGNB, o. J.).

Darüber hinaus findet die Berechnung und Reduktion von ECE freiwillig aufgrund des Wunschs oder Ziels von einzelnen Bauherr:innen nach ökologischeren Bauweisen statt. Einen Anreiz stellen dafür (auch) **Nachhaltigkeitszertifizierungen**, wie das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), die Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG), das Gütesiegel der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) oder das Qualitätssiegel Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh) dar, bei denen die Ökobilanz ein Teilkriterium darstellt.

Im Konzept des BMWK ist ein Baustein zur Schaffung von Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe die Einführung von **freiwilligen privatwirtschaftlichen Label- und Kennzeichnungssystemen** für klimafreundliche Grundstoffe. Das BMWK hat dazu im Stakeholder:innenprozess Definitionen mitentwickelt und sieht mittelfristig die Möglichkeit, „auf nationaler Ebene offiziell anerkannte umweltbezogene Kennzeichnungen (nach DIN EN ISO 14024)“ zu entwickeln (BMWK, 2024a). Mit dem *Low Emission*

Steel Standard (LESS) wurde von der Wirtschaftsvereinigung Stahl bereits ein erstes Label vorgelegt (WV Stahl, 2024). Ähnliche Entwicklungen schreiten im Bereich Zement durch den Verein Deutscher Zementwerke voran (BMWK, 2024a). Diese Kennzeichnungen können die weitere Regulierung von ECE vorantreiben beziehungsweise erleichtern, da harmonisierte Kennzeichnungs- und Bilanzregeln auf Materialebene zur Verfügung stehen.

In diesem Zusammenhang ebenfalls zu nennen ist eine **Richtlinienentwicklung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb)**, welche im Juli 2023 zunächst als Entwurfsfassung der Fachöffentlichkeit vorgestellt wurde (DAfStb, 2024a und 2024b). Diese Richtlinie definiert sogenannte Treibhausgas-Minderungsklassen – das heißt prozentuale CO₂-Reduktionen gegenüber einem Referenzzustand, der repräsentativ für das Jahr 2020 gewählt wurde. Betrachtet werden dabei alle Embodied-Carbon-Emissionen, die zur Errichtung und Entsorgung eines Tragwerks aus Beton erforderlich sind, das heißt Emissionen aus den Lebenszyklusphasen A1 bis A3 sowie C3 und C4 gemäß DIN EN 15804. Für ausgewählte Bauwerkstypen, wie zum Beispiel Wohn- und Bürogebäude, werden zusätzlich explizite Angaben zu den Referenzemissionen als Hilfestellung angegeben. In fünf einfachen Schritten können Planerinnen und Planer durch Anwendung der Richtlinie nachweisen, dass ihre Planung beziehungsweise das realisierte Bauwerk die vertraglich vereinbarte Treibhausgas-Minderungsklasse einhalten, ohne dabei die anderen Schutzziele wie Sicherheit oder Dauerhaftigkeit zu gefährden. An der Entwicklung der DAfStb-Richtlinie waren alle für den Betonbau in Deutschland maßgeblichen Verbände und Institutionen beteiligt. Zudem wurde in der erfolgten Öffentlichkeitsbeteiligung große Zustimmung zum vorliegenden Konzept deutlich.

4.1.3 Ziele und Anreize für die Verwendung klimafreundlicher Materialien und Produkte

4.1.3.1 EU

Die EU-Mitgliedstaaten sind durch die novellierte Gebäuderichtlinie (EPBD, EU/2024/1275) verpflichtet, bis 2027 über nationale Fahrpläne **Grenzwerte für die Lebenszyklusemissionen von Neubauten** einzuführen. Ab 2030 sollen die nationalen Grenzwerte gelten und im Einklang mit dem EU-Ziel der Klimaneutralität schrittweise verschärft werden (Europäisches Parlament, 2024b). Dieser Ansatz stützt sich auf die Erfahrungen mehrerer Mitgliedstaaten und wird schrittweise eingeführt, um im Laufe der Zeit eine ausreichende Datenverfügbarkeit zu gewährleisten.²⁹ Dies ist von entscheidender Bedeutung, um Planungssicherheit für alle Beteiligten sowie den notwendigen Kompetenzaufbau in Universitäten, Behörden und anderen Prüfinstitutionen zu schaffen.

Zudem wird die EU ab 2026 im Rahmen der überarbeiteten BauPVO **verbindliche Nachhaltigkeitsanforderungen für Baumaterialien bei öffentlichen Beschaffungsprojekten** einführen (Europäisches Parlament, 2024c). Die Kriterien hierfür sollen auf Grundlage einer Wirkungsanalyse der Kommission festgelegt werden. Wenn diese ambitioniert festgesetzt werden, können sie die Reduktion der Embodied-Carbon-Emissionen in Gebäuden unterstützen und Anreize für den Ausbau von Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe schaffen. Etwaige Nachhaltigkeitsanforderungen an Baustoffe können jedoch aufgehoben werden, wenn die Kosten für deren Einsatz mindestens 10 Prozent höher sind als bei der Beschaffung konventioneller Baumaterialien (Europäisches Parlament, 2024c). Für die Materialebene ist dieser Schwellenwert relativ niedrig angesetzt, je nachdem, wie die Materialkosten berechnet werden.

²⁹ Dabei ist zu beachten, dass die EPBD für den Neubau zusätzlich „Zero Emission onsite“ (keine CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen am Standort des Gebäudes) sowie einen maximalen Schwellenwert für den Energiebedarf in der Nutzungsphase fordert.

Im Rahmen der geplanten ESPR sollen **EU-Anforderungen an die Leistung von Grundstoffen wie Stahl, Zement oder Chemikalien formuliert werden**. Die Anforderungen befinden sich derzeit noch in der Konzeptionsphase – ein ausreichendes Ambitionsniveau wird hier eine entscheidende Rolle spielen. Die Anforderungen sollen den gesamten Lebenszyklus eines Produkts und Aspekte wie Materialverbrauch, Energie- und Ressourceneffizienz, Robustheit, Reparaturfähigkeit und Wiederverwendbarkeit abdecken. Hierbei werden Materialien mit dem größten CO₂-Fußabdruck, wie zum Beispiel Eisen, Stahl, Aluminium und Chemikalien, vorrangig behandelt. Wie umfangreich die künftigen Anforderungen sein werden, muss von der Europäischen Kommission noch bestimmt werden. Daher ist es elementar, dass diese Anforderungen den notwendigen Umfang widerspiegeln, um den Markt für klimafreundliche Materialien und Produkte effektiv zu erweitern (Europäisches Parlament, 2024a).

Außerdem entwickelt die EU-Kommission derzeit einen EU-weiten **Fahrplan für die Verringerung der Lebenszyklusemissionen im Gebäudesektor**, welche mehr Daten in allen Mitgliedstaaten erfasst und das Bewusstsein für die Reduktion der ECE im Gebäudesektor stärken soll (siehe Le Den et al., 2023).

4.1.3.2 Deutschland

An verschiedenen Stellen finden sich zwar Zielsetzungen zur zukünftigen politischen Instrumentierung für ECE, **konkrete Beschlüsse haben sich hieraus jedoch bisher nicht ergeben**. Für die Dekarbonisierung des Gebäudebereichs stellt bislang das Gebäudeenergiegesetz (GEG) das zentrale ordnungsrechtliche Instrument dar. Es fokussiert allerdings auf die Emissionen aus der Nutzungsphase und stellt keine Anforderungen an die ECE. Der nach § 7 Abs. 5 GEG vorgelegte Bericht konstatiert gute Ausgangsvoraussetzungen für die Einführung von Ökobilanzierungen im Bau- und Gebäudebereich und benennt Entscheidungsbedarfe, die auch in dieser Studie thematisiert und teilweise beantwortet werden (BMWK und BMWSB, 2023).

Indirekt stellt die verpflichtende Umsetzung eines **Mindeststandards im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)** für Bundesbauten einen Dekarbonisierungsanreiz dar. Dabei werden Baumaßnahmen des Bundes – und freiwillig auch anderer öffentlicher Institutionen – im Rahmen seiner Vorbildfunktion hinsichtlich der Nachhaltigkeit in einer gesamtheitlichen Betrachtung bewertet. Die ECE spielen dabei im Kriterium „Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt“ eine Rolle. Das Treibhauspotenzial (GWP) fließt mit einem Anteil von rund vier Prozent in die Gesamtbewertung ein.

Die öffentliche Hand versucht ihrer Vorbildfunktion zukünftig auch in der Beschaffung gerecht zu werden. Die sich derzeit in Erarbeitung befindliche Reform des Vergaberechts („Vergabetransformationspaket“) soll Verbindlichkeit bei der Berücksichtigung von Nachhaltigkeits- und Klimaschutzkriterien schaffen (BMWK, 2024c).

Mit den Leitlinien für den sogenannten Gebäudetyp E hat das Bundesbauministerium vor, innovatives Bauen jenseits des strengen Regelkorsetts zu ermöglichen. Künftig sollen Bauherr:innen und Bauunternehmen sich darauf einigen können, auf bestimmte Standards zu verzichten, die nicht unbedingt notwendig sind – solange die Qualität und die Sicherheit der Gebäude nicht beeinträchtigt wird (BMWSB, 2024). Zum anderen sind weitere Maßnahmen in Vorbereitung, zum Beispiel durch die Stärkung von Wiederverwendung und Recycling in der Baubranche in der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) oder ein CO₂-Schattenpreis bei der Vergabe (BMUV, 2023).

4.2 Bestehende Herausforderungen

Trotz der vorgenannten Ausgangsvoraussetzungen werden ECE bislang in den politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland unzureichend berücksichtigt (Abbildung 22). Zwar lassen sich verschiedene Instrumente identifizieren, die einen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten, doch fehlt es

an konkreter politischer Verankerung und einer rechtsverbindlichen Definition – und damit auch an Messbarkeit, Planbarkeit und Verbindlichkeit. Aufgrund der Verantwortungsteilung im Planungs- und Bauwesen besteht auf allen Ebenen – national, föderal und kommunal – Handlungsbedarf, um diese Lücke zu schließen. Gleichzeitig sind durch die bestehende Förderlandschaft, durch Zertifizierungssysteme für öffentliche (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen BNB) und private Gebäude (QNG, DGNB, NaWoh, Leed, Breeam) sowie durch vorhandene Datenbanken (ÖKOBAUDAT) und Tools (eLCA) die methodischen und technischen Voraussetzungen zur Einführung einer verpflichtenden Betrachtung und Minderung von ECE in Deutschland bereits heute grundsätzlich vorhanden (BMWK und BMWSB, 2023).

Trotz des bestehenden politischen Rahmens bleiben wesentliche Herausforderungen bestehen:

→ **Kein ausreichender Dekarbonisierungsanreiz** bezüglich ECE:

- Im QNG liegt dies insbesondere daran, dass lediglich Anforderungen an die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus gestellt werden und keine separaten Vorgaben für Nutzung und Herstellung bestehen sowie dass selbst produzierter Photovoltaik-Strom angerechnet werden kann. Es deutet sich an, dass die Zielwerte vergleichsweise einfach erreicht werden können (Graaf und Broer, 2023). So sind rund 17 Prozent der neuen Wohneinheiten im Zeitraum von März bis Dezember 2023 gefördert worden (Bücker, 2023; Destatis, 2024).
- Bisher ist das Interesse an Nachhaltigkeitszertifizierungen in Deutschland nicht ausreichend, um eine klimazielfunktionale Dekarbonisierung zu erreichen. Freiwilligkeit allein wird den komplexen Herausforderungen und den langen Investitions-, Planungs- und Bauzyklen der Branche nicht gerecht.

→ **Frage der Ambition:** Die EPBD enthält keine konkreten künftigen Zielvorgaben für ECE in neuen Gebäuden. Es ist möglich, dass die gesetzlichen Ziele der Nachhaltigkeitsanforderungen an die Produktgruppen und Baumaterialien und die

Anforderungen an die öffentliche Beschaffung (Kapitel 4.1.4) zu gering angesetzt sind, um die nötigen zusätzlichen Investitionen zur Ausweitung des Leitmarktes für emissionsarme Grundstoffe zu mobilisieren.

→ **Nicht harmonisierte Bewertungsmethoden:** Es gibt keine harmonisierte Berichtsmethodik, um die Lebenszyklusemissionen eines Gebäudes zu bewerten, da der Berichtsrahmen Level(s) und die DIN EN 15978 freiwillig sind (siehe Europäische Kommission, 2024b). Das bedeutet, dass verschiedene Unternehmen verschiedene auf dem Markt erhältliche Instrumente für Umweltleistungserklärungen (EPDs) mit leicht unterschiedlichen Methoden verwenden können. Die Europäische Kommission wird eine Berechnungsmethode für die Lebenszyklusemissionen für die Umsetzung der EPBD entwickeln, die jedoch nicht verpflichtend sein wird (Europäisches Parlament, 2024b).

→ **Praktische Anwendung von EPDs:** In der Praxis werden die allgemeine Richtlinie für die Erstellung von EPDs (EN 15804) und die produktspezifischen Bestimmungen für die Durchführung von EPD-Berechnungen (*Product Category Rules*, PCR) unterschiedlich ausgelegt. Dies ist auf vage Regeln und Szenarien (zum Beispiel deklarierte Einheiten und *End-of-Life*-Szenarien) sowie auf die selektive und/oder unsachgemäße Verwendung von Daten zurückzuführen. Ein harmonisierter Ansatz für die praktische Anwendung der Richtlinie fehlt noch immer (BPIE, 2021).

→ **Harmonisierte internationale Kennzeichnungssysteme fehlen:** Auf internationaler Ebene erschwert das Fehlen international harmonisierter Kennzeichnungssysteme für Materialien (zum Beispiel Stahl, Zement) die Vergleichbarkeit der gehandelten Grundstoffe (Agora Industrie, 2023).

→ **Begrenzter Anwendungsbereich** der privatwirtschaftlichen Labels: Die Entwicklung freiwilliger privatwirtschaftlicher Label- und Kennzeichnungssysteme für andere klimafreundliche Grundstoffe (Zement, Beton, Kunststoffe) steht noch aus (Agora Industrie, 2023).

Politischer Rahmen und Herausforderungen zur Regulierung von Embodied-Carbon-Emissionen

→ Abb. 22

	Produktion klimafreundlicher Materialien	Nutzung klimafreundlicher Materialien in Gebäuden
Ziele und Anreize für die Verwendung klimafreundlicher Materialien und Produkte	Nachhaltigkeitsanforderungen an Produktgruppen (ESPR und BauPVO)	- Einführung von Embodied-Carbon-Grenzwerten (EPBD); Mindeststandards im BNB für Bundesbauten; - Anforderungen an öffentliche Beschaffung (AVV Klima, BauPVO) - Wiederverwendung und Recycling (NKWS), Leichtbastrategie
	Anforderungen unklar bzw. Risiko, dass Anforderungen nicht ambitioniert umgesetzt werden	- Anforderungen an Einführung von CO₂-Grenzwerten aus EPBD müssen umgesetzt werden - Anreize für die öffentliche Beschaffung fehlen - Fehlende Anreize zur Kreislaufwirtschaft im Bausektor
Klimafreundlichkeit von Materialien bewerten	Digitaler Produktpass (ESPR); privatwirtschaftliche Label- und Kennzeichnungssysteme, z. B. LESS	Gebäuderessourcenpass; Zertifizierungssysteme (BNB, QNG, DGNB, NaWoh); Richtlinien (DAfStb)
	Fehlende (international) standardisierte Labelsysteme für Materialien (z. B. Stahl, Zement) erschweren Vergleichbarkeit	Bewertungssysteme sind zu wenig differenziert und nicht spezifisch mit einem Klimaneutralitätsziel für Gebäude vereinbar
Daten zur Klimafreundlichkeit von Materialien bereitstellen	Datenbanken (Ökobaudat; WECOBIS); Anforderungen zur CO₂-Bilanzierung und -Berichterstattung (ESPR, BauPVO und Taxonomie), Bewertungstool Level(s), Berechnungstools	
	Generische Daten erschweren adäquate Vergleiche verschiedener Materialien und Endprodukte. Nutzung unterschiedlicher Standards oder Standardversionen erschwert Vergleichbarkeit von CO₂-Bilanzierung. Anforderungen an CO₂-Bilanzierung aus ESPR, CPR, EPBD müssen umgesetzt werden.	
Finanzielle Anreize für die Herstellung und den Einsatz von emissionsarmen Materialien	EU ETS; CBAM; CCfDs; Kreditprogramm „Klimaschutzoffensive für Unternehmen“ der KfW, BEG mit KfN-Förderprogramm	
	Unsichere CO₂-Bepreisung	Finanzierung durch BEG nur für öffentliche Gebäude, keine Anreize für andere Gebäude

● Existierende Instrumente und Strategien ● Einordnung bezüglich Wirksamkeit

Agora Industrie (2024). AVV = Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Beschaffung klimafreundlicher Leistungen; BauPVO = EU Bauprodukteverordnung; BEG = Bundesförderung für effiziente Gebäude; BNB = Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen; CBAM = Carbon Border Adjustment Mechanism; CCfDs = Carbon Contracts for Difference; DGNB = Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen; EPBD = Energy Performance of Buildings Directive; ESPR = EU Ecodesign for Sustainable Products Regulations; ETS = Emissions Trading System; KfN = Klimafreundlicher Neubau; KfW = Bundeseigene Förderbank; LESS = Low Emission Steel Standard; NaWoh = Qualitätssiegel Nachhaltiger Kleinwohnungsbau; NKWS = Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie

→ **Begrenzter Zugang zu Daten:** Die digitale Bereitschaft von Unternehmen in allen Sektoren, insbesondere von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), ist derzeit begrenzt, was die Erhebung von Daten zum Treibhausgaspotenzial auf der Ebene der Grundstoffe erschwert (Neligan et al., 2023).

→ **Hindernisse im Baurecht:** Den derzeit maßgeblichsten Einfluss auf die ECE von Gebäuden haben die Landesbauordnungen (LBO) und die

Musterbauordnung (MBO). Diese enthalten keine konkrete Zielstellung zur Reduktion von ECE, legen aber konkret fest, wie gebaut werden muss. Geregelt werden zum Beispiel Aspekte der Standsicherheit, der Erschließung und des Brandschutzes. Allein diese hier beispielhaft genannten Kategorien können einen nennenswerten Einfluss auf die ECE eines Gebäudes haben, insbesondere im Mehrfamilienhaus- und Bürogebäudebereich. Ferner ergeben sich

zwischen den landesspezifischen LBO merkliche Unterschiede im Umgang mit Holz als Baustoff. Dies schafft Hindernisse bei der Reduktion der ECE. Besonders betroffen sind dabei das Bauen mit Holz beziehungsweise anderen nachwachsenden Rohstoffen (Deutscher Holzwirtschaftsrat, 2023) und zirkulären Baustoffen (Braun et al., 2021; Hirschnitz-Garbers, 2021).

Die Ausgangsvoraussetzungen für eine ordnungsrechtliche Regelung von ECE-Anforderungswerten sind in Deutschland bereits vorhanden (Kapitel 4.1). Bei der konkreten Umsetzung kann Deutschland von eingeführten ECE-Regulierungen in anderen EU-Ländern lernen (Kapitel 4.3).

4.3 Anforderungswerte: Erkenntnisse aus anderen EU-Ländern

Mehrere EU-Länder haben entweder Anforderungswerte für Embodied-Carbon-Emissionen für neue Gebäude eingeführt oder vorgeschlagen. Der erste Schritt ist die Standardisierung von Daten (4.3.1), gefolgt von der Implementierung von Anforderungswerten (4.3.2). Die Übersicht zeigt mehrere Verbesserungsmöglichkeiten in den jeweiligen Regelungsrahmen (4.3.3).

4.3.1 Standardisierung der Datengrundlagen

Mehrere Länder in der EU haben die Herausforderungen in Bezug auf Datenverfügbarkeit bereits gemeistert. Ihre Erfahrungen und Ansätze bieten Einblick in bewährte Praktiken, um anfängliche Hürden zu überwinden. Die folgende Übersicht vergleicht die Rechtsrahmen und Ökobilanzmethoden in Dänemark, Frankreich, den Niederlanden, Schweden und Finnland für die Daten- und Berechnungsgrundlagen.

4.3.2 Einführung von Anforderungswerten für Embodied-Carbon-Emissionen

Mehrere EU-Mitgliedstaaten haben ECE-Anforderungswerte – Grenzwerte für die Lebenszyklusemissionen von neuen Gebäuden – eingeführt oder vorgeschlagen (Tabelle 3). Diese EU-Staaten haben verschiedene Wege gefunden, die Instrumente zur ECE-Reduktion zu gestalten.

Als wichtige Lektionen für die Politikentwicklung in Deutschland zeigen sich vor allem die klare politische Absicht in Verbindung mit einer Phase des Testbetriebs unter Einbeziehung von Industrie, Wissenschaft, NGOs und Zertifizierungssystemen. Dies, wie auch langfristige Klarheit über den Reduktionspfad, sorgt für eine eindeutige Richtung, um in Wissen, Ausrüstung und Technologien zu investieren. Essenziell ist es, den bestehenden politischen und technischen Rahmen zu nutzen, um Aufwand und Einführungszeit gering halten zu können.

Diese Reihe an Beispielen zeigt, dass gesetzliche Maßnahmen zur Reduktion von ECE möglich sind. Die Vorschriften sind relativ neu, da die Aufmerksamkeit für ECE erst in den letzten fünf bis zehn Jahren rasant gewachsen ist. Die erwähnten Länder verlangen sowohl die Berechnung der ECE-Menge als Teil des Genehmigungsprozess als auch die Einhaltung von Grenzwerten – oder planen deren baldige Einführung.

Jedes der Länder hat einen eigenen Ansatz entwickelt, was einen Vergleich von Ambitionsniveaus und Best Practices erschwert. Wie Tabelle 4 zeigt, variiert der Umfang der abgedeckten Gebäudetypen, Gebäudeelemente und Lebenszyklusstadien ebenso wie die funktionelle Einheit³⁰. Die Reduktionsrichtwerte müssen in Relation zu diesen Berechnungsgrundlagen gesehen werden. In allen Ländern wurden die Werte der zunächst gültigen Anforderungen

³⁰ Quantifizierbare Einheit zur Messung des gesamten Lebenszyklus-Fußabdrucks des Gebäudes (z. B. kg CO₂/m²Jahr).

aus einer Bottom-up-Studie abgeleitet und auf ein erreichbares Niveau festgelegt, beispielsweise das 75. Perzentil der untersuchten Gebäude. Zukünftige Senkungen der Grenzwerte sind entweder bereits festgelegt (in Frankreich) oder sollen in aktualisierten Übersichtsstudien quantifiziert werden (in Dänemark). Aus diesem Grund und wegen der erst kürzlichen Einführung ist eine vergleichende Bewertung der Wirksamkeit der verschiedenen Rahmenwerke noch nicht möglich.

Entscheidend für eine erfolgreiche Umsetzung ist, dass es sich bei den Verordnungen um in sich **schlüssige Berechnungsregeln** handelt, in denen Berechnungsmethoden und Systemgrenzen dem Reduktionsansatz und -ziel entsprechen, aber auch von den verfügbaren Produktdaten sowie Besonderheiten der Baupraxis und des Energiemixes beeinflusst werden. In dieser Hinsicht enthält der Ansatz jedes Landes beachtenswerte Herangehensweisen. Spezifische Elemente in Bezug auf Produktdaten und Berechnungstools sind im Kapitel 4.1.2 erläutert.

4.3.3 Verbesserungsmöglichkeiten in den Regelungsrahmen anderer EU-Länder

Neben den geschilderten Mehrwerten im vorherigen Kapitel lassen sich Verbesserungsmöglichkeiten in den Regelungsrahmen anderer EU-Länder feststellen. Die Kontrolle und Durchsetzung der Anforderungen werden derzeit in allen Ländern als Herausforderung angesehen. Die Kompetenzen und Ressourcen der zuständigen Behörden zur Prüfung eingereichter Berechnungen werden erst nach Inkrafttreten auf das erforderliche Maß erweitert. Daher wurden bisher keine Sanktionen für eine Überschreitung der Grenzwerte festgelegt.

Die Übermittlung von Daten an die lokalen Behörden, die für Baugenehmigungen zuständig sind, könnte auf höheren Verwaltungsebenen koordiniert werden. So könnte eine Datenbank mit den Emissionswerten erstellt werden, die eine aggregierte und anonymisierte Überprüfung ermöglichen würde, ob der Reduktionspfad eingehalten wird.

Beispiele von Initiativen zur Verbesserung der Datengrundlage in anderen EU-Mitgliedstaaten → Tabelle 3

Zeitplan für das Inkrafttreten von ECE-Anforderungswerten	Anreize für die Bereitstellung spezifischer Daten	Management von Datenbank und Berechnungstools
 Die Einführung von ECE-Anforderungen folgte in allen EU-Ländern, die bisher Werte in der Gesetzgebung vorschreiben, auf eine frühzeitig veröffentlichte Regierungsstrategie (5 bis 8 Jahre vor Inkrafttreten) sowie eine Phase der freiwilligen Kompetenzentwicklung oder Berichtspflicht ohne Grenzwerte (1 bis 3 Jahre). Insbesondere die freiwillige Phase wird im Rückblick von Verantwortlichen als essenziell angesehen, um Berechnungsmethoden und Datengrundlagen zu verfeinern und Lücken in Abdeckung oder Informationslevel zu schließen.	 In Frankreich berücksichtigt die Berechnungsformel für den konkreten Gebäudegrenzwert die Verwendung von generischen Daten. In der ersten Phase (2022–2024) werden generische Daten gleichbehandelt wie spezifische Daten aus EPDs. Ab der zweiten Phase (ab 2025) sorgen stufenweise steigende Korrekturfaktoren für Nachteile bei der Verwendung von generischen Daten. Zwischen 2022 und 2024 konnte so die Anzahl an EPDs in der nationalen Datenbank auf 5.000 verdoppelt werden.  Dänemark bot Produktherstellern Subventionen für die Erstellung von EPDs an.*	 Alle Länder verwenden generische und spezifische Daten. Diese werden häufig in einer Datenbank zusammengefasst (Frankreich, Niederlande und Schweden). Dänemark erlaubt die Verwendung von EPDs aus verschiedenen Quellen und greift auf die generischen Daten der deutschen ÖKOBAUDAT zurück. In allen Ländern stehen mehrere Berechnungstools zur Verfügung, oft nach Validierung und Zertifizierung durch die zentrale Datenverwaltung. Tools können kostenlos (z. B. LCAbysg in Dänemark) oder kostenpflichtig sein. Die Produktdatenbanken werden in den meisten Fällen von öffentlichen Behörden verwaltet, in Frankreich übernimmt jedoch die nationale Gesellschaft für nachhaltige Gebäude diese Rolle.

Agora Industrie und Ramboll (2024). *2022, also während des Jahres bevor die Grenzwertvorgaben in Kraft traten, stellte die dänische Regierung insgesamt 20 Millionen Euro (150 Millionen Dänische Kronen) für die Erstellung von EPDs bereit. Hersteller konnten einen Zuschuss für bis zu 50 Prozent der Ausgaben einer produktspezifische EPD beantragen, bis zu einem Maximalbetrag von 20.000 Euro (150.000 Dänische Kronen).

Ein solches System besteht nur in Schweden, wo bisher nur eine Berechnungs- und Meldepflicht besteht, aber keine Grenzwerte eingeführt wurden. Frankreich hat im Rahmen seiner freiwilligen Pilotphase von 2017 bis 2020 eine nationale Datenbank aufgebaut.

In Anbetracht der aktuellen politischen Gegebenheiten in Deutschland und der Erkenntnisse aus den bestehenden ECE-Anforderungen gibt diese Studie Empfehlungen für einen Policy-Mix, um Embodied-Carbon-Emissionen in Gebäuden zu reduzieren und gleichzeitig grüne Leitmärkte zu schaffen.

Vergleich von Gesetzgebung und geplanten Vorschriften für Anforderungswerte für Embodied-Carbon-Emissionen in anderen EU-Mitgliedstaaten

→ Tabelle 4

	Dänemark	Finnland	Frankreich	Niederlande	Schweden
Status	in Kraft seit 2023	geplant für 2025	in Kraft seit 2022	in Kraft seit 2018	in Kraft seit 2022, Grenzwerte für 2025 geplant
Gebäude-typ	alle Neubauten, Grenzwerte für Neubauten über 1.000 m ²	alle Neubauten außer EFH	neue Wohn-, Büro- und Bildungsgebäude	neue Wohn- und Bürogebäude über 100 m ²	alle Neubauten mit Ausnahmen für einige öffentliche Gebäude
Bau-elemente	Gründung, Tragwerk und Fassaden, Innenausbau und Gebäudetechnik	Abgleich mit den im Baugenehmigungsstadium verfügbaren Informationen – Näherungswerte für technische Systeme	alle im Baugenehmigungsantrag beschriebenen Komponenten	Gründung, Tragwerk und Fassaden, Installationen	Gründung, Tragwerk und Fassaden, Installationen, Unterbau und Überbau mit Überlegungen zur Erweiterung
Lebens-zyklus-phasen	A1–3, B4, B6, C3–4, D (separat)	A1–3, A4–5, B4, C1–4, D (separat)	A1–3, A4–5, B1–5, B6, B7, C1–4, D	A1–3, A4–5, B1–4, C1–4, D	A1–A3, A4–A5
Funktions-einheit	kgCO ₂ /m ² pro Jahr	kgCO ₂ /m ²	kgCO ₂ /m ²	EUR/m ² pro Jahr	kgCO ₂ /m ²
Produkt-daten-quellen	generische Daten: ÖKOBAUDAT, nationale generische Datensätze einschließlich Unsicherheitsfaktoren werden entwickelt, spezifische Daten: Hersteller-EPDs	generische Daten: öffentliche Datenbank für Gebäude und Infrastruktur. CO ₂ data.fi, enthält einen Konservativitätsfaktor von 20 %, spezifische Daten: EPDs	Daten aus der INIES-Datenbank mit generischen Daten von öffentlichen Stellen und geprüften EPDs aus der Industrie, bei Verwendung allgemeiner Daten gelten Anpassungsfaktoren	alle Daten aus der NMD-Datenbank mit allgemeinen und spezifischen Daten	Datenbank mit allgemeinen und spezifischen Einträgen, erstellt vom schwedischen Zentralamt für Wohnungswesen, Bauwesen und Planung, allgemeine Werte werden mit einem Konservativitätsfaktor von 25 % berechnet

Fortsetzung

→ Tabelle 4

Berechnung von biogenem Kohlenstoff	Abzug des biogenen Kohlenstoffgehalts im Vorfeld, Freigabe am Ende der Lebensdauer (–1/+1-Ansatz). Auswirkung auf LCA-Ergebnisse: keine.	der biogene Kohlenstoffgehalt wird im Vorfeld abgezogen und am Ende der Lebensdauer freigegeben (–1/+1-Ansatz), Auswirkung auf LCA-Ergebnisse: keine	der biogene Kohlenstoffgehalt reduziert die Vorabemissionen und wird im zukünftigen Freisetzungsszenario diskontiert	Abzug des biogenen Kohlenstoffgehalts in Vorabphasen, Freisetzung am Ende der Lebensdauer (–1/+1-Ansatz), Auswirkung auf LCA-Ergebnisse: keine	keine Bilanzierung oder biogener Kohlenstoffgehalt (0/0-Ansatz)
LCA-Berechnungstools	kein vorgeschriebenes Tool, LCAByg wurde für die Einhaltung der Gesetzgebung entwickelt, auch andere Tools können verwendet werden	kein vorgeschriebenes Tool, ein kostenloses öffentliches Tool ist verfügbar und wird entsprechend der Gesetzgebung aktualisiert, andere Tools sind verfügbar und beliebt	kein vorgeschriebenes Tool, Liste mit INIES-validierten Tools	kein vorgeschriebenes Tool, es stehen mehrere Berechnungstools zur Verfügung und sind vom NMD akkreditiert	kein vorgeschriebenes Tool, das von der schwedischen Umweltbehörde entwickelte Tool ermöglicht direktes Einreichen, aber auch andere Tools sind verfügbar
Grenzwerte	von 2023 bis 2025: 12 kg CO ₂ /m ² Jahr (Überarbeitung geplant für 2025)	in Entwicklung, Veröffentlichung geplant für Mitte 2024	individuelle Berechnung für jedes Gebäude Durchschnittliche Grenzwerte: 640 kg CO ₂ /m ² (EFH), 740 kg CO ₂ /m ² (MFH)	Wohngebäude: 0.8 EUR/m ² Jahr Bürogebäude: 1 EUR/m ² Jahr	vorgeschlagene Grenzwerte festgelegt auf das 75. Perzentil des Referenzwerts pro Gebäudetyp
Meldepflichten und Durchsetzung	an lokale Baubehörde, nach Fertigstellung des Baus berechnet und gemeldet	an lokale Baubehörde, Ergebnis notwendig bei Antrag auf Baugenehmigung	an lokale Baubehörde, bei Baugenehmigung muss nachgewiesen werden, dass eine Berechnung geplant ist, LCA-Ergebnis nach Bauabschluss einzureichen	an lokale Baubehörde, für die Beantragung einer Umweltgenehmigung vor Bau ist die Berechnung erforderlich	an die zentrale Baubehörde, bei Baufertigstellung ist eine Berichterstattung für die Nutzungsgenehmigung erforderlich
LCA-Daten-Governance	in Entwicklung	in Entwicklung, Abstimmung mit Digitalisierungsinitiativen für BIM-basierte Berichterstattung angestrebt	kein Zugriff auf gemeldete LCA-Daten	keine zentrale Sammlung oder öffentliche Datenbank der LCA-Ergebnisse	zentralisierte Sammlung von Daten zur Analyse durch die nationale Agentur, Daten nicht systematisch verfügbar, nur auf konkrete Anfrage

Agora Industrie und Ramboll (2024)

5 Empfehlungen für einen Policy-Mix

Aufbauend auf den europäischen und deutschen Rahmenbedingungen (Kapitel 4.1), den Erkenntnissen aus anderen EU-Ländern (Kapitel 4.3) sowie dem Fokus dieser Studie (Kapitel 1) lassen sich folgende Empfehlungen für eine nachfrageseitige politische Bearbeitung von ECE herleiten. **Wir empfehlen als zentrales Instrument eine schrittweise ordnungsrechtliche Einführung von ECE-Anforderungswerten** auf Basis der **Anforderungen der EPBD, der positiven Erfahrungen anderer Länder** und der damit einhergehenden **Planungssicherheit** für die Baustoff-Industrie, das Baugewerbe, die Planer:innen sowie die Bauherr:innen (Kapitel 5.1). Allein wird dieses Leitinstrument den komplexen Transformationsherausforderungen allerdings nicht gerecht. Ergänzend bedarf es **weiterer Instrumente**, die im Rahmen dieser Studie allerdings nicht vollumfänglich ausgearbeitet wurden (Kapitel 5.2).

5.1 Schrittweise ordnungsrechtliche Einführung von Anforderungswerten

Das Instrument der Anforderungswerte ist einerseits in der EPBD angelegt (siehe Kapitel 4.1) und andererseits besonders zielführend im Sinne des Klimaschutzes und der unternehmerischen Investitionssicherheit. Es gewährleistet Zielsicherheit hinsichtlich der Klimaneutralitäts-Anforderungen bis 2045 und stellt sicher, dass diese vergleichbar und individuell eingehalten und überprüft werden können. Gleichzeitig schafft es Planungssicherheit für die Planungs- und Baubranche, da klar benannt ist, welche Anforderungen (wann) eingehalten werden müssen. Dabei bleibt das Instrument aber technologieoffen und flexibel, weil die Anforderungswerte durch verschiedenste Maßnahmen, Materialien und Produkte eingehalten werden können. Anforderungswerte sind auch mit dem materiellem Verfassungsrecht vereinbar (Breidenbach et al., 2022). Für die Grundstoff- und Baustoffindustrie schaffen sie damit Planungssicherheit für Investitionen in klimafreundliche Produktionsprozesse und fördern den

Ideenwettbewerb um die besten Technologien. Einer Umfrage unter relevanten europäischen Akteur:innen (Unternehmen, Verbände, NGOs, Forschungsinstitute) zufolge unterstützen rund 85 Prozent der Befragten die Einführung von Anforderungswerten (Europäische Kommission, 2024a).

Bei der Einführung ist zu klären, wie, wann und in welchem Umfang die Anforderungswerte eingeführt werden (Kapitel 5.1.1). Außerdem sind die Startwerte (Kapitel 5.1.2), deren Entwicklungspfade (Kapitel 5.1.3) und die Rechen- (Kapitel 5.1.4) und Nachweisregeln (Kapitel 5.1.5) festzulegen (siehe Abbildung 23).

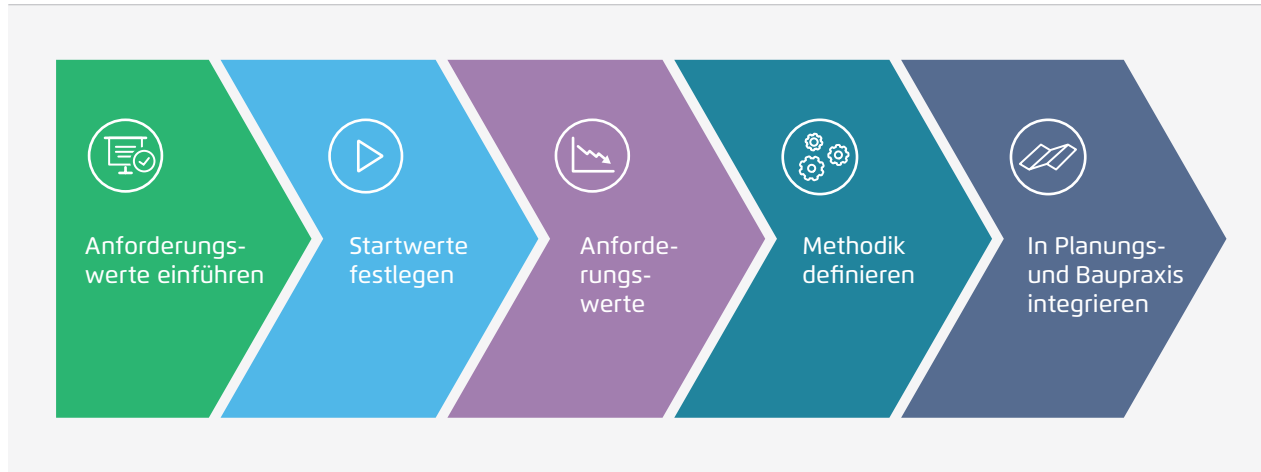
Für die ordnungsrechtliche Regelung von Embodied-Carbon-Emissionen bestehen im Wesentlichen zwei Möglichkeiten mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen. Einerseits kann die Thematik in das GEG (Dorn-Pfahler und Lützkendorf, 2023; Graaf und Broer, 2023) oder die Bauordnungen integriert werden (Breidenbach et al., 2022). Andererseits wäre ein neues, separates und das GEG ergänzendes Gesetz möglich (Dorn-Pfahler und Lützkendorf, 2023; Weidner et al., 2021). Bei der Entscheidung für eine Variante sind die Komplexität der Thematik, die Wechselwirkungen mit anderen Nachhaltigkeitsaspekten, die Sicht der Anwender:innen sowie methodische Unterschiede zwischen der Bewertung der Nutzungs- und der Herstellungsphase (Systemgrenzen, Anforderungsgrößen, normative Grundlagen) zu berücksichtigen.

5.1.1 Fahrplan zur Einführung von Anforderungswerten

Bei der Einführung von Anforderungswerten sind zahlreiche Parameter auszubalancieren. Auf der einen Seite sind die klimapolitischen Ziele und der europäische Zeitplan der EPBD maßgebend. Auf der anderen Seite muss allen Akteur:innen ausreichend Vorbereitungs-, Lern- und Anpassungszeit zugestanden werden, damit die Anforderungen auch

Aspekte der schrittweisen ordnungsrechtlichen Einführung von Anforderungswerten für Embodied-Carbon-Emissionen

→ Abb. 23



Agora Industrie, ifeu und Ramboll (2024)

zielsicher erreicht werden können. Es müssen also die Fragen beantwortet werden, wie die Anforderungen konkret schrittweise eingeführt werden und zu welchen Zeitpunkten welche Gebäude betroffen sind.

Grundsätzlich bestehen mehrere Vorteile für ein **zweistufiges Verfahren zum Inkrafttreten der Anforderungen** (Abbildung 24). In einer **Einführungsphase** gilt eine **Berechnungs- und Offenlegungspflicht** für bestimmte Gebäudetypen. Damit werden alle Akteur:innen mit den „Spielregeln“ vertraut gemacht und Erfahrungen an allen Punkten der Wertschöpfungskette gesammelt. Die Berichtspflicht umfasst bereits alle Informationen, die für die spätere Festlegung von Anforderungswerten erforderlich sind. Es müssen keine bestimmten Werte eingehalten werden, die gebäudespezifischen Ergebnisse aber in einem (digitalen) Gebäuderessourcenpass dokumentiert werden. Damit können die Öffentlichkeit sowie Kundinnen und Kunden auch Einblicke in die Entwicklung der ECE gewinnen und Risiken abschätzen. Gleichzeitig können progressive Projektentwickler:innen freiwillig bereits ambitionierte Anforderungswerte anstreben. Der dadurch entstehende Wettbewerb kann einen weiteren Beitrag dazu leisten, signifikante Emissionsminderungen bereits vor 2030 zu erreichen.

Nach dieser Einführungsphase greift die **Anwendungsphase mit Pflicht zur Einhaltung von bestimmten Werten**. Dabei sind die Vorgaben der EPBD und die gute Ausgangslage in Deutschland zu berücksichtigen, was ein ambitionierteres Vorgehen erlaubt und im Sinne des Klimaschutzes und der Planungssicherheit zu begrüßen ist. Zudem sind politische Aushandlungsprozesse und unternehmerische sowie planerische Transformationszeiten zu berücksichtigen. Um kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sowie Bauherr:innen kleinerer Gebäude entsprechend mehr Zeit für die Transformation zuzugestehen, macht die EPBD unterschiedliche Vorgaben für Gebäude größer oder kleiner 1.000 Quadratmeter Netto-Raumfläche. Öffentliche Gebäude werden aufgrund ihrer Vorbildwirkungen früher und stärker in die Pflicht genommen. Daraus ergibt sich folgender vorgeschlagener Zeitplan (Abbildung 24).

2025 wird ein delegierter Rechtsakt erwartet, der sich mit der **Methodenharmonisierung auf europäischer Ebene** befasst. Deutschland sollte sich bei der Erarbeitung des Rechtsakts dafür einsetzen, dass die in dieser Studie vorgeschlagenen methodischen Schlüsselentscheidungen dort allgemeingültig verankert werden.

Empfohlener Zeitplan zur Einführung von Anforderungswerten an Embodied-Carbon-Emissionen

→ Abb. 24

	2025	2026	2027	2028	2029	ab 2030
EU Vorgaben aus <i>Energy Performance of Buildings Directive</i>	Delegierter Rechtsakt zur Methodenharmonisierung		Nationale Fahrpläne für Grenzwerte für Neubauten	Berechnungs- und Transparenzpflicht für neue Gebäude > 1.000 m ²		Berechnungs- und Transparenzpflicht für alle neuen Gebäude
Deutschland Allgemein	Studie zur Bestimmung der Anforderungswerte	Erarbeitung und Veröffentlichung eines Fahrplans				
Deutschland Neue öffentl. Gebäude und neue Gebäude > 1.000 m ²			Berechnungs- und Transparenzpflicht		Verpflichtende Anforderungswerte	
Deutschland Neue Gebäude < 1.000 m ²			Berechnungs- und Transparenzpflicht			Verpflichtende Anforderungswerte

Agora Industrie, ifeu und Ramboll (2024). *Die EPBD betrachtet Lebenszyklusemissionen, für eine pragmatische Umsetzung bieten sich separate Anforderungen für Embodied-Carbon-Emissionen (ECE) und Betriebsphase an.

5.1.2 Festlegung von Startwerten

Bei der Festlegung von Startwerten, also den Anforderungswerten, die zu Beginn der Anwendungsphase im jeweiligen Gebäudetyp einzuhalten sind (Kapitel 5.1.4), muss eine Balance zwischen ökologischer Notwendigkeit (*top-down*) (Kapitel 1.2) und planerischer, technischer sowie ökonomischer Machbarkeit (*bottom-up*) sichergestellt werden (Graaf und Broer, 2023). Über die Ergebnisse dieser Studie und der darin ausgewerteten Arbeiten (Kapitel 3.1) hinaus bedarf es einer praxisnahen und umfassenden **wissenschaftlichen Untersuchung**, aus der die Anforderungswerte für die Regulierung abgeleitet werden. Diese sollte die neueste ÖKOBAU-DAT-Version als Basis haben (Datensätze nach DIN EN 15804:A2) und alle zu regelnden Gebäudetypen abdecken. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass eine große Bandbreite an tatsächlich realisierten Gebäuden analysiert wird. Dazu sind insbesondere die vorhandenen Datensätze bestehender Zertifizierungssysteme und Softwareunternehmen einzubinden. Zudem sollte eine tiefgehende Analyse der QNG-geförderten Gebäude stattfinden. Die frühzeitige Veröffentlichung der Startwerte schafft

Planungssicherheit für alle an der Errichtung neuer Gebäude beteiligten Akteure, aber auch Investoren.

5.1.3 Fortschreibung der Anforderungswerte

Zur Wirkungsentfaltung – Emissionen reduzieren und Leitmärkte schaffen – muss ausgehend von den Startwerten auch ein transparenter und verständlicher Reduktionskurs erlassen werden. Das heißt, dass die Anforderungswerte fortgeschrieben werden müssen und frühzeitig geregelt werden muss, wann welche Anforderungswerte je Gebäudetyp einzuhalten sind. Damit werden Richtungssicherheit und Planbarkeit sichergestellt. Außerdem besteht damit eine Nachsteuerungsmöglichkeit, sollten die empfohlenen signifikanten Emissionsminderungen bis 2030 nicht erzielt worden sein.

Die Klimaschutzziele erfordern eine zügige Absenkung bis zum Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045 (Kapitel 1.2). Für eine nachvollziehbare Kommunikation gegenüber relevanten Stakeholdergruppen empfiehlt es sich, die bekannten Effizienzklassen aus dem Energieausweis auf die Thematik

Embodied-Carbon-Emissionen zu übertragen (Abbildung 25). Dazu können die erreichten Werte in sieben Stufen (A bis G) eingeteilt werden. Diese bezeichnen wir als **Herstellungs-Klimaklassen**. In diese Klassen werden die Projekte auch im Gebäude-ressourcenpass eingeordnet. Die Abstufung ist – wie die Festlegung der Startwerte – ein Abwägungsprozess zwischen technoökonomischer Machbarkeit und klimapolitischer Notwendigkeit. Die Einteilung in Klassen sollte dafür genutzt werden, den Reduktionspfad zu definieren. Zukünftige Zielvorgaben für bestimmte Jahre bis 2045 für die einzelnen Gebäudetypen und Bauherr:innen können in Form von Mindestklassen festgelegt werden. Zum Beispiel kann festgelegt werden, dass ab 2030 neue Gebäude mindestens Klasse F, ab 2032 Klasse E und so weiter erfüllen müssen.

Im Sinne der Vorbildwirkung der öffentlichen Hand sollten deren Gebäude früher höhere Klassen erreichen als der private Sektor, zum Beispiel die ambitionierteste Klasse A bereits ab 2040.

Die Vorschläge hinsichtlich der Anforderungswerte sowie diese Studie im Allgemeinen beziehen sich auf den Neubau von Gebäuden. Inwieweit Umbau- und

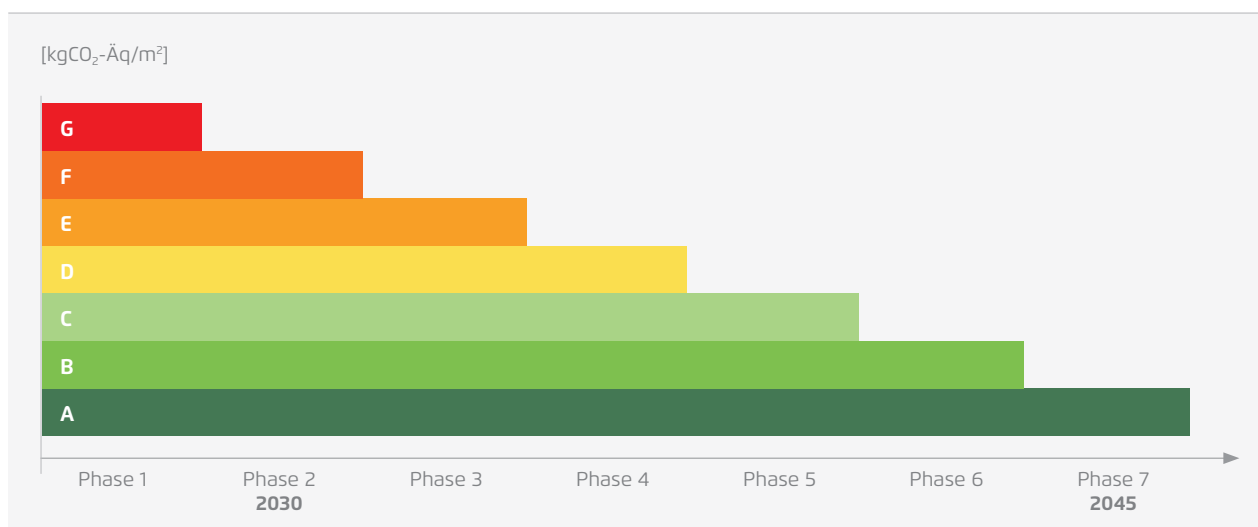
Sanierungs- oder Modernisierungsmaßnahmen an Bestandsbauten ebenfalls hinsichtlich ECE bewertet werden sollten, ist zu einem späteren Zeitpunkt zu klären. Zu beachten ist dabei zweierlei: Die Nutzung von Bestandsgebäuden stellt im Sinne der Suffizienz bereits eine effektive Klima- und Ressourcenschutzmaßnahme dar. Gleichzeitig unterliegen Umbauten, energetische Sanierungen oder Modernisierungen einer Vielzahl von Hemmnissen (Agora Energiewende et al., 2024). Die Regulierung von ECE sollten vor diesem Hintergrund nicht zu weiteren Hürden führen.

5.1.4 Methodische Schlüsselentscheidungen zu Anforderungswerten

Um Richtungssicherheit hinsichtlich Klimaneutralität sicherzustellen und Innovationen sowie die Nachfrage nach klimafreundlichen Materialien anzuregen, ist auch die Berechnungssystematik entsprechend zu regeln. Dabei ist das Wechselspiel aus vorhandenen Vorgaben und Instrumenten (EPBD, QNG, Normung) genauso zu berücksichtigen wie die bauliche beziehungsweise planerische Umsetz- und Erreichbarkeit.

Herstellungs-Klimaklassen in Anlehnung an die Effizienzklassen des Energieausweises

→ Abb. 25



Agora Industrie und ifeu (2024)

Tabelle 5 fasst die grundsätzlichen methodischen Empfehlungen zusammen. Vor dem Hintergrund der bis Ende 2025 in der EPBD angekündigten Verabschiedung eines delegierten Rechtsakts zur Harmonisierung von Berechnungsmethoden sind die Empfehlungen neu zu bewerten.

Indikator

Für eine schlanke und dennoch zielführende gesetzliche Regelung empfiehlt sich der Fokus auf einen Leitindikator. Dafür ist das Treibhauspotenzial (GWP) prädestiniert, weil damit bereits Erfahrungen beim QNG gesammelt wurden und es kommunikativ einfacher zu vermitteln ist (Braune et al., 2018). Darüberhinausgehende ökologische Aspekte (Ressourcenschutz, Kreislaufwirtschaft) müssen an anderer Stelle beziehungsweise mit anderen Instrumenten in Angriff genommen werden.

Um die am dringlichsten zu reduzierenden THG-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger in den Blick zu nehmen, sollte konkret auf das fossile Treibhauspotenzial (GWP_{fossil}) fokussiert werden. THG-Emissionen aus fossilen Quellen sind, einmal

emittiert, nur über kosten- und energieintensive *Direct-Air-Capture*- und CCUS-Verfahren wieder der Atmosphäre zu entziehen und sollten deshalb vorrangig vermieden werden. Zudem ermöglicht nur dieser Indikator eine gute Vergleichbarkeit von mineralischen und nachwachsenden Rohstoffen (beim gewählten Fokus des Lebenszyklus). Das GWP_{fossil} wird auch im DGNB-Zertifizierungssystem für Neubauten angewandt (DGNB, 2023).

Einheit

Zur Vergleichbarkeit zwischen Gebäuden und einfacheren Handhabbarkeit von Kennwerten sollen die ECE, analog zum QNG, auf Quadratmeter Netto-Raumfläche (NRF) nach DIN 276 bezogen werden. Anders als im QNG und vergleichbaren Zertifikaten sollten die ECE allerdings nicht mit der Lebensdauer des Gebäudes verrechnet werden, um zu betonen, dass diese vollständig bereits zum Beginn des Lebenszyklus des Gebäudes (*upfront*) freigesetzt werden.

Durch die Verrechnung mit einer Bezugsfläche bleiben Anreize zur Flächenreduktion (Suffizienz) unberücksichtigt. Unter dem Vorbehalt stichfester

Zusammenfassung methodischer Schlüsselentscheidungen für die Umsetzung von ECE-Anforderungswerten.

→ Tabelle 5

Parameter	Festsetzung
Indikator	Fossiles Treibhauspotenzial (GWP_{fossil}) in kgCO_2 -Äquivalenten
Einheit/ Bezugsgröße	kgCO_2/m^2 Netto-Raumfläche (NRF)
Gebäudetypen	Nach QNG-Systematik: Wohngebäude und fünf Nichtwohngebäude-Klassen
Gebäudeteile	Baukonstruktion (KG 300) und Technische Gebäudeausrüstung (KG 400)
Lebenszyklus-Module	Separate Anforderungen für Nutzung (B6) und Embodied-Carbon-Emissionen (ECE) Steuerungsgröße ECE: A1–A3 (kann bis A5 erweitert werden) Informativ zusätzlich gesamter Lebenszyklus (WLC gemäß EPBD) analog QNG (A1–A3, B4, B6, C3–C4)
Datengrundlage und -übergabe	ÖKOBAUDAT in zweistufigem Verfahren (Kapitel 5.4): → generische Datensätze zur Genehmigungsplanung → spezifische Datensätze zur Fertigstellung

und handhabbarer Festlegungen von Belegungs- und Nutzungsdichten könnten informativ die ECE auch pro Kopf ausgegeben werden.

Gebäudetypen

Die Unterschiede zwischen den Gebäudetypen (Kapitel 3.1.1) sind bei der Festlegung von Anforderungswerten zu berücksichtigen. Die Einteilung des QNG in eine Wohngebäude- und fünf LCA-Klassen für jeweils miteinander vergleichbare Nichtwohngebäude (BMWSB, 2023) kann fortgeführt werden. Die Anforderungswerte sollten analog zum QNG dabei jedoch einen Mittelweg zwischen Detaillierungsgrad und Handhabbarkeit wählen. Dort werden beispielsweise die EZFH und MFH zur Kategorie Wohngebäude zusammengefasst. Angesichts der einfacheren Umsetzbarkeit von Dekarbonisierungsmaßnahmen im EZFH-Bereich, der gleichen Nutzung und ähnlichen ECE-Kennwerten wird dies als sinnvoll erachtet. Bei der Entwicklung der Anforderungswerte können je nach Gebäudetyp unterschiedliche Herstellungs-Klimaklassen für bestimmte Zieljahre festgelegt werden.

Gebäudeteile

Alle Materialströme des Baukörpers aus der Baukonstruktion (KG 300) und den technischen Anlagen (KG 400) müssen, analog zum QNG, berücksichtigt werden, dazu zählen beispielsweise auch Keller und Tiefgaragen.³¹ Die Analyse aus Kapitel 3.1 zeigt dabei in der bisherigen Studienlandschaft einen unterschiedlichen Umgang mit der gebäudetechnischen Ausstattung. Empfohlen werden kann, nach Überprüfung und Justierung der Kennwerte, der zweistufige Ansatz des QNG mit einem pauschalen Sockelbetrag in Abhängigkeit des energetischen Standards und Gebäudetyps sowie einer Einzelerfassung ausgewählter Anlagenteile (BMWSB, 2023). Die Berücksichtigung der Gebäudetechnik stellt auch sicher, dass weitere Dekarbonisierungsansätze, zum Beispiel

Lowtech-Konzepte, sowie Aspekte der Klimaanpassung, wie ein vermehrter Einsatz von Kühlttechnik, berücksichtigt werden.

Lebenszyklusphasen

Die EPBD fordert in ihrer aktuellen Ausgestaltung (Stand September 2024) die Bearbeitung der gesamten Lebenszyklus-Emissionen eines Gebäudes (*Whole life carbon emissions*, WLC). Ähnlich wie in Frankreich sollte dieser Wert aber nur informativ angegeben werden, um Daten für zukünftig erweiterte Untersuchungsrahmen zu sammeln und die Anteile von ECE und Nutzungsemissionen transparent zu machen sowie sinnvolle Effizienzniveaus abzuleiten. Als Anforderungs- beziehungsweise Steuerungsgröße für ECE wird dagegen ein Fokus auf die Module Rohstoffbereitstellung (A1), Transport (A2) und Produktherstellung (A3) (gegebenenfalls auch A4 und A5) vorgeschlagen. Dies erfolgt aus mehreren Gründen:

- Erstens werden damit rund **75 Prozent der Embodied-Carbon-Emissionen** eines Gebäudes und damit die größten Stellschrauben abgedeckt (Ramboll, 2023).
- Zweitens sind sie die **zeitlich kritischsten Lebenszyklusphasen**, weil die Emissionen direkt heute freigesetzt werden.
- Drittens entstehen **die Auswirkungen der späteren Lebenszyklusphasen**, wie zum Beispiel Austausch (B4), *End-of-Life* (C) und Gutschriften (D), aufgrund der langen Lebensdauer von Bauteilen und Gebäuden erst (sehr viel) später und sind mit großen **Unsicherheiten** behaftet.

Das Risiko, mit dem gewählten Ansatz einen Anreiz für kurzlebige, nicht ressourceneffiziente und nicht kreislauffähige Materialien und Bauweisen zu schaffen, ist gering. Das liegt zum einen daran, dass die derzeitige Abbildung von Phase C auf Annahmen beruht, die mit fortschreitender Dekarbonisierung der Abfallbehandlung in Zukunft stetig unwahrscheinlicher werden und Phase D ohnehin nicht standardmäßig betrachtet wird. Zum anderen ist die Langlebigkeit, Trennbarkeit und Kreislauffähigkeit nicht über die Anforderungswerte, sondern über

³¹ Außenanlagen (KG 500) sind nur dann berücksichtigen, wenn sie für die Gebäudenutzung zwingend erforderlich sind.

andere Regelungsbereiche zu behandeln – auch weil ressourceneffiziente Maßnahmen nicht unbedingt beziehungsweise nicht automatisch eine bessere THG-Bilanz aufweisen. So beträgt das THG-Einsparpotenzial von Recyclingbeton je nach Anwendungsfall und Transportaufkommen ungefähr sieben Prozent, kann aber in besonders ungünstigen Fällen auch zu mehr THG-Emissionen führen (Bellmann und Zimmermann, 2019).

Die THG-Emissionen aus der Nutzungsphase sind bereits über das GEG geregelt und werden für den Energieausweis berechnet. Die Trennung der Herstellungs- und Nutzungsphase erlaubt eine zielgerichtete Dekarbonisierung der jeweiligen Lebenszyklusphasen. So wird auch verhindert, dass – wie es bei einer Verrechnung der Fall wäre – besonders sparsame Gebäude in der Nutzungsphase, zum Beispiel durch den Anschluss an ein erneuerbar betriebenes Wärmenetz, wenig(er) Anreize für die Senkung der ECE haben. Die Versorgungssysteme von Gebäuden können im Laufe der Lebensdauer unaufwendiger ausgetauscht beziehungsweise verbessert werden. Die ECE entstehen jedoch gleich (volumenfänglich) zu Beginn des Lebenszyklus und verbrauchen damit heute das verbleibende CO₂-Restbudget.

Datengrundlage und -übergabe

Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sollte, analog zum bisherigen QNG, gelten, dass generische Datensätze nur aus der ÖKOBAUDAT und produktspezifische Daten nur aus normkonformen EPDs tatsächlicher verbauter Produkte verwendet werden dürfen. Die darüberhinausgehende Nutzung von Tools und Software obliegt den Anwender:innen. Es empfiehlt sich jedoch, Schnittstellen und Dateiformate zu definieren, um einen Austausch von Daten zwischen verschiedenen kommerziellen und öffentlichen Tools zu ermöglichen und das Handling in den Genehmigungsbehörden möglichst unkompliziert und digital zu gestalten. Dazu braucht es auch klare, transparente und schrittweise Vorgaben für die Kombination von jeweils zu verwendender Ökobilanz-Datenbankversion (ÖKOBAUDAT), Werkzeugversion (zum Beispiel eLCA) und den jeweiligen Anforderungswerten.

5.1.5 Umsetzung in der Planungs- und Baupraxis

Analog der Einführung der Anforderungswerte (Kapitel 5.1.1) sowie der zukünftigen Entwicklung (Kapitel 5.1.3) spiegelt sich das planbare, schrittweise Vorgehen auch bei der Integration in die Planungs- und Baupraxis wider. Damit wird dem steigenden Detaillierungsgrad und der Datenverfügbarkeit im Planungs- und Bauprozess sowie gleichzeitig einer realistischen Überprüfbarkeit und damit Zielgerichtetheit Rechnung getragen.

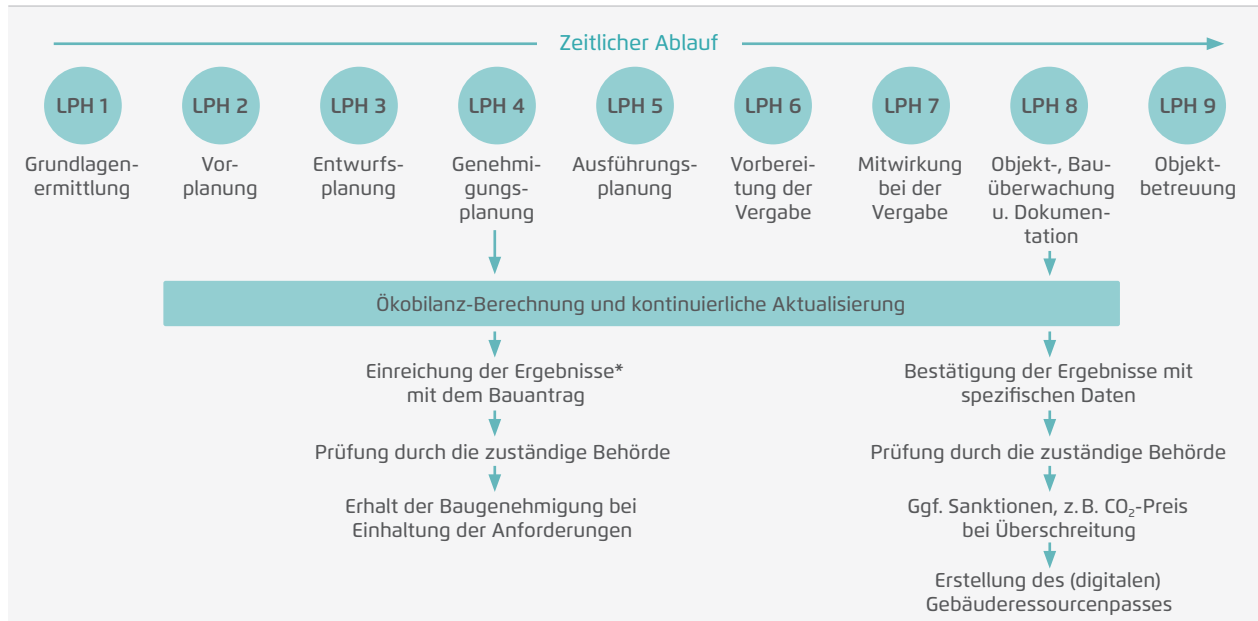
Damit die Bewertung und Minimierung von ECE zukünftig bei allen Neubauplanungen stattfinden kann, muss sich der Prozess an den bisherigen Leistungsphasen (LPH) nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) orientieren, um weitere Bürokratie zu vermeiden (Bund Deutscher Baumeister, o. J.) (Abbildung 26). Zu Beginn des Planungsprozesses ist das Optimierungspotenzial noch besonders groß und der Umplanungsaufwand noch besonders gering. **Ökobilanzen** sollten deshalb **frühzeitig mit Durchschnittswerten angelegt und planungsbegleitend aktualisiert** werden (Zeumer et al., 2014; Braune et al., 2018). Dies ist bei der Novelisierung der HOAI zu berücksichtigen.

Die Ökobilanzen können bei entsprechender Expertise **verschiedene Berufsgruppen** anfertigen (Kapitel 5.2.3). **Architekt:innen** haben ab Planungsbeginn einen umfassenden Überblick über das Gebäude und insbesondere dessen Materialität. Andere Fachplaner:innen, wie zum Beispiel **Energieberater:innen**, besitzen Kompetenzen in Bilanzierungsmethoden beziehungsweise im Umgang mit THG-Emissionskennwerten. Aber auch Fachkräfte, welche **Ausschreibungen vorbereiten und durchführen**, könnten Ökobilanzen durchführen, weil ihnen die Stoff- und Materialströme sowie die systematische Verrechnung mit Kennwerten vertraut ist.

Die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben wird sinnvollerweise mit der **Genehmigungsplanung (LPH 4) überprüft**. Das entspricht dem Vorgehen bei anderen gesetzlichen Vorgaben, zum Beispiel aus den Bauordnungen (Brandschutz, Schallschutz, Sicherheit)

Zeitlichkeit der Ökobilanz-Berechnung und Nachweisführung im Planungs- und Bauprozess

→ Abb. 26



Agora Industrie und ifeu (2024). *generische Daten; LPH = Leistungsphasen

oder dem GEG (Energiebedarf, Einsatz erneuerbarer Energien). Die entsprechenden Nachweise und Unterlagen sind mit dem Bauantrag einzureichen. Die lokalen Planungs- und Baubehörden übernehmen die finale Prüfung und erteilen nur bei Einhaltung der Anforderungswerte die Baugenehmigung. Zu diesem Planungszeitpunkt liegen in den meisten Fällen noch keine ausreichenden und planbaren Informationen über den tatsächlichen Einsatz von bestimmten Produkten vor. Deshalb sollten für die Berechnung zu diesem Zeitpunkt noch generische Datensätze maßgebend sein. Die Verwendung spezifischer Datensätze via EPDs sollte nur mit einem Nachweis möglich sein, dass die Produkte tatsächlich auch später verwendet werden.

Ob die in der Genehmigungsplanung prognostizierten Werte tatsächlich erreicht wurden, muss nach **Fertigstellung in LPH 8** mit spezifischen Datensätzen (EPDs) überprüft beziehungsweise nachgewiesen werden. Dazu muss die Ökobilanz Teil der Grundleistung hinsichtlich der „systematischen Zusammenstellung der Dokumentation, zeichnerischen Darstellungen und rechnerischen Ergebnisse

des Objekts“ gemäß der HOAI werden (Bundesrat, 2020). Die Dokumentation muss zukünftig auch die Erstellung des **(digitalen) Gebäuderessourcenpasses** umfassen, der mit dem Objekt übergeben wird. Dort werden einerseits die spezifischen ECE des Gebäudes einfach und verständlich ausgewiesen und mit den Anforderungswerten (Herstellungs-Klimaklassen, siehe Kapitel 5.1.3) verglichen. Andererseits enthält er alle Informationen zu den tatsächlich verbauten Materialien und Produkten und dokumentiert diese mit Grundrissen, Materiallisten, Fotos sowie Inbetriebnahme- und Übergabeprotokollen. Zudem sollten in dem Pass bereits mögliche Verwertungswege nach dem Ende der Lebensdauer des Gebäudes beziehungsweise der Baustoffe angegeben werden, um eine Kreislaufführung sicherzustellen. Zusammen mit dem Energieausweis bildet der Gebäuderessourcenpass eine umfassende Dokumentation des Gebäudes im Sinne eines *digital building logbook* entsprechend der EPBD.

Um **Mitnahmeeffekte zu vermeiden**, sollte eine Regelung festgelegt werden, wenn zwischen Genehmigung und Fertigstellung eine besonders lange

→ Infobox: Unsicherheit der Berechnung von *End-of-Life*-THG-Emissionen

Bei der Berechnung von THG-Emissionen, die zum Ende einer Gebäudelebensdauer angesetzt werden, bestehen große Unsicherheiten. Bei einem Neubau im Jahr 2025 würden diese rechnerisch erst 2075, also in einer klimaneutralen Welt, anfallen. Zu diesem Zeitpunkt gibt es, bei Einhaltung der Klimaziele, voraussichtlich bereits klimaneutrale Baumaschinen und thermische Verwertungsanlagen mit CO₂-Abscheidung. Baustoffe, die heute der thermischen Verwertung zugeführt werden und bei dessen Verbrennung THG-Emissionen entstehen, würden keine THG-Emissionen mehr verursachen. Bei Dämmstoffen ist diese Verzerrung besonders relevant, da die Lebenszyklusphasen C1–C4 bis zu 50 Prozent der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus verursachen können (Reinhardt et al., 2019). Auch die Herstellung von Ersatzprodukten, zum Beispiel neuen Fassadenbekleidungen, wird in Zukunft klimafreundlicher erfolgen als heute.

→ Infobox: Abriss und Ersatzneubau

Bei der LCA-Berechnung von Neubauten werden bislang üblicherweise lediglich die THG-Emissionen in direktem Zusammenhang mit dem neu gebauten Gebäude bilanziert. Ein vorher auf dem Grundstück des Neubaus stehendes Gebäude, welches abgerissen wird, ist bislang standardmäßig nicht Teil des Untersuchungsrahmens. Lediglich wenn Bauteile oder Baustoffe wiederverwendet oder recycelt werden, fließt dies in die Bilanz des Neubaus ein (Diskontierung in Phase A). Wie in Kapitel 2.2.1 erläutert, ist die vorrangige Nutzung von Bestandsgebäuden eine wirksame Dekarbonisierungsstrategie. Einzelne Studien zeigen, dass Sanierungen beziehungsweise Umbauten ökologische Vorteile gegenüber Abriss und Ersatzneubau haben können (Steger et al., 2022). Dies ist in der Forschung stärker zu beleuchten, um mittelfristig methodisch in den Anforderungswerten und anderen politischen Instrumenten berücksichtigt werden zu können.

Zeitspanne liegt. Damit wird verhindert, dass Baugenehmigungen eingereicht werden, um noch schwächere Anforderungen zu erfüllen, obwohl der Bau eigentlich erst später geplant ist.

Bei Überschreitung der Anforderungswerte nach Fertigstellung sind ebenfalls entsprechende Regelungen zu treffen. Möglich wäre die Sanktionierung der Überschreitung der Anforderungswerte mit einem CO₂-Preis, wie er zum Beispiel als CO₂-Schattenpreis bereits heute bei Infrastrukturprojekten in Baden-Württemberg zum Einsatz kommt (Ganz et al., 2023).

5.2 Ergänzende Instrumentenvorschläge

Aufgrund der Komplexität und Vielfalt der Wertschöpfungskette und der langen Investitionszyklen im Bauwesen braucht es für eine erfolgreiche Dekarbonisierung von ECE zwingend über die ordnungsrechtliche Einführung von Kennwerten hinaus einen breiten Instrumentenmix (Abbildung 27). Für die Einführung von Kennwerten ist entsprechend ausreichend Vorlaufzeit einzuplanen. Die beschriebenen Reduktionspfade sehen allerdings relevante Emissionsminderungen bis 2030 (Kapitel 3.1.2) vor. Die hier vorgeschlagenen Instrumente können dazu ebenfalls einen Beitrag leisten. Die Modernisierung des Baurechts kann dabei helfen, Anreize für

Instrumentenmix zur Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen (ECE) im Gebäudesektor und Schaffung von Leitmärkten für klimafreundliche Baumaterialien

→ Abb. 27



Agora Industrie (2024). QNG = Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude

zirkuläre und klimafreundliche Bauprodukte und -praktiken zu schaffen (Kapitel 5.2.1). Zur Überbrückung von noch bestehenden Differenzkosten und zum Anreiz für einen Markthochlauf klimafreundlicher Baustoff-Produktionsprozesse ist finanzielle Unterstützung empfehlenswert (Kapitel 5.2.2). Zudem braucht es für alle Stakeholder:innen entlang des Planungs- und Bauprozesses, die bislang noch keine Erfahrungen mit LCA sammeln konnten, Weiterbildungsmöglichkeiten, aufklärende Informationen und Arbeitsmaterialien für den Wissensaufbau, zur Veranschaulichung und als Praxishilfe (Kapitel 5.2.3). Schlussendlich sollte eine verbesserte Datengrundlage geschaffen werden (Kapitel 5.2.4).

5.2.1 Baurecht modernisieren

Die Vielfalt der Dekarbonisierungsansätze, die Dringlichkeit der Umsetzung und die komplexe Ausgangslage in der Wertschöpfungskette erfordern parallele Schritte zur Modernisierung des Bau- und Planungsrechts. Es gilt, das **Baurecht so zu modernisieren**, dass nachhaltige, zirkuläre und klimafreundliche Bauprodukte und -praktiken unterstützt werden. Dazu sind die Bauordnungen auf Bundes- und Landesebene dahingehend zu überarbeiten, zu vereinfachen und gegebenenfalls zu vereinheitlichen.

Eine zentrale Maßgabe sollte dabei die prioritäre Nutzung von Bestandsgebäuden im Sinne der Abfallpyramide im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) sein (Zimmermann et al., 2023). Auch die Aspekte Trennbarkeit, sortenreine Rückbaubarkeit, Nutzungsflexibilität, Vereinfachung der Bauvorschriften im Hinblick auf Holzbau und Lowtech (Brandschutz, Schallschutz) sind zeitgemäß und mit Hinblick auf Klima- und Ressourcenschutz zu stärken. Eine baurechtliche Gleichstellung oder Erleichterung von wiederverwendeten, recycelten oder nachgewachsenen Roh- und Baustoffen würde weitere Anreize zur Reduktion von ECE liefern und neue Absatzmärkte beziehungsweise -sicherheiten für diese Materialien und Produkte ermöglichen.

5.2.2 Finanzielle Unterstützung anbieten

Öffentliche Fördermittel an die Lebenszyklusemissionen und damit auch die ECE von Gebäuden zu knüpfen, wird von einer Mehrheit von Expertinnen und Experten als (sehr) effektiv und (sehr) gut umsetzbar erachtet (Europäische Kommission, 2024a). Angesichts knapper Haushalte und der Prämisse eines effizienten Steuermiteileinsatzes ist die Ausgestaltung von Förderprogrammen zur Reduktion von ECE im Neubau jedoch gut auszubalancieren,

da der Fokus auf den Bestand einen zentralen Hebel darstellt (Kapitel 2.2) und die **Förderung von energetischen Sanierungen** ökonomisch besonders effizient ist (Heinrich et al., 2024). Die **Neubauförderung** sollte zukünftig deshalb stärker **auf sozial- und wohnungspolitisch erforderliche Anwendungsgebiete** und die Schaffung von **Leitmärkten** für klimafreundliche Grundstoffe fokussiert werden.

Als dem bisher maßgeblichen Förderinstrument zur Dekarbonisierung von Neubauten kommt der Überarbeitung des **QNG** eine zentrale Rolle zu (Kapitel 4.1.1). Die Systematik ist mit den in Kapitel 5.1 beschriebenen Vorschlägen zu ordnungsrechtlichen Vorgaben zu harmonisieren. Vordergründig braucht es dafür separate Anforderungswerte für die Herstellungsphase (Graaf und Broer, 2023) nach oben beschriebener Methodik. Gleichzeitig müssen die Anforderungswerte verschärft werden, um Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen. In diesem Zusammenhang sollten die Förderstufen (bislang PLUS und PREMIUM) an die stufenweisen Anforderungswerte (Herstellungs-Klimaklassen) geknüpft werden (Kapitel 5.1.3).

Weitere zielgerichtete finanzielle Anreize können durch **Investitionszuschüsse oder Wettbewerbe** gesetzt werden. Innovative Bauweisen aus wiederverwendeten oder nachwachsenden Materialien sind heute zwar bereits gut erforscht, aber die Übertragung in die Praxis scheitert oft an aufwendigen bürokratischen Prozessen. Hier könnten in für die Skalierung vielversprechenden Fällen Zuschüsse (zum Beispiel zu Brandschutz- oder Standsicherheitsversuchen) gewährt werden. KMU könnten, den Beispielen Dänemarks und der Niederlande folgend (Kapitel 4.3), finanzielle Unterstützung bei der Erstellung von EPDs und deren Aufnahme in die ÖKOBAU-DAT erhalten.³² Auch die Fortführung des „Holzbau-Plus“-Preises sowie eine analoge Auszeichnung mit

dem Fokus auf zirkuläres Bauen, die im Rahmen der NKWS eingeführt werden könnte, können einen finanziellen und kommunikativen Anreiz setzen.

5.2.3 Aus- und Weiterbildungen sowie Informationen anbieten

Die Berechnung von ECE findet bislang nur freiwillig, zum Beispiel im Rahmen von Zertifizierungen oder für den Erhalt von Fördergeldern statt. Insofern gibt es bislang zu wenige Fachkräfte, welche Gebäude-Ökobilanzen durchführen könnten. Diesem Nadelöhr muss frühzeitig, vor der Einführung von Anforderungswerten, begegnet werden. Die Relevanz von Weiterbildungs- und Informationsmaßnahmen bescheinigt auch eine Befragung auf europäischer Ebene (Europäische Kommission, 2024a). Dazu sind folgende Aspekte maßgeblich:

Die Lebenszyklusanalyse von Gebäuden sollte **fester Bestandteil im Grundstudium eines jeden gebäudebezogenen Studienganges** werden. Angehende Architekt:innen, Ingenieur:innen (Bauingenieurwesen, Gebäudetechnik) sowie Projektentwickler:innen benötigen eine grundlegende Kenntnis der Zusammenhänge zwischen verbautem Material, Austauschzyklen und Umweltauswirkung sowie sich daraus ergebenden Fallstricken, um resiliente und ökologische Gebäude planen und umsetzen zu können. Damit wären die Fachkräfte der Zukunft auch auf die mittelfristig geltenden Anforderungen und Entwicklungen vorbereitet.

Es braucht eine breite **Weiterbildungsoffensive für Fachkräfte**, welche die Berechnung der ECE durchführen können. Als Zielgruppe kommen dafür Architekt:innen, Energieberater:innen sowie Ausschreibungsexpertinnen und -experten in Frage. Bund und Länder müssen hier in enger Zusammenarbeit mit den Bildungsträgern, zum Beispiel den Architekt:innen- und Ingenieur:innenkammern sowie privaten Akteur:innen, wie der DGNB, am Aufbau von Weiterbildungskapazitäten arbeiten, zum Beispiel durch gezielte Förderung. Zur Qualitätssicherung, zur Nachweisführung und zur einfachen Kontaktaufnahme durch Bauherr:innen kann, wie bislang auch,

³² Je nach Komplexität des Produkts können die Kosten zwischen 2.000 und 30.000 Euro pro EPD liegen, werden jedoch von Experten und Expertinnen aller Fachrichtungen eher am oberen Ende dieses Spektrums geschätzt. Als ein Prüfer und Herausgeber von EPDs erhebt das Institut für Bauen und Umwelt, das die EPD-Online-Datenbank koordiniert, zusätzlich zu den jährlichen Mitgliedsbeiträgen 2.000 Euro für die Prüfung einer EPD.

die Energieeffizienz-Expertenliste (EEE-Liste) mit der Kategorie „Zusatzqualifikation für Lebenszyklusanalyse (LCA)“ genutzt werden (Boie, 2023).

Neben den Planenden und Durchführenden müssen auch die **Genehmigungsbehörden** auf die neuen Anforderungen vorbereitet werden. Die Kommunalverwaltungen sind für die Überprüfung der Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben verantwortlich. Der Bund beziehungsweise die Länder sollten hier **finanziell** (Ausbildung, Personal) und **technisch** (Entwicklung und Bereitstellung von automatisierten Tools für die Prüfung) **Unterstützung gewähren**. In diesem Zusammenhang empfiehlt es sich, die Einführung der Ökobilanzprüfung **mit der Digitalisierungsagenda kommunikativ und logistisch zu verknüpfen**.

5.2.4 Datengrundlage schaffen

Die **ÖKOBAUDAT** ist bereits heute die **zentrale Datenbank** für LCA-Kennwerte in Deutschland. Bei einer gesetzlichen Verpflichtung zur Berechnung von ECE wird sich die Nachfrage und der Qualitätsanspruch an diese Datenquelle deutlich erhöhen. Dem muss entsprechend frühzeitig begegnet werden. Genauigkeit, Robustheit und Nutzbarkeit der verfügbaren Produktdaten können noch verbessert werden. Dazu bedarf es einer **möglichst schnellen Umstellung** auf nach DIN 15804:A2 konforme Datensätze. Weiterhin sollte eine **verbesserten Datenlage** im Bereich der TGA (insbesondere Photovoltaik) sowie eine kontinuierliche und schnelle (automatisierte) Erfassung neuer, innovativer erneuerbarer Baustoffe und von (produktspezifischen und verifizierten) EPDs angestrebt werden. Auch die Erarbeitung und Bereitstellung von Daten zu den bislang wenig berücksichtigten (A4–A5) oder schwer zu prognostizierenden Lebenswegphasen (B2–B4, C) zählt genauso zu den künftigen Weiterentwicklungsaufgaben wie die Weiterentwicklung der Methodik von prospektiven beziehungsweise dynamischen LCAs. Dazu ist die zuständige Behörde (BBSR) durch den Bund angemessen **finanziell und personell auszustatten**.

Zwar spielen andere Softwaretools bereits eine zentrale Rolle auf Markt, dennoch wird das kostenlose, **öffentliche Online-Tool** eLCA des BBSR bei entsprechend steigender Durchführung von Ökobilanzen an Bedeutung beziehungsweise absoluten Nutzer:innenzahlen gewinnen. Darauf muss das Tool vorbereitet und durch eine umfassende Integration von Standardkomponenten und eine erhöhte Bedienungsfreundlichkeit sowie Automatisierung verbessert werden. Auch die Einrichtung von Schnittstellen zu anderen (privatwirtschaftlichen) Tools und zur Genehmigungseinreichung (inklusive Export des Gebäuderessourcenpasses) würden das Tool zukunftsfitter machen. Eine Aktualisierung beziehungsweise **Harmonisierung mit den Vorgaben aus der neu zu schaffenden gesetzlichen Grundlage und dem QNG** sind ebenfalls frühzeitig anzustoßen und umzusetzen.

Ähnlich dem *Low Emission Steel Standard* (LESS) (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2024) sollte die Entwicklung ähnlicher freiwilliger, privatwirtschaftlicher Label- und Kennzeichnungssysteme für klimafreundliche Grundstoffe (Zement, Beton, Kunststoffe) unterstützt werden, zum Beispiel durch Stakeholder:innenprozesse oder Förderungen. Diese Kennzeichnungen können die ECE-Regulierung erleichtern.

Schlussendlich muss die Thematik der ECE generell noch weiter an Bekanntheit gewinnen. Während der Beitrag von Dämmmaßnahmen oder Wärmepumpen zum Klimaschutz den meisten Laiinnen und Laien bereits bekannt ist, ist der Einfluss der Herstellungsphase auf die Klimabilanz eines Gebäudes den meisten noch unklar. Es braucht **umfassende, zielgerichtete Kommunikationsmaßnahmen**, die sich diesem Thema annehmen und eine breite Bevölkerung beziehungsweise relevante Akteur:innen dafür sensibilisieren. Einen Teil dieser Bemühungen könnte auch eine zentrale **Online-Datenbank von Leuchtturmprojekten** darstellen.

Anhang

Methodik und Annahmen zu Kapitel 1.2

Einleitung

Dieses Kapitel beschreibt den methodischen Ansatz zur Entwicklung der Klimaschutzgesetz-Zielpfade für Embodied-Carbon-Emissionen. Im Folgenden werden die Schritte genauer dargelegt, die unternommen wurden, um die Pfade für die ECE des Neubausektors in Deutschland im Einklang mit dem deutschen Klimaschutzgesetz zu entwickeln.

Abbildung 28 fasst den gewählten Ansatz zur Etablierung eines Dekarbonisierungspfades basierend auf dem Klimaschutzgesetz zusammen.

Für jeden der abgebildeten Schritte ist eine Datengrundlage notwendig, die aus verschiedenen im Folgenden dargelegten Quellen gesammelt wurde. Der zentrale Schritt besteht darin, dem Neubau von

Gebäuden ein CO₂-Budget zuzuweisen und schließlich die *Downscaling*-Prinzipien anzuwenden, um einen konkreten Zielpfad zu berechnen.

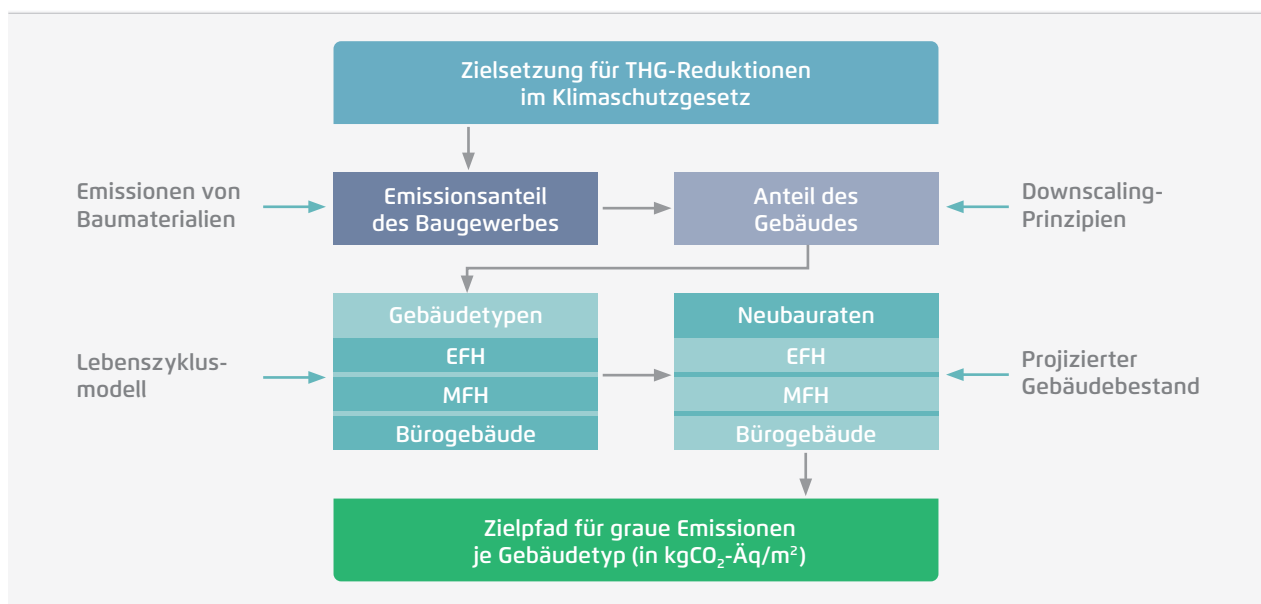
Datenquellen und -konsolidierung

Die folgenden Datenpunkte sind notwendig, um Zielpfade für Embodied-Carbon-Emissionen bis ins Jahr 2045 zu berechnen:

1. das verfügbare (verbleibende) deutsche THG-Budget im Einklang mit dem Klimaschutzgesetz
2. prognostizierte Bau- und Renovierungsaktivitäten im deutschen Gebäudebestand nach Gebäudetyp (in m²)
3. Informationen zur Struktur der deutschen Wirtschaft in Bezug auf Wertschöpfung und den Einsatz von Inputgütern, ausgedrückt in den deutschen Input-Output(I-O)-Konten, erweitert um die Umweltauswirkungen (Treibhausgasemissionen)

Methodik für die Erstellung von Emissionszielpfaden basierend auf dem Klimaschutzgesetz

→ Abb. 28



Agora Industrie und Ramboll (2024). THG = Treibhausgas; EFH = Einfamilienhäuser; MFH = Mehrfamilienhäuser

4. durchschnittliche Werte für *Embodied-Carbon*-Emissionen aus LCA-Schätzungen auf Gebäudelevel.

Bezüglich des verfügbaren THG-Budgets wurden historische (und konsolidierte) Daten zu den gesamten (Netto-)THG-Emissionen der deutschen Wirtschaft für die Jahre 1990 (Referenzjahr des Klimaschutzgesetzes), 2021 und 2022 (jüngste Datenpunkte) vom Umweltbundesamt übernommen (Umweltbundesamt, 2023a). Als Zielwerte der jährlichen Emissionen in der Zukunft wurden die bestehenden Ziele für die Jahre 2030, 2040 und 2045 berücksichtigt, wie sie im Klimaschutzgesetz ausgewiesen sind. Dem Gesetz zufolge soll Deutschland bis 2030 eine Netto­reduktion der Emissionen um 65 Prozent, bis 2040 um 88 Prozent und bis 2045 um 100 Prozent im Vergleich zu 1990 erreichen.

Als letzter Schritt wurde das gesamte Kohlenstoffbudget für Deutschland berechnet. Dies geschah abzüglich des erwarteten Beitrags von Kohlenstoffabscheidung, insbesondere Abscheidung von biogenen Energieträgern (BECCS), zur Reduktion der THG-Emissionen in der Industrie. Dadurch konnte das verbleibende CO₂-Budget bis zum Jahr 2045 berechnet werden, in dem Klimaneutralität angestrebt wird.

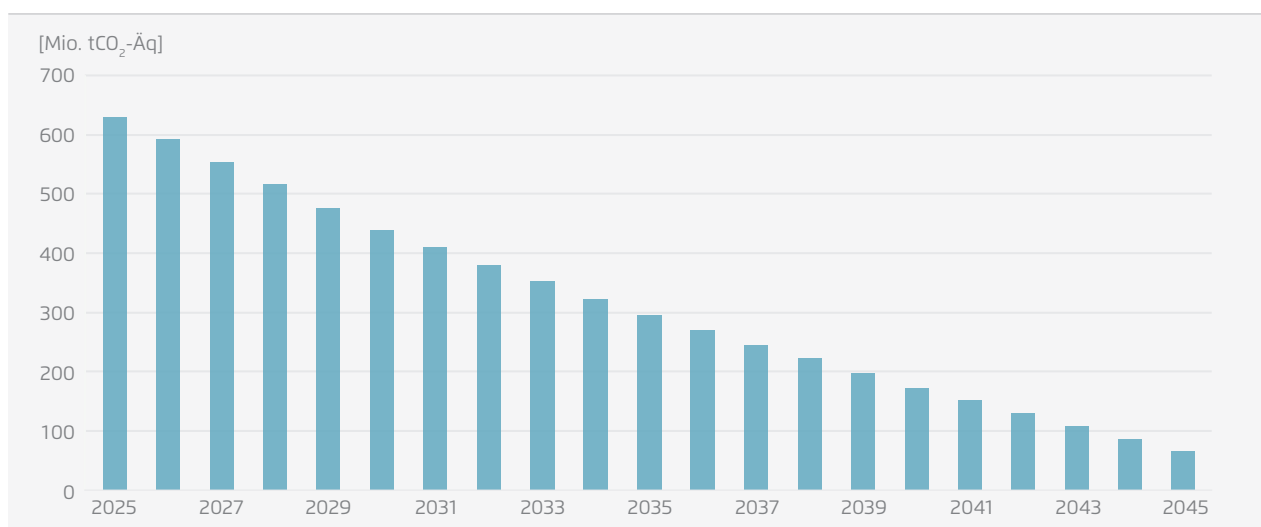
Ohne BECCS wird der Industriesektor voraussichtlich im Jahr 2045 immer noch etwa 65 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr ausstoßen (Agora Energiewende, 2021). Das ermittelte CO₂-Budget ist in Abbildung 29 dargestellt.

Definition von *Downscaling*-Prinzipien

Die Herunterskalierung des nationalen THG-Budgets auf den angemessenen Anteil der Emissionen neuer Gebäude am gesamten Budget ist ein wichtiger Schritt, um die verbleibenden Emissionsmengen für den Bau verschiedener Gebäudetypen zu ermitteln. *Downscaling*-Prinzipien legen fest, wie diese Aufteilung des Gesamtbudgets durchgeführt wird, um ein konkretes Budget für Teilgruppen wie bestimmte Wirtschaftssektoren zu erstellen. Es ist erwähnenswert, dass jedes Zuschreibungsprinzip normative Implikationen hat. Die Auswahl der Prinzipien entscheidet darüber, was oder wer mehr emittieren darf als andere. Im konkreten Fall wurde das gesamte THG-Budget für Deutschland durch das Klimagesetz vorgegeben angesehen und die Herabstufung bezieht sich auf die Bestimmung des Anteils des Gebäudesektors an dieser Summe.

Deutsches Treibhausgasbudget von 2021 bis 2045 im Einklang mit dem Klimaschutzgesetz

→ Abb. 29



Agora Industrie und Ramboll (2024). Berechnung nach Klimaschutzgesetz

Im Rahmen einer zuvor durchgeführten Literaturrecherche zur Anwendung von *Downscaling*-Prinzipien im Gebäudekontext wurde deutlich, dass *Grandfathering* das am häufigsten verwendete *Downscaling*-Prinzip ist, da die Berechnungen auf weitgehend vergleichbaren Emissionsdaten basieren können.

Bei der Berechnung und Darstellung des Pfades zur Reduktion der ECE haben wir daher vor allem den *Grandfathering*-Ansatz untersucht, aber auch eine Sensitivitätsanalyse anhand des in diesem Zusammenhang ebenfalls häufig verwendeten Ansatzes beruhend auf wirtschaftlicher Wertschöpfung durchgeführt.

In Tabelle 6 werden die beiden ausgewählten *Downscaling*-Prinzipien detaillierter vorgestellt.

Im gesamten Ansatz können Elemente beider *Downscaling*-Ansätze gefunden werden, bevor die hauptsächliche Methode angewendet wird. Der Hauptbeitrag des jeweiligen *Downscaling*-Ansatzes besteht darin, den angemessenen Anteil der Emissionen des Bausektors an der national zulässigen Gesamtemission zu bestimmen.

Downscaling für den Bausektor

Die Gesamtauswirkungen aller wirtschaftlichen Aktivitäten in Deutschland werden nach Angaben des Umweltbundesamtes im Jahr 2021 auf 762 Millionen Tonnen CO₂-Äq geschätzt. Allerdings kann nur ein Teil dieser Emissionen auf den Bau von Gebäuden sowie die dazu notwendigen Materialien und Energie zurückgeführt werden. Daher werden von Agora (2023) Daten zu THG-Emissionen und Materialverbrauch in Nachfragesektoren, einschließlich Gebäuden, in Deutschland verwendet, um den Anteil der Emissionen abzuschätzen, der als Embodied-Carbon-Emissionen zusammengefasst wird. Die folgenden wesentlichen Baumaterialien für den Neubau von Gebäuden werden auf der Grundlage vorhandener Übersichtsstudien berücksichtigt, wie in Abbildung 6 dargestellt: Stahl, Kunststoffe sowie Zement und Beton. Diese Auswahl erfasst die wichtigsten Emissionstreiber.

Darüber hinaus wird aus den Umweltbilanzen der deutschen I-O-Tabellen eine Schätzung der Emissionsbeiträge anderer im Bauwesen verwendeter Metalle berechnet, insbesondere für den Bereich Nichteisenmetalle, die häufig in technischen Systemen verwendet werden, und einige andere Elemente. Der Anteil der Wertschöpfung durch

Zusammenfassung der *Downscaling*-Prinzipien → Tabelle 6

<i>Downscaling</i> -Prinzipien	Beschreibung	Zugrunde liegendes Prinzip der Verteilungsgerechtigkeit
<i>Grandfathering</i>	Das Treibhausgasbudget wird auf der Grundlage früherer oder aktueller Emissionswerte zugewiesen und über die Zeit verteilt. Derzeitige Emittenten mit hohen Emissionen haben auch relativ höhere Kohlenstoffbudgets.	Erworbene Rechte: keine theoretische Rechtfertigung, da der Anteil auf historischen Daten darüber basiert, wie groß der Anteil war, den der Sektor zuvor erworben hat.
Wirtschaftliche Wertschöpfung	Bestimmt die gesamte Bruttowertschöpfung jedes Industriesektors als Anteil an der gesamten Wirtschaftsaktivität im Land. Der Ansatz berücksichtigt die Wertschöpfung und nicht den Bedarf oder Nutzen, den die Industrien den Endverbraucher:innen bieten.	Wirtschaftliche Bedeutung: Industriezweigen mit einer relativ großen Wertschöpfung wird ein proportional großer Anteil des Emissionsbudgets zugewiesen.

Agora Industrie und Ramboll (2024)

Nichteisenmetalle im Baugewerbe an der Gesamtwertschöpfung wird mit den Emissionen verrechnet, die durch die Gesamtproduktion in der Branche verursacht wurden. Schließlich werden auch indirekte Emissionen aus der Energienutzung für die Herstellung von Baumaterialien in die Schätzung des verkörperten Kohlenstoffs einbezogen, um dem Verursacherprinzip gerecht zu werden. Diese werden für das Jahr 2021 basierend auf einem Bericht des Umweltbundesamtes (2023) geschätzt, in dem die indirekten Energieemissionen des Bausektors im Jahr 2014 aufgeführt sind. Ihr Anteil an den Gesamtemissionen des Energiesektors wurde auf die Emissionen des Jahres 2021 angewendet.

Diese Kombination von Quellen und Methoden zur Bildung der Basisemissionswerte ist notwendig, da Berichte und Datenbanken nicht alle Sektoren und Materialien konsistent detailliert abdecken. Die verschiedenen Ansätze sind ein Beispiel für die Kombination zwischen der Abhängigkeit von Emissionsdaten (*Grandfathering*) und Sektorinputs auf der Grundlage des wirtschaftlichen Werts (Wertschöpfung). Insgesamt ergibt diese Berechnung, dass aus diesen verschiedenen Sektoren etwa 45,3 Millionen Tonnen CO₂-Äq auf Embodied-Carbon-Emissionen im Bausektor entfallen, was etwa 5,9 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2021 entspricht.

Basierend auf der wirtschaftlichen Wertschöpfung im Bausektor sind in Deutschland 56,1 Prozent der Wertschöpfung des nationalen Bausektors auf den Bau von Gebäuden zurückzuführen. Durch Multiplikation des Anteils der Emissionen, die auf Embodied-Carbon-Emissionen von Gebäuden zurückzuführen sind, mit dem Wertschöpfungsanteil für den Hochbau kann so ein Gesamtanteil von 3,3 Prozent der nationalen Treibhausgasemissionen berechnet werden. Mit diesem Anteil wurde das *Downscaling* nach dem *Grandfathering*-Prinzip durchgeführt.

Informationen zur aktuellen Struktur der deutschen Wirtschaft, gemessen an der Bruttowertschöpfung und den Treibhausgasemissionen pro Sektor, wurden der I-O-Rechnung für das Jahr 2020 entnommen, die von Destatis (Statistisches Bundesamt, o. J.)

veröffentlicht wurde.³³ Diese Informationen wurden verwendet, um das Prinzip der wirtschaftlichen Wertschöpfung anzuwenden und die Verkleinerung auf den Bausektor durchzuführen. Bei Anwendung dieses Prinzips wird folglich der relative Anteil der Wertschöpfung des Gebäudebausektors an der gesamten Wertschöpfung zugrunde gelegt. Dies entspricht circa 3,2 Prozent, was mit dem Anteil von 56,1 Prozent der durch den Bau von Gebäuden geschaffenen Wertschöpfung multipliziert wird. Dies führt zu einer Gesamtallokation von 1,8 Prozent der nationalen Treibhausgasemissionen für den Hochbau.

Korrektur für Emissionen in der Nutzungsphase und während Renovierungen

Der auf den Bau von Gebäuden entfallende Anteil am nationalen Treibhausgashaushalt umfasst auch Aktivitäten in der Nutzungsphase wie Unterhalt, Reparatur und Sanierung im Rahmen von Renovierungen. Daher muss der zuvor berechnete Anteil korrigiert werden, um Materialeinsatz und Emissionen späterer Lebenszyklusphasen auszuschließen. So wird eine Budgetüberschreitung durch die künftige Nutzung der heute errichteten Gebäude sowie durch laufende Renovierungen des Gebäudebestands vermieden.

Hierzu stützen wir uns auf Schätzungen der Lebenszyklus-CO₂-Emissionen der Nutzungsphase (LCA-Module B1-B5) für jeden der betrachteten Gebäudetypen (EFH, MFH, Bürogebäude). Diese basieren auf den relativen Anteilen von ECE des Baus und der Nutzungsphase, wie sie in einer laufenden Studie für die Europäische Kommission (Röck et al., 2023) modelliert wurden, in der die Treibhausgasemissionen von Gebäuden und Konstruktionen in der EU

33 Die Input-Output-Konten für Deutschland messen die inländische Produktion und Nutzung von Gütern nach Industrie und nach Waren. Diese Informationen werden normalerweise in einer Reihe detaillierter Tabellen organisiert, die zeigen, wie Branchen miteinander und mit dem Rest der Wirtschaft interagieren. Diese Konten dienen unter anderem als Grundlage für Wirtschaftsanalysen und Prognosen zur wirtschaftlichen Entwicklung. Hauptnutzer sind die Bundesministerien in Deutschland, die Deutsche Bundesbank, Wirtschaftsforschungsinstitute und Think Tanks sowie internationale Organisationen wie die OECD.

über den gesamten Lebenszyklus analysiert werden. Dabei wird der Anteil der Lebenszyklusemissionen im Zusammenhang mit der Materialproduktion erfasst, der später in der Lebensdauer eines Gebäudes nach Abschluss seines ursprünglichen Baus anfällt. Ein gewichteter Anteil von 26,1 Prozent wurde unter Berücksichtigung der in der Nutzungsphase erfassten Emissionen berechnet. Als Gewichtungsfaktor wurden die Werte für die jeweiligen Gebäudetypen und deren Anteil am Bauvolumen herangezogen. Letzteres steht im Einklang mit der prognostizierten Neubauproduktivität in Deutschland, wie sie in der Agora-Energiewende-Studie *Klimaneutrales Deutschland* modelliert werden (Zahlen für 2024). Die berechneten 26,1 Prozent stellen den Anteil des verkörperten CO₂-Budgets dar, der künftigen Renovierungsmaßnahmen des neu gebauten Gebäudevolumens von Büro- und Wohngebäuden zugewiesen wird.

Während im vorherigen Absatz die Nutzungsphase neuer Gebäude berücksichtigt wurde, werden darüber hinaus auch mehr bestehende Gebäude renoviert, wofür Materialien verwendet werden. Daher wurde ein zusätzlicher Korrekturfaktor hinzugefügt, um

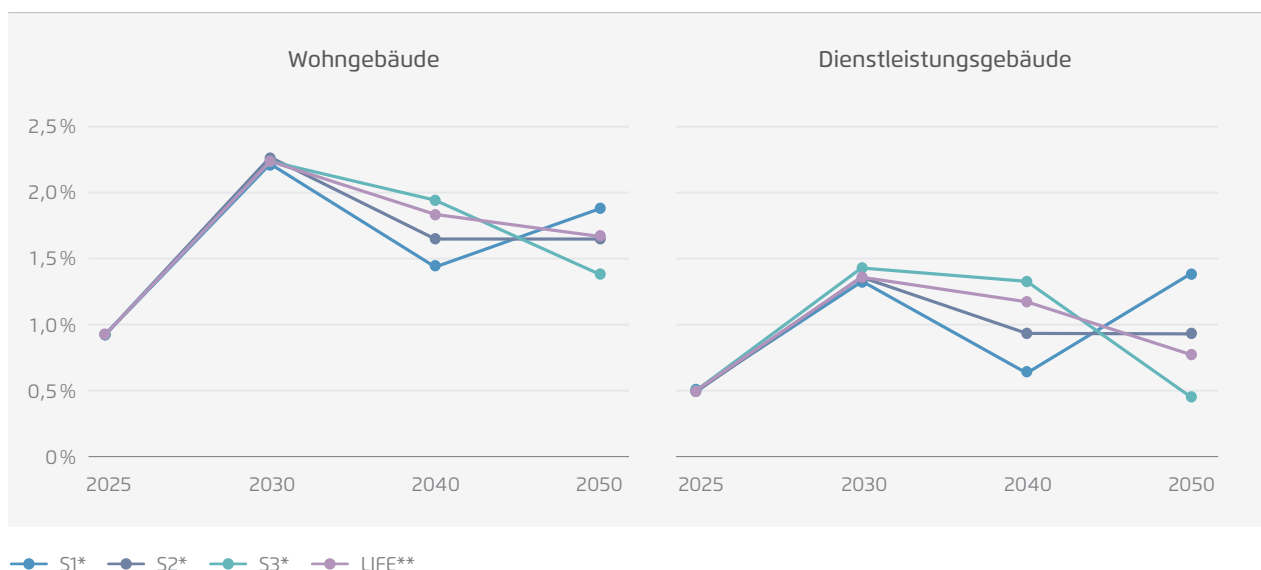
den Anteil von 26,1 Prozent anzupassen, je nachdem, wie viele weitere Gebäude in den kommenden Jahren renoviert werden. Die jährliche Renovierungsrate wurde als gewichteter Durchschnitt zwischen der prognostizierten Renovierungsrate für Wohn- und Dienstleistungsgebäude³⁴ geschätzt, wie dies in der aktuellen Folgenabschätzung zur Mitteilung der Europäischen Kommission zum europäischen Klimaziel für 2040 und zum Weg zur Klimaneutralität bis 2050 (Europäische Kommission, 2024c) vorgenommen wird. Wenn man die Sanierungsrate auf den gesamten Gebäudebestand anwendet, wird geschätzt, dass die renovierte Gebäudebestandsfläche jedes Jahr größer sein wird als die jährlich neu gebaute Grundfläche. Die jährlichen Sanierungsraten sind in Abbildung 30 anhand des von der EU-Kommission empfohlenen S3-Szenarios dargestellt.³⁵

34 Zu den Dienstleistungsgebäuden zählen Nichtwohngebäude für Büros, Einzelhandel und andere Dienstleistungsbereiche.

35 Das S3-Szenario erreicht eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um rund 85 Prozent im Jahr 2040.

Renovierungsraten für Wohn- und Dienstleistungsgebäude von 2020 bis 2050

→ Abb. 30



Europäische Kommission (2024c). *S1, S2 und S3 sind drei Szenarien, die alle Klimaneutralität im Jahr 2050 erreichen, jedoch mit unterschiedlichen Netto-Treibhausgas-Werten im Jahr 2040. **Das LIFE-Szenario umfasst weitere gesellschaftliche Trends, die die künftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen verändern können.

Modellierte durchschnittliche Embodied-Carbon-Emissionen der Bauphase (A1–A3) 2021

→ Tabelle 7

Gebäudetyp	Durchschnittliche CO ₂ -Äq Emissionen (kgCO ₂ -Äq/m ²)
Einfamilienhaus	347
Mehrfamilienhaus	299
Bürogebäude	447

Agora Industrie, ifeu und Ramboll (2024)

Durch Anwendung der beiden beschriebenen Korrekturfaktoren wird das Treibhausgasbudget für den Bau neuer Gebäude und abzüglich Renovierungstätigkeiten geschätzt. Das angepasste Budget schwankt im Laufe der Zeit, da die Renovierungsrate bis zu einem Höhepunkt im Jahr 2030 ansteigt und dann in den Folgejahren abnimmt. Grund dafür ist die dringende Notwendigkeit, die Energieeffizienz bestehender Gebäude zu verbessern, was dann zu einem langsam sinkenden Sanierungsbedarf führt.

Integration von projizierter Bauaktivität und LCA-Werten

Als vergleichbare Funktionseinheit wird der Zielpfad als zulässige THG-Emissionen pro Quadratmeter ausgedrückt. Dafür ist die projizierte Neubaufäche ein zentraler Input. Eine Differenzierung nach Gebäudetyp ermöglicht dabei je nach Gebäudetyp unterschiedliche Dekarbonisierungspfade, die mit unterschiedlichen Bauaktivitäten und unterschiedlichen ECE im Ausgangszustand verbunden sind. Diese Differenzierung gewährleistet auch die Übereinstimmung mit der Archetypmodellierung in dieser Studie. Hierzu sind Daten zur gesamten prognostizierten Entwicklung der Geschossfläche in Quadratmetern sowie Informationen zur Aufteilung zwischen Gebäudetypologien aktuell und in Zukunft erforderlich.

Die Daten zur prognostizierten Neubautätigkeit pro Jahr bis 2045 stammen aus der Studie *Klimaneutrales Deutschland* von Agora Energiewende (2021) und wurden auf die neuesten Schätzungen (2024) aktualisiert (siehe Abbildung 32). Diese enthält

prognostizierte Daten pro Gebäudetyp (EFH, MFH und Nichtwohngebäude), die in Nettogrundfläche (in Millionen m²) umgerechnet wurden. Die detaillierte Grundfläche für Bürogebäude wurde unter Berücksichtigung des Anteils der Büroquadratmeterfläche an den gesamten Nichtwohngebäuden geschätzt, sie entspricht 19 Prozent im Jahr 2022. Dieser Anteil wurde konstant gehalten, um die prognostizierte Nettogrundfläche bis 2045 zu berechnen.

Schließlich wurden die durchschnittlichen Werte von Embodied-Carbon-Emissionen aus der Lebenszyklus-Analyse der für diese Studie durchgeführten Archetypenmodellierung für die drei Gebäudetypen entnommen. Anhand der Werte für das Jahr 2021 wurden zunächst die relativen Emissionsanteile je Gebäudetyp ermittelt. Die betrachteten Werte, ausgedrückt in kg CO₂-Äq/m², wurden als gewichtete Durchschnittswerte der Medianwerte pro Baustoff und im Verhältnis der im Bauwesen verwendeten Materialien (Ziegel, Beton, Holz usw.) berechnet. Diese Werte sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Berechnung von Dekarbonisierungspfaden für verkörperten Kohlenstoff

Als letzter Schritt zur Berechnung der ECE nach Gebäudetyp wurde das auf den Bau von Gebäuden herunterskalierte jährliche Kohlenstoffbudget auf die betrachteten Gebäudekategorien entsprechend dem prognostizierten jährlichen Wachstum der Nettogrundfläche pro Gebäudetyp und dem relativen Wert verteilt. Die resultierenden Pfade werden in Kapitel 1.2 vorgestellt.

Ereignisse

Zielpfad zur Reduktion von Embodied-Carbon-Emissionen
basierend auf dem Klimaschutzgesetz

→ Tabelle 8

	2025		2030		2035		2040		2045	
	<i>Grandfathering</i>	Wirtschaftliche Wertschöpfung	<i>Grandfathering</i>	Wirtschaftliche Wertschöpfung	<i>Grandfathering</i>	Wirtschaftliche Wertschöpfung	<i>Grandfathering</i>	Wirtschaftliche Wertschöpfung	<i>Grandfathering</i>	Wirtschaftliche Wertschöpfung
EFH	342	168	213	96	146	60	90	33	35	11
MFH	295	145	184	83	126	52	77	28	30	10
Büro	440	216	275	124	189	77	115	42	45	15

Agora Industrie, ifeu und Ramboll (2024)

Methodik und Annahmen zu Kapitel 2.1

Daten

Insgesamt wurden 16 Studien beziehungsweise Datenpakete identifiziert, die sowohl Real- als auch Modellgebäude beinhalten. Sie umfassen 138 Gebäude in 187 Varianten. Unter einer Variante wird eine in der Konstruktionsart oder energetischen Qualität abweichende Ausführung desselben Gebäudes verstanden. Die identifizierten Daten wurden anschließend auf Konsistenz, Bezugnahme auf aktuell gültige Normen, Plausibilität, vergleichbare Datenbasis (ÖKOBAUDAT-Versionen nach 2013), Nachvollziehbarkeit und für diese Studie ausreichende Detailtiefe geprüft und aussortiert. Nach Abschluss der Datenauswahl lagen der Analyse 21 Datensätze in 51 Varianten für Ein- und Zweifamilienhäuser, 41 Datensätze in 75 Varianten für Mehrfamilienhäuser und 52 Datensätze in 55 Varianten für Bürogebäude zugrunde.

Bauweisen

Die Datensätze wurden, wo möglich, nach der Bauweise, also dem überwiegend verwendeten Material (für die Tragstruktur), eingeteilt. Die Einteilung erfolgte entsprechend den Bezeichnungen in den Studien beziehungsweise in Einzelfällen wurde manuell in die passenden Kategorien eingeteilt. Zum Beispiel werden Gebäude in manchen Studien als Holzgebäude bezeichnet, obwohl nur die Fassade aus Holz besteht, oder es wird nur allgemein von Holzbau gesprochen, statt weiter zu differenzieren. Bei Angaben zu genauen Aufbauten der Bauteile wurde entsprechend kategorisiert oder der Datensatz bei mangelnder Datenverfügbarkeit oder -detailliertheit verworfen. Die Einteilung erfolgt in folgende fünf Kategorien:

→ **Stahlbeton:** mineralische Massivbauweise aus Beton in Kombination mit Bewehrungsstahl, Fertigteile oder Ortbeton, Hüllbauteile sind aus Effizienzgründen gedämmt.

→ **Ziegel:** mineralische Massivbauweise aus vermörtelten/vermauerten Ton-Ziegeln als Hochlochziegel, mit Dämmung gefüllt oder mit zusätzlicher Dämmschicht, teilweise mit Vorsatzschale aus Vollziegeln.

→ **Kalksandstein:** Mineralische Massivbauweise aus vermörtelten/vermauerten Kalksandstein-Ziegeln mit zusätzlicher Dämmschicht.

→ **Massivholz:** Massivbauweise aus (überwiegend) Brettspertholz oder Brettstapelholz mit ergänzenden mineralischen Bauteilen aus Brandschutzgründen (zum Beispiel Gipskarton-Beplankung oder Stahlbeton-Treppenhäuser) und zusätzlichen Dämmmaterialien.

→ **Holzleichtbau:** Leichtbauweise bei der Holzbalken/-träger ein Grundgerüst bilden (Holzrahmenbau, Holztafelbau, Holzskelettbau) und mit verschiedenen Materialien (zum Beispiel OSB-Platten) zur statischen Aussteifung beplankt werden, Ausfachung der Tragstruktur mit verschiedenen Dämmmaterialien, je nach Brandschutzvorgaben zusätzliche Beplankung mit mineralischen Bauteilen (zum Beispiel Gipskarton) oder einzelne Gebäudeteile aus nicht brennbaren Materialien (zum Beispiel Treppenhaus aus Stahlbeton).

Wirkungsindikator

Nur eine Studie verwendet die aktuelle Version der ÖKOBAUDAT (Deurer und Steinbach, o. J.), welche die Werte für das GWP_{fossil} separat ausweist. Nach stichprobenartiger Überprüfung wurde vereinbart angenommen, dass die GWP_{gesamt} -Werte nach alter (DIN EN 15804:2012) und neuer Norm (DIN EN 15804:2020) und damit ÖKOBAUDAT-Version vergleichbar sind. Aus Deurer und Steinbach (o. J.) wurden je Gebäudetyp und Bauweise pauschale Umrechnungsfaktoren von GWP_{gesamt} zu GWP_{fossil} ermittelt und auf alle Datensätze angewendet.

Bezugsfläche

In der Literatur zeigen sich mehrere Varianten hinsichtlich der verwendeten Bezugsfläche. Die ECE werden etwa auf den Quadratmeter Bruttogeschossfläche (BGF), Energiebezugsfläche (EBF), Nutzfläche (NF), Nettogeschossfläche (NGF), Nettoraumfläche (NRF) oder Wohnfläche (Wfl.) bezogen. Mit Faktoren von Kalusche (2023), Müller (2023), Zimmermann et al. (2023), BMWi und BMUB (2015) und dem Verein Deutscher Ingenieure (2013) wurden alle Werte auf die NRF nach DIN 277:2021-08 bezogen, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Berücksichtigung Gebäudetechnik

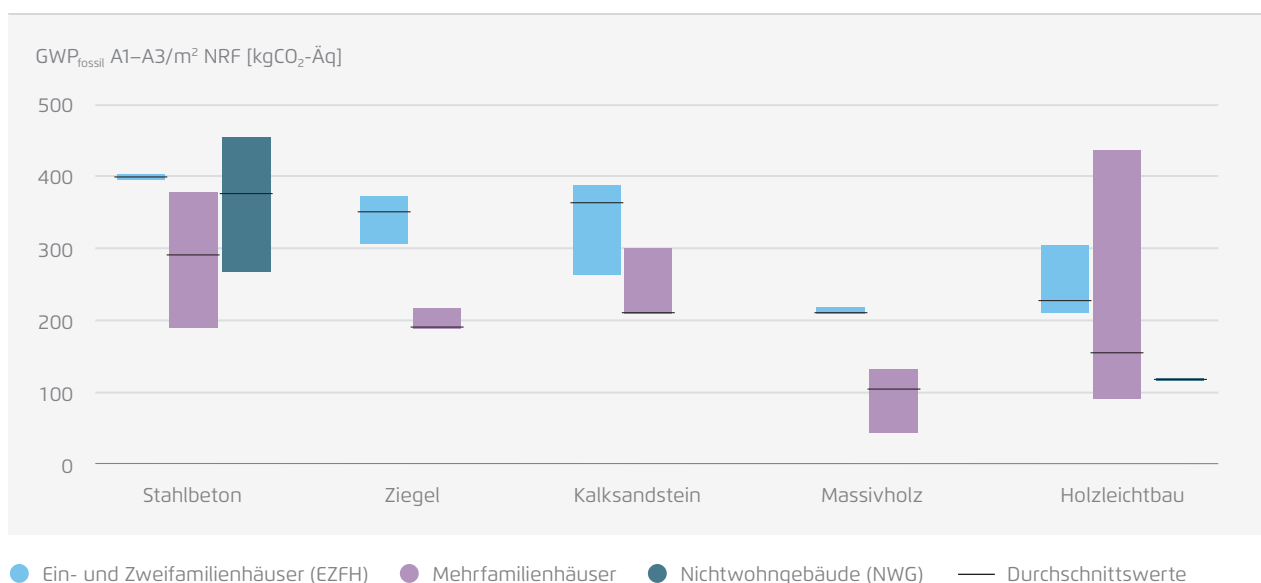
Da lediglich eine Studie bei der Quantifizierung von Plusenergiegebäuden explizit Photovoltaik-Anlagen in KG 400 miteinbezieht, welche je nach Variante 17 bis 21 Prozent der THG-Emissionen in A1–A3 umfasst (Mahler et al., 2019), wurden PV-Anlagen herausgerechnet, um Vergleichbarkeit sicherzustellen.

Detail-Ergebnisse

Im Gegensatz zu den mineralischen Bauweisen ergeben sich beim Holzbau, insbesondere bei der Holzleichtbauweise, große Abstände zwischen unterem und oberem Quartil. Dies liegt einerseits darin begründet, dass der Umfang des Einsatzes von Holz je Gebäude sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. Besonders relevant wird dies bei den MFH, wo sich aufgrund verschiedener Größen unterschiedliche Gebäudeklassen und damit Anforderungen an den Brandschutz ergeben. Dies hat je nach Bauordnung zur Folge, dass mehr oder weniger nicht brennbare (mineralische) Materialien – zum Beispiel Gipskarton als Beplankung oder Stahlbeton für Treppenhäuser – eingesetzt werden müssen, was sich stark auf das Ökobilanz-Ergebnis auswirkt. Ein weiterer Grund dafür liegt in der gewählten Methodik (Umrechnungsfaktoren von GWP_{gesamt} zu GWP_{fossil}) und der geringen Stichprobengröße, wodurch Ausreißer stärker ins Gewicht fallen.

Kennwerte für Embodied-Carbon-Emissionen in heutigen Gebäuden in Deutschland nach Bauweisen

→ Abb. 31



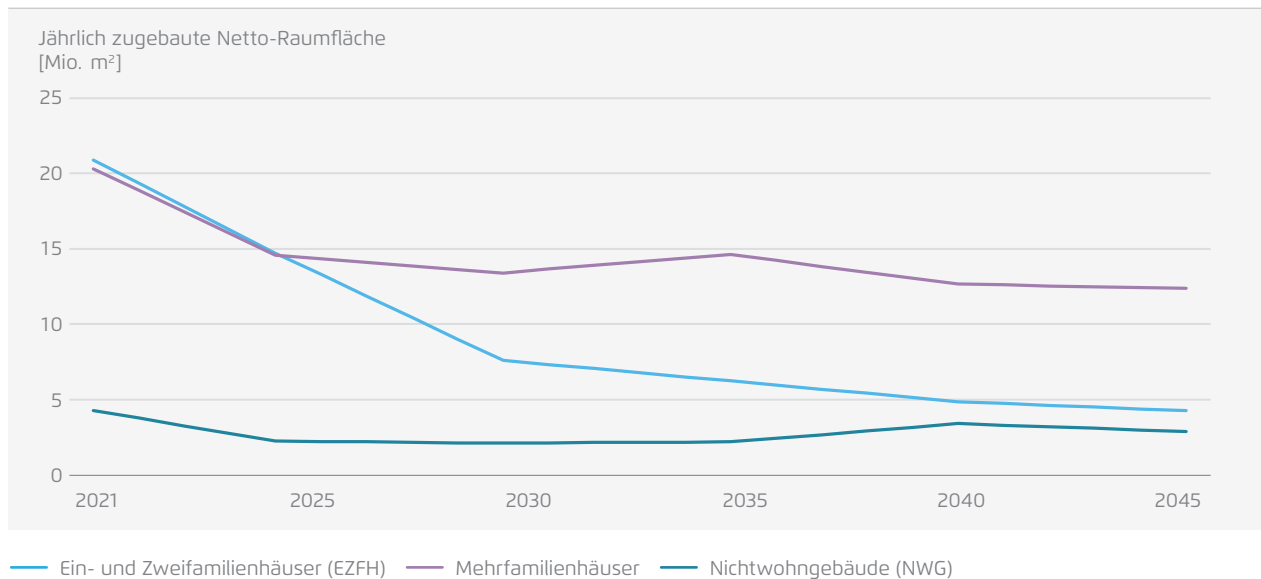
Agora Industrie und ifeu (2024). GWP = Global warming potential; NRF = Nettoraumfläche nach DIN 277

Methodik und Annahmen zu Kapitel 3.1

Neubauraten

Angenommene Entwicklung der Neubauaktivitäten zwischen 2021 und 2045

→ Abb. 32



Agora Industrie und ifeu (2024) basierend auf Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (erscheint demnächst)

LCA-Startwerte

Es wurden die oberen Quartile der ermittelten GWP_{fossil} -Kennwerte der verschiedenen Gebäudetypen und Bauweisen als Ausgangswerte im Basisjahr 2021 verwendet. Die nach Bauweise gewichteten Startwerte betragen für EZFH 347 kg/m^2 , für MFH 299 kg/m^2 und für Bürogebäude 447 kg/m^2 .

Bauteilaufbauten). Gleichzeitig wird eine Erhöhung des Anteils von Recycling- und Reuse-Material und damit eine Abnahme des Primärrohstoffverbrauchs angenommen. Das Potenzial hierfür wird auf insgesamt rund 20 Prozent bis 2045 abgeschätzt (Deilmann et al., 2017) und gleichmäßig jährlich aufgeteilt.

Dekarbonisierung Bauteile

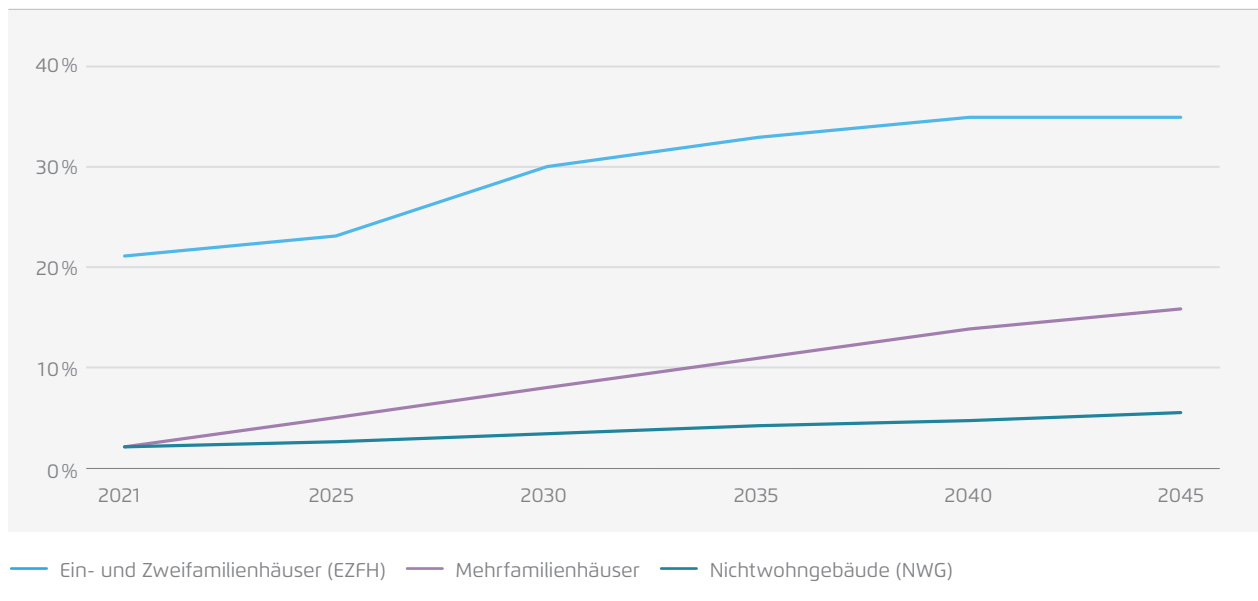
Zukünftig gebäude- beziehungsweise planungsseitig stattfindende Emissionsminderungen wurden in der Modellierung methodisch über zwei Wege abgebildet. Im Szenario TRANSFORM GEB wurde angenommen, dass bis 2035 jeweils die Werte des unteren Quartils aus der Meta-Analyse durch entsprechende planerische (heute bereits umsetzbare) Maßnahmen erreicht werden (zum Beispiel Materialeffizienz, verbesserte

Holzbauquote

Als Parameter für die Materialsubstitution von mineralischen zu nachwachsenden Baustoffen wurde die Holzbauquote herangezogen. Ausgangspunkt sind die aktuellen Fertigstellungs-Statistiken (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2024). Dort werden die Neubauten nach ihrem Hauptmaterial eingeteilt, wobei der Anteil der Gebäude, welche überwiegend Holz als Material verwenden, als Holzbauquote definiert ist. Die Bezugseinheit ist dabei der

Entwicklung der Holzbauquote nach Gebäudetypen zwischen 2021 und 2045

→ Abb. 33



Destatis (2024)

Anteil am fertiggestellten umbauten Raum. Die Holzbauquote betrug 2021 bei EZFH 21 Prozent, bei MFH 2 Prozent und bei Büros 2 Prozent (Destatis, 2024). Darauf aufbauend wurde ein realistisches Szenario für TRANSFROM GEB festgelegt, wie sich die Holzbauquote bis 2045 entwickelt. Sie steigt bei allen drei Gebäudetypen deutlich an. 2045 beträgt sie bei EZFH 35 Prozent, bei MFH 16 Prozent und bei Büros 6 Prozent (Abbildung 33). Maßgabe dafür war einerseits das aus Klimaschutzgründen politische Ziel, die Holzbauquote zu erhöhen. Andererseits gibt es mittel- bis langfristig auch Grenzen der Holznutzung (siehe 2.1.2). Insofern sollte die verbaute Holzmenge trotz der rückläufigen Neubaumenge in etwa auf dem heutigen Niveau verbleiben.³⁶ Im Modell werden die Benchmarks der jeweiligen Bauweisen mit dem entsprechenden Anteil am Neubau verrechnet. Die über die ermittelten Benchmarks nicht abbildbaren, aber in den Baustatistiken ausgewiesenen Bauweisen (zum Beispiel Stahl) werden in einer Kategorie „Sonstige“ zusammengefasst und mit einem gemittelten Kennwert der anderen Bauweisen je Gebäudetyp verrechnet.

³⁶ Die Annahmen für die Neubauaktivitäten sind mit der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2045 2.0* von Agora Energiewende (noch nicht veröffentlicht) harmonisiert.

Dekarbonisierungsrate Baustoffe

Um die zukünftige Reduktion der THG-Emissionen bei der Herstellung der Baumaterialien abzubilden, wurde ein durchschnittlicher Faktor für deren jährliche Dekarbonisierungsrate bestimmt. Im BAU-Szenario wurden historische Entwicklungen im Industriesektor fortgeschrieben.³⁷ Für die beiden Optimierungsszenarien wurden acht repräsentative Baustoffe näher analysiert. Vier Baustoffe sind tragende Materialien (Beton, Stahl, Tonziegel, Kalksandsteinziegel) und vier sind Dämmstoffe (EPS, XPS, Mineralwolle, PU). Ausgangswert für jeden Baustoff war eine nach Relevanz gewichtete Mittelung der jeweiligen THG-Emissionen (GWP_{gesamt}) in den Modulen A1 bis A3 (Herstellung), welche den Datensätzen der ÖKOBAUDAT entnommen wurden. Um die Entwicklung dieses Ausgangswertes für den Zeitraum bis 2045 zu bestimmen, wurden zwei parallele Ansätze verfolgt. Einerseits wurden elf Interviews mit produzierenden Unternehmen (oder entsprechenden Verbänden) geführt, um für deren Marktanteile jeweils konkrete Abminderungsfaktoren zu

³⁷ Annahme der Minderung der Industriesektor-Emissionen 1990–2022 = 1,6 Prozent jährlich (Wilke, 2024).

ermitteln. Andererseits wurden für die verbliebenen Marktanteile Werte aus der Literatur beziehungsweise aus Branchendaten, wie jeweiligen Klimaneutralitäts-Fahrplänen, abgeleitet. Für die Entwicklung des deutschen Strommixes wurde ein Modell und Szenario des ifeu herangezogen (ifeu Strommaster, basierend auf Repenning et al. (2021)). Aus diesen Berechnungen konnten für die acht Baustoffe jährliche Dekarbonisierungsraten zwischen 2 und

10 Prozent bestimmt werden. Mit einer aufgrund der THG-Relevanz entsprechend höheren Gewichtung der tragenden Baumaterialien wurde eine jährliche Dekarbonisierungsrate von 5 Prozent für die beiden Optimierungsszenarien festgelegt. Zum Vergleich: Die Obergrenze für Emissionen im ETS (CAP) wird ab 2024 um jährlich 4,3 Prozent und ab 2028 um jährlich 4,4 Prozent abgesenkt (Smith, 2015).

Annahmen über die jährliche Emissionsreduktion von Baustoffen

→ Tabelle 9

Baustoff	Generelle Annahmen	Jährliche Emissionsreduktion
Beton/ Zement	→ Die Minderung der LCA-Module für Beton wurden in Maßnahmen unterteilt, die auf die Herstellung des Betons und des Zements Einfluss nehmen. → Für die Herstellung von Beton wurde lediglich die Minderung im Modul C3 betrachtet. Hier wurden bis 2045 30 % elektrische Brechanlagen im Markt abgeschätzt. Weitere Minderungen wurden nur für die Zementherstellung betrachtet. → Für die Herstellung von Zement liegen folgende Annahmen zugrunde: Für 88 % des Wertes basieren die Minderungen auf dem Fahrplan des VDZ (Schneider et al., 2020). Dies bedeutet eine Steigerung der allgemeinen thermischen Effizienz im Zementwerk um 3 % bis 2030 und um 13 % bis 2050. Ferner wird der zunehmende Einsatz alternativer Brennstoffe von 69 % im Jahr 2023 auf 75 % bis 2030 und 85 % bis 2050 bei einer angesetzten Einsparung im Vergleich zur Kohlefeuerung von 0,7 tCO₂/t Brennstoff angenommen. Für klinkerreduzierte Zemente wurde stellvertretend CEMII/C zu 50 % Marktanteil bis 2030 und zu 100 % Marktanteil bis 2050 angenommen. Diese Annahme gilt nur für Transportbeton. Die abnehmende Verfügbarkeit von Hüttensand wurde mittels einer Erhöhung der Prozessmissionen um 20 % bis 2050 berücksichtigt, verursacht durch den Einsatz calcinierter Tone. → Für 12 % des Zementmarktes und 8 % des Betonmarktes basieren die Minderungen auf einem Hersteller-Interview. Dieser weist 12 % Marktanteil für Zement und 8 % Marktanteil für Transportbeton aus. Ab 2032 wurde die Umrüstung auf Oxyfuel-Öfen (und sukzessive die Umrüstung aller vier deutschen Werke bis 2045) berücksichtigt. Hier liegt eine Abscheidung von 90 % der Emissionen aus der Kalzinierung im Jahr 2050 zugrunde. Ferner wurde ein linearer Anstieg des Anteils von erneuerbarem Strom am Strombedarf bis auf 100 % im Jahr 2045 angesetzt. Laut Herstelleraussage stehen eigene Offshore-Windenergieparks mit einem Umsetzungszeitraum von 5 bis 10 Jahren zur Diskussion.	3%
Ziegel	→ Allgemeine Effizienzsteigerung durch optimierte Strom- und Gasnutzung → Senkung der Prozessemissionen durch Optimierung der Ziegelgeometrie → Einsatz biogener Porosierungsmittel → Entkopplung Ofen-Trockner-Verbund → Brennstoffumstieg auf H₂ in den Tunnelöfen und Trocknung mit Hochtemperatur-Wärmepumpen (HT-WP)	3%
Kalk	→ vollständige Deckung des Energiebedarfs bei der Herstellung durch erneuerbare Energien bis 2045 → somit keine energiebedingten Emissionen aus dem Brennprozess des Kalksteins → folglich Emissionsminderung der Vorkette um 1/3 → ab 2030 Einsatz von CCUS-Verfahren bei der Branntkalkherstellung; Anstieg auf 50 % Anteil bis 2045	–

Fortsetzung

→ Tabelle 9

Baustoff	Generelle Annahmen	Jährliche Emissionsreduktion
Stahl	→ Allgemeine Annahmen: • Emissionsfaktor Strom gem. Projektionsbericht 2021, Werte nach ifeu-Strommaster • Anteil Primärstahl (Sekundärstahl) im Baustahl • 2023 30 % (70 %) • linear sinkend bis 2050 18 % (82 %) → Primärstahl • ab 2024 Anstieg des Anteils Erdgas-Direktreduktion (G-DR) bei der Primärstahlherstellung • angenommene Emissions-einsparung von 26 % (an der Herstellungsphase) im Vergleich zur Hochofenroute (BF) • Peak im Jahr 2032, circa 34 % des Primärstahls über G-DR • ab dann <i>Fade-out</i> aufgrund von Ersatz durch grünen H₂ • parallel <i>Fade-in</i> von Direktreduktion mit grünem Wasserstoff (H-DR) ab 2032 • Anstieg bis auf 100 % im Jahr 2045 • angenommene Einsparung im Vergleich zu BF vereinfacht mit 100 % angesetzt • Gutschrift Modul D parallel zu einsparbaren Emissionen der Herstellungsphase absolut abgemindert → Sekundärstahl • Abminderung der Emissionen aus dem Strombedarf für Elektro-Lichtbogenofen (EAF) analog zum Strommix	8 %
Kalksandstein	→ Effizienzsteigerung Dampferzeugung in Folge des Ersatzes alter Dampferzeuger → Absenkung Kalkgehalt im Kalksandstein-Ziegel → Rekarbonatisierung mit 38 kg CO₂/t KS	2 %
Chemische Industrie allgemein	→ lineare Zunahme MtO-Route auf 70 % der Olefinproduktion ab 2030 bis 2045 → ab 2024 linear abnehmender Anteil an thermisch beheizten Steamcrackern; 20 % verbleibender Anteil im Jahr 2050, Rest über elektrisch beheizte Steamcracker	–
EPS	→ herstellerabhängiger Umstieg auf H₂-gefeuerte Dampferzeuger ab 2030 linear auf 100 % bis 2045 → Umstellung auf Biogas in der Dampferzeugung → Zubau PV auf EPS-Werken → 80 % Anteil im Markt von PS-Loop-Granulat bis 2050	10 %
XPS	→ Abminderung strombasierter Extrusion über Strommix	9 %
PU	→ Abminderung Strombedarf über Strommix → zunehmende Verwertung der Reste als Klebepressplatten	7 %
Mineralwolle	→ 1/3 Steinwolle, 2/3 Glaswolle → vollständiger Umstieg auf E-Schmelze bis 2045 (Steinwolle) → Umstieg auf H₂ oder Biogas bei 50 % des Marktes bis 2045 (Glaswolle)	6 %

Agora Industrie und ifeu (2024)

Methodik und Annahmen zu Kapitel 3.2

Im Allgemeinen besteht die Datengrundlage für die Schätzung von Kostenunterschieden aus den im Bericht zitierten Quellen sowie Diskussionen mit Gebäudeplaner:innen bei Ramboll sowie Branchenexpertinnen und -experten.

Organisation	Expertise
WV Stahl	Industriespezialist Stahlproduktion
Verein Deutscher Zementwerke (VDZ)	Industriespezialist Zement- und Betonproduktion
Ramboll	Interview 1: Bau- und Kostenplanung Interview 2: Lebenszyklusanalyse und Verwendung kohlenstoffarmer Materialien

Der Vergleich von weitgehend emissionsfreien Produktionstechnologien mit konventioneller Produktion basiert auf folgenden Datenquellen und Annahmen:

Allgemeine Annahmen

Emissionshandelspreis von ETS-Zertifikaten			
	2030	2040	2050
ETS-Zertifikatpreis (Euro pro Zertifikat)	132	179	210

Agora Industrie (2022a) und (2022b)

Wasserstoffpreis			
	2030	2040	2050
Wasserstoffpreis (Euro pro kg H)	5,24	3,70	3,70

Agora Industrie (2024) basierend auf Agora Industrie (2022a)

Preis von Kohlenstoffabscheidung und -speicherung, inklusive Transport und Einlagerung			
	2030	2040	2050
CCS-Preis (Euro pro Tonne CO ₂)	170	130	130

Agora Industrie (2024) basierend auf IEA (2023)

Industriespezifische Annahmen und Datenquellen

Zement und Beton:

- Aufschlüsselung der Kosten von Zementproduktion und alternativen Technologien basierend auf Agora Industrie (2022b)
- Kosten von Energieträgern und CO₂-Emissionen wie oben beschrieben
- Kosten von bereits verfügbaren klinkereffizienten Betonen basierend auf Preislisten aus dem Jahr 2023 von Holcim und CEMEX für die Expositions-klasse XC1 and Festigkeitsklasse C20/25 im Vergleich mit konventionellen Betonen dieser Klassen

Primärstahl:

- Aufschlüsselung der Kosten von Produktionstechnologien für Primärstahl basierend auf Agora Industrie (2022a)
- Kosten von Energieträgern und CO₂-Emissionen wie oben beschrieben

Sekundärstahl:

- Aufschlüsselung der Kosten von Produktionstechnologien für Sekundärstahl basierend auf Material Economics (2019)
- Kosten von Energieträgern und CO₂-Emissionen wie oben beschrieben

Ziegelprodukte

- Aufschlüsselung der Kosten von Produktionstechnologien für Ziegelprodukte basierend auf dem Transformationspfad zu Klimaneutralität im Jahr 2050 ohne Einsatz von alternativen Tonen (Pfad 3a) in Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie und FutureCamp (2021)
- Produktionsmengen von verschiedenen Ziegelprodukten basierend auf Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie (2023)
- Kosten von Energieträgern und CO₂-Emissionen wie oben beschrieben

Literaturverzeichnis

Aeschi, S. (2023): *Baukosten – Auswirkungen der Materialteuerung*. Abrufbar unter: <https://der-haus-eigentuer.ch/artikel/baukosten-auswirkungen-der-materialteuerung-bauen-65611#:~:text=Baumteisterarbeiten%20machen%20knapp%20%20Prozent,einen%20Zehntel%20der%20Baukosten%20aus>

Agora Energiewende (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045 (Datenanhang)*. Abrufbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/daten-tools/klimaneutrales-deutschland-2045-datenanhang>

Agora Energiewende, FutureCamp, Wuppertal Institut, Ecologic Institut (2021): *Klimaschutzverträge für die Industrietransformation*. Analyse zur Stahlbranche. Berlin, München, Wuppertal. Abrufbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_10_DE_KIT/AEW_230_Klimaschutzvertraege-Industrietransformation-Stahl_WEB.pdf

Agora Energiewende, ifeu, Institut für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart (2024): *Der Sanierungssprint für Ein- und Zweifamilienhäuser*. Potenzial und Politikinstrumente für einen innovativen Ansatz zur Gebäudesanierung. Abrufbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-12_DE_Sanierungssprint/A-EW_328_Sanierungssprint_WEB.pdf

Agora Energiewende, Wuppertal Institut (2019): *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*. Berlin. Abrufbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf

Agora Industrie (2022a): *Transformationskostenrechner Stahl*. Abrufbar unter: <https://www.agora-industrie.de/daten-tools/transaktionskostenrechner-stahl>

Agora Industrie (2022b): *Transformationskostenrechner Zement*. Abrufbar unter: <https://www.agora-industrie.de/daten-tools/transaktionskostenrechner-zement#downloads>

Agora Industrie (2023): *Labels for climate-friendly basic materials: A guide to the debate*. Abrufbar unter: <https://www.agora-industry.org/publications/labels-for-climate-friendly-basic-materials>

Agora Industrie (2024): *Creating markets for climate-friendly basic materials*. Potentials and policy options. Abrufbar unter: https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projekte/2023/2023-29_IND_Lead_Markets/A-IND_330_Lead_Markets_WEB.pdf

Agora Industrie, Systemiq (2023): *Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft*. Abrufbar unter: <https://www.agora-industrie.de/publikationen/resilienter-klimaschutz-durch-eine-zirkulaere-wirtschaft>

Auer, T., Bell, D., Frischknecht, R., Gruber, E., Halbauer, J., Lauss, L., Lipp, B., Malter, I., Munoz-Czerny, U., Nagler, F., Paech, N., Simon, S., Vetter, A., Zelger, T. (2023): *Lowtech im Gebäudebereich: Fachsymposium TU Berlin 16.05.2022*. Herausgegeben vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. 1. Auflage, Stand März 2023. Schriftenreihe Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis, Band 32. Bonn. Abrufbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2023/band-32-dl.pdf;jsessionid=287E0AB7F678709550200FBBE9A53608.live21321?__blob=publicationFile&v=2

Bashmakov, I. A., Nilsson, L. J., Acquaye, A., Bataille, C., Cullen, J. M., de la Rue du Can, S., Fischedick, M., Geng, Y., Tanaka, K. (2022): *Industry*. In IPCC (2022): *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel

on Climate Change. Cambridge, New York. Abrufbar unter: <https://dx.doi.org/10.1017/9781009157926>

Bayerische Architektenkammer (o. J.): Gebäudetyp E. Abrufbar unter: <https://www.byak.de/gebaeudetyp-e.html>

Beck-O'Brien, M., Egenolf, V., Winter, S., Zahnen, J., Griesshammer, N. (2022): *Everything from wood. The resource of the future or the next crisis? How footprints, benchmarks and targets can support a balanced bioeconomy transition.* Berlin. Abrufbar unter: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Wald/WWF-Study-Everything-from-wood.pdf?_gl=1*1de5d28*_up*MQ..*_ga*MTkxNTg1OD-k1Mi4xNzExMjg1NzEx*_ga_SY9QPB-X8YW*MTcxMTI4NTcxMC4xLjAuMTcxMTI4NTcx-MC4wLjAuMA

Bellmann, E., Zimmermann, P. (2019): *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie. Hintergrund und Handlungsoptionen.* Berlin.

BNP Paribas Real Estate Consult GmbH (2021): *Market Focus 2022. Investmentmarkt Green Buildings.* Dezember 2021. Abrufbar unter: <https://www.realestate.bnpparibas.de/marktberichte/investmentmarkt/deutschland-market-focus-2022>

Boie, S. (2023): *Energieeffizienz-Expertenliste: Neue Kategorie für Nachhaltigkeit..* dena Newsroom. 17. Oktober 2023. Abrufbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2023/neue-kategorie-in-der-energieeffizienz-expertenliste/>

Braun, N., Hopfensack, L., Fecke, M., Wilts, H. (2021): *Chancen und Risiken im Gebäudesektor für die Umsetzung einer klimaneutralen und ressourcen-effizienten zirkulären Wirtschaft.* Berlin, Wuppertal. Abrufbar unter: https://www.ressourcenwende.net/wp-content/uploads/2021/06/CEWI_Kurzstudie-Gebaeude_2021.pdf

Braune, A., Ruiz Durán, C., Gantner, J. (2018): *Leitfaden zum Einsatz der Ökobilanzierung.* Berlin. DGNB Leitfaden. Abrufbar unter: https://static.dgnb.de/fileadmin/_archiv/de/dgnb_system/service/reports/DGNB-LCA-Leitfaden.pdf

Breidenbach, S., Bußmann-Welsch, T. M., Fischer, L., Grotenrath, A., Heinen, A., Heyl, B., Kroiher, S., Möller, L. C., Nesselhauf, L., Schmülling, H. (2022): *1.5-Grad-Gesetzespaket. Maßnahmenkatalog mit Gesetzesentwürfen.* Berlin. Abrufbar unter: https://germanzero.de/gz-media/pages/assets/bba00f072f-1675869117/1.5-grad-gesetzespaket_germanzero_02_2022.pdf

Bücker, T. (2023): *Fördertopf für klimafreundlichen Neubau ist leer.* 14. Dezember 2023. Abrufbar unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/foerderung-klimafreundlicher-neubau-100.html>

Buildings Performance Institute Europe (BPIE) (2021): *Addressing the Hidden Emissions in Buildings.* Abrufbar unter: <https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2021/12/EPD-Factsheet.pdf>

Bund Deutscher Baumeister (o. J.): *Die 5 BDB Nachhaltigkeitsbausteine.* Website des Bundes Deutscher Baumeister, Architekten und Ingenieure. Abrufbar unter: <https://www.baumeister-online.de/themen-positionen/klimagerechtes-planen-und-bauen/bdb-5nb-die-5-bdb-nachhaltigkeitsbausteine/>

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2023): *Ökobilanzielle Bewertung im Ordnungsrecht: Grundlagen und erste Ansätze zur vereinfachten Bewertung von Gebäuden mit angewandten Ökobilanzen.* BBSR-Online-Publikation 44/2023. Abrufbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2023/bbsr-online-44-2023-dl.pdf;jsessionid=58B841285B6E-9A73452189CF3B78E2B7.live11311?_blob=publicationFile&v=3

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2023): *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS).* 20. April 2023. Abrufbar unter: <https://www.bmuv.de/WS7029>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2015): *Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nicht-wohngebäudebestand.* Berlin. Abrufbar unter: <https://www.bmwi.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2015/07/energieverbrauchswerte-und-vergleichswerte-im-nicht-wohngebueudebestand.html>

enev-online.com/enev_praxishilfen/enev_2014_energieausweis_energieverbrauchswerte_vergleichswerte_nichtwohnbestand_bekanntmachung_15.04.07.pdf

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023): *Leichtbaustrategie der Bundesregierung*. Abrufbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/leichtbaustrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=18

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024a): *Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe. Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)*. Abrufbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/leitmaerkte-fuer-klimafreundliche-grundstoffe.pdf?__blob=publicationFile&v=22

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024b): *Förderprogramm Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Difference, CcFD)*. Abrufbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Foerderung-National/018-pilotprogramm.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024c): *Öffentliche Konsultation zur Transformation des Vergaberechts („Vergabetransformationspaket“)*. Abrufbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Service/Gesetzesvorhaben/oeffentliche-konsultation-zur-transformation-des-vergaberechts.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (2023): *Gemeinsamer Bericht über Forschungsergebnisse zu Methoden zur ökobilanziellen Bewertung von Wohn- und Nichtwohngebäuden*. Abrufbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/088/2008830.pdf>

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (2024): *Einfaches Bauen*. Gebäudetyp E. Leitlinie und Prozessempfehlung. Abrufbar unter: https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/gebaeudetyp-e-leitlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=7

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (2023): *QNG Handbuch Anlage 3 Anhang 3.2.1.2. Regeln zur Bestimmung des Anforderungswertes für QNG Nichtwohngebäude*. Berlin. Abrufbar unter: https://www.qng.info/app/uploads/2023/04/QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-3212_LCA_Anforderung-NW_v1-3.1.pdf

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2023): *Handreichung Holzbauinitiative. Strategie der Bundesregierung zur Stärkung des Holzbaus als ein wichtiger Beitrag für ein klimagerechtes und ressourceneffizientes Bauen*. Abrufbar unter: https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/holzbauinitiative.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Bundesrat (2020): *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI)*. Abrufbar unter: https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2020/0501-0600/539-20.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Bundesstiftung Baukultur, Nagel, R. (2022): *Baukulturbericht 2022/23. Neue Umbaukultur*. Berlin. Abrufbar unter: https://www.bundesstiftung-baukultur.de/fileadmin/files/BKB-22/BBK_BKB-22-23.pdf

Bundesverband Bauindustrie (2024): *Preisentwicklung im Bau(haupt-)gewerbe*. Abrufbar unter: https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Zahlen_Fakten/BrancheninfoBau/BrachenInfo_Bau_-_Preisentwicklung_im_Bauhauptgewerbe.pdf

Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie

(2023): *Jahresbericht 2022*. Abrufbar unter: https://ziegel.de/sites/default/files/2023-06/BVZi_Jahresbericht_2022.pdf

Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie, Futurecamp (2021): *Roadmap für eine treibhausgas-neutrale Ziegelindustrie in Deutschland*. Abrufbar unter: https://ziegel.de/sites/default/files/2021-03/Ziegel_24_110321_Web_200dpi_1.pdf

CEMEX (2024): *Preisliste Region Nord. Transportbeton, Spezialbaustoffe, Betonförderung*. Abrufbar unter: <https://www.cemex.de/docu/wments/46167902/46169315/CEMEX+Preisliste+Beton+Region+Nord+2024.pdf/de0f112d-de06-ef-da-8a13-60d84aa5d1f3?t=1698218914276>

De Wolf, C. (2017): *Low Carbon Pathways for Structural Design: Embodied Life Cycle Impacts of Building Structures*. PhD Thesis. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31570.96960>

Deilmann, C., Krauß, N., Gruhler, K., Reichenbach, J. (2017): *Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Band 06. Zukunft Bauen. Forschung für die Praxis. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)*. Abrufbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2017/band-06-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Destatis (2022): *Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff – Lange Reihen ab 2000–2021*. Abrufbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/baufertigstellungen-baustoff-pdf-5311202.html>

Destatis (2024): *GENESIS-Online*. Abrufbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online#ab-readcrumb>

Destatis (o. J.): *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Inlandsprodukt*. Abrufbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/Inlandsprodukt-pdf-5311202.html>

[destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/_inhalt.html)

Deurer, J., Bunnenberg, L., Schindler, V. (2024): *Analyse bestehender Anforderungen an den Neubau von Wohngebäuden im Rahmen des Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude*. Karlsruhe. Abrufbar unter: https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/2024-04-29_IRES_Gutachten_Analyse_bestehender_Anforderungen_an_den_Neubau_im_Rahmen_des_QNG.pdf

Deurer, J., Steinbach, J. (o. J.): *Der kumulierte Energieaufwand als Förderkriterium im Gebäudebereich*. Karlsruhe. Abrufbar unter: <https://ires.de/2021/07/30/der-kumulierte-energieaufwand-als-foerderkriterium-im-gebaeudebereich/>

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) (2023): *DGNB System. Kriterienkatalog Gebäude Neubau*. Stuttgart. Abrufbar unter: https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/verein/system/DGNB_Kriterienkatalog_V23_Gebaeude_Nebau_Kommentierungsversion.pdf

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) (2024): *Übersicht der Ökobilanztools mit Angaben der Herstellenden (alphabetisch nach Tool-Name)*. Abrufbar unter: https://www.dgnb.de/filestorages/Downloads_unprotected/dokumente/uebersicht-der-oekobilanztools-mit-angaben-der-herstellenden.pdf

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) (o. J.): *Gebäuderessourcenpass*. Abrufbar unter: <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass>

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.) (2024a): *DAfStb-Richtlinie Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Grundlagen und Nachweis am gesamten Tragwerk*. Ausgabe: August 2024. Berlin.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.) (2024b): *DAfStb-Richtlinie Treibhausgasreduzierte*

Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Deckenbauteile. Ausgabe: August 2024. Berlin.

Deutscher Holzwirtschaftsrat (2023): *Akute Hemmnisse für den Holzbau beseitigen.* Berlin. Abrufbar unter: https://www.zdb.de/fileadmin/user_upload/DHWR_Positionspapier_Aktuelle_Hemmnisse_fuer_den_Holzbau_beseitigen.pdf

Dorn-Pfahler, S., Lützkendorf, T. (2023): *Ökobilanzielle Bewertung im Ordnungsrecht. Grundlagen und erste Ansätze zur vereinfachten Bewertung von Gebäuden mit angewandten Ökobilanzen.* Berlin. Abrufbar unter: <https://www.nbau.org/2023/11/04/oekobilanzielle-bewertung-im-ordnungsrecht/>

Europäische Kommission (2020): *Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088.* Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0852&qid=1714667920897>

Europäische Kommission (2024a): *Supporting the development of a roadmap for the reduction of whole life carbon of buildings.* Public consultation analysis. Abrufbar unter: <https://doi.org/doi/10.2779/138684>

Europäische Kommission (2024b): *How does Level(s) work?* Abrufbar unter: https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels/lets-meet-levels/how-does-levels-work_en?prefLang=de

Europäische Kommission (2024c): *Impact Assessment Report Part 1 Accompanying the document Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society.* (SWD/2024/63 final). Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52024SC0063>

Europäisches Parlament (EP) (2024a): *Legislative Entschließung des Europäischen Parlaments vom 23. April 2024 zu dem Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von*

Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG (COM(2022)0142 – C9-0132/2022 – 2022/0095(COD)). Abrufbar unter: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0303_DE.html

Europäisches Parlament (EP) (2024b): *Legislative Entschließung des Europäischen Parlaments vom 12. März 2024 zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung) (COM(2021)0802 – C9-0469/2021 – 2021/0426(COD)).* Abrufbar unter: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0129_DE.html

Europäisches Parlament (EP) (2024c): *Legislative Entschließung des Europäischen Parlaments vom 10. April 2024 zu dem Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten, zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 (COM(2022)0144 – C9-0129/2022 – 2022/0094(COD)).* Abrufbar unter: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/seance_pleniere/textes_adoptes/definitif/2024/04-10/0188/P9_TA\(2024\)0188_DE.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/seance_pleniere/textes_adoptes/definitif/2024/04-10/0188/P9_TA(2024)0188_DE.pdf)

Europäisches Parlament (EP), Rat der Europäischen Union (2023): *Richtlinie (EU) 2023/959 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. Mai 2023 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Union und des Beschlusses (EU) 2015/1814 über die Einrichtung und Anwendung einer Marktstabilitätsreserve für das System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Union (Text von Bedeutung für den EWR).* Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32023L0959>

Expertenrat für Klimafragen (2023): *Stellungnahme zum Entwurf des Klimaschutzprogramms 2023.* Gemäß § 12 Abs. 3 Nr. Bundes-Klimaschutzgesetz. Abrufbar unter: https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2023/09/ERK2023_Stellungnahme-zum-Entwurf-des-Klimaschutzprogramms-2023.pdf

Ganz, N., Grüter, B., Teege, J., Walter, J.-C., Wernet, J., Dierks, C., Knappe, F., Veith, C., Crocoll, R., Stieler, C. (2023): *Der CO₂-Schattenpreis in der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Baden-Württemberg. Arbeitshilfe zur Berücksichtigung eines CO₂-Schattenpreises bei der Planung wasserbaulicher Anlagen.* Stuttgart. Abrufbar unter: <https://www.hochwasser.baden-wuerttemberg.de/documents/20122/39136/Arbeitshilfe-CO2-Schattenpreis-BW.pdf>

Gärtner, S., Hienz, G., Keller, H., Müller, M. (2013): *Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz.* Heidelberg. Abrufbar unter: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/IFEU-2013_Umweltbewertung-Holzkaskadennutzung.pdf

Gebäudeforum Klimaneutral (2021): *Nachwachsende Rohstoffe.* November 2021. Abrufbar unter: <https://www.gebaeudeforum.de/realisieren/baustoffe/nachwachsende-rohstoffe/>

Geres, R., Lausen, J., Weigert, S. (2021a): *Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland.* Hannover. Abrufbar unter: https://www.kalksandstein.de/media/08_downloadcenter/01_roadmap_kalksandsteinindustrie_langfassung.pdf

Geres, R., Lausen, J., Weigert, S. (2021b): *Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland.* Berlin. Abrufbar unter: https://ziegel.de/sites/default/files/2021-03/Ziegel_24_110321_Web_200dpi_1.pdf

Graaf, L., Broer, R. (2023): *Regulierung der Lebenszyklus-THG-Emissionen von Gebäuden.* Berlin. Abrufbar unter: <https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2023/09/Regulierung-der-Lebenszyklus-THG-Emissionen-von-Gebauden-DE-Sept-2023.pdf>

Haberle, H. (2018): *Carbonbeton und Textilbeton: Forschung, Projekte, Begriffe.* DABonline | Deutsches Architektenblatt (blog). 3. April 2018. Abrufbar unter: <https://www.dabonline.de/2018/04/03/paradigmenwechsel-carbonbeton-carbonfasern-textilbeton-bewehrung/>

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., Scrivener, K. L. (2020): *Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries.* Nature Reviews. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>

Hausbaugrundriss.de (2023): *Was kostet ein Haus? Unsere Hausbau-Kosten-Liste!.* Abrufbar unter: <https://www.hausbaugrundriss.de/was-kostet-ein-haus-typische-hausbaukosten>

Heinrich, S., Langreder, N., Grodeke, A.-M., Jessing, D., Wachter, P., Empl, B., Winiewska, B. (2024): *Förderwirkungen BEG WG 2022. Evaluation des Förderprogramms ‚Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)‘ in den Teilprogrammen BEG Einzelmaßnahmen (BEG EM), BEG Wohngebäude (BEG WG) und BEG Nichtwohngebäude (BEG NWG) im Förderjahr 2022.* Berlin, Heidelberg, Gräfeling, Dresden. Abrufbar unter: https://www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/PDF-Anlagen/BEG/beg-evaluation-2022-beg-wg.pdf?__blob=publicationFile&v=4

HENN GmbH (2022): *CUBE Dresden.* Abrufbar unter: <https://www.henn.com/de/projekt/cube>

Hirschnitz-Garbers, M., Hinzmann, M., Lassak, T. (2021): *Zirkuläres Bauen in Berlin – Transformationsroadmap. Circular City Berlin: Vom Potenzial zur Umsetzung.* Herausgegeben von Ecologic Institut, Forschungsverbund Ecor-net Berlin. Wissen. Wandel. Berlin. Report Nr. 10. Abrufbar unter: https://www.ecor-net.eu/fileadmin/ecor-net/user_upload/Ecor-net_Berlin/Ecor-netBerlin_Report10_CiBER_Transformationsroadmap_Bauen.pdf

Holcim (2024a): *Preisliste 2024. Beton und Beton-pumpen Gebiet Stuttgart.* Abrufbar unter: <https://www.holcim-sued.de/sites/sued/files/2023-12/holcim-preisliste-beton-und-betonpumpen-2024-gebiet-stuttgart.pdf>

Holcim (2024b): *Preisliste Region Mitte. Beton und Betonförderung 2024.* Abrufbar unter: https://www.holcim.de/sites/germany/files/docs/holcim-preisliste-beton_2024_mitte.pdf

Holcim (2024c): *Preisliste Region West. Beton und Betonförderung 2024.* Abrufbar unter: https://www.holcim.de/sites/germany/files/2024-01/holcim_preisliste_beton_west.pdf

International Energy Agency (IEA) (2023): *CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market.* Abrufbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0cb5c89-3bd4-4efd-8ef5-57dc327a02d6/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf>

Jarmer, T., Niemann, A., Traub, L., Nagler, F., Franke, L., Auer, T., Varga, Z., Ott, S., Winter, S., Diewald, F., Gehlen, C. (2021): *Einfach Bauen. Ein Leitfaden. Birkhäuser.* Abrufbar unter: https://www.einfach-bauen.net/wp-content/uploads/2023/04/Leitfaden_Online_ueberarbeitet.pdf

Kalusche, W. (2023a): *Holzbau und Massivbau im Vergleich: Beispiel Kindergärten.* Deutsches Architektenblatt. Abrufbar unter: <https://www.dabonline.de/2023/01/25/holzbau-massivbau-guenstiger-vergleich-baukosten-kindergaerten/>

Kalusche, W. (2023b): *Wie groß ist die Wohnfläche von Mehrfamilienhäusern?* DABonline | Deutsches Architektenblatt. 2. Mai 2023. Abrufbar unter: <https://www.dabonline.de/2023/05/02/wie-gross-was-gehoert-zu-wohnflaeche-mehrfamilienhaeuser-wfl-bgf-nuf/>

KfW (o. J.): *Klimaschutzoffensive für Unternehmen (293).* Abrufbar unter: [https://www.kfw.de/inlandswfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Foerderprodukte/Klimaschutzoffensive-fuer-den-Mittelstand-\(293\)/](https://www.kfw.de/inlandswfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Foerderprodukte/Klimaschutzoffensive-fuer-den-Mittelstand-(293)/)

König, H. (2017): *Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden. Im Auftrag vom: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie.* Abrufbar unter: <https://www.lbb-bayern.de/fileadmin/quicklinks/Quick-Link-Nr-98300000-LfU-Gesamtstudie-Lebenszyklusanalyse.pdf>

König, H.; Kohler, N.; Kreißig, J.; Lützkendorf, T. (2009): *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung.* München: DETAIL. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.11129/detail.9783955530129>

Köppen, S., Fehrenbach, H. (2024): *Entwicklung von Kriterien für die Priorisierung der Holznutzung in Deutschland.* Heidelberg.

Landkreis Karlsruhe, SBP Architekten (2022): *Entscheidungsvorbereitung Holz-Hybrid-Bauweise.* Abrufbar unter: https://www.landkreis-karlsruhe.de/PDF/17112022_TOP_003_Anlage_2.PDF?ObjSvrID=3051&ObjID=4873&ObjLa=1&Ext=PDF&WTR=1&ts=1667832400

Le Den, X., Steinmann, J., Kovas, A., Kockat, J., Toth, Z., Röck, M., Allacker, K. (2023): *Supporting a Roadmap for the Reduction of Whole Life Carbon in Buildings.* Abrufbar unter: https://7520151.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7520151/RMC/Content/Ramboll%2c%20BPIE%2c%20KU%20Leuven_Technical%20Report_July%202023.pdf

Mahler, B., Idler, S., Nusser, T., Gantner, J. (2019): *Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus.* Abschlussbericht 132/2019. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abrufbar unter: https://egs-plan.de/web/images/magazin/PDF-Dateien/2019-10-29_texte_132-2019_energieaufwand-gebäudekonzepte.pdf

Material Economics (2019): *Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.* Abrufbar unter: <https://material-economics.com/publications/publication/industrial-transformation-2050>.

Merz, K., Niemann, A., Torno, S. (2020): *Bauen mit Laubholz.* München. Volume in the series DETAIL Praxis. ISBN: 9783955535049

Mission Possible Partnership (2022): *Steel. Pathways to net-zero.* Abrufbar unter: <https://dash-mpp.plotly.host/mpp-steel-net-zero-explorer/>

Müller, H.-S. (2023): *Nettogrundfläche*. Energie-Wiki. 24. Mai 2023. Abrufbar unter: <https://wiki.energie-m.de/Nettogrundfl%C3%A4che>.

Neligan, A., Schleicher, C., Engels, B., Kroke, T. (2023): *Digitaler Produktpass – Enabler der Circular Economy. Relevanz und Umsetzbarkeit durch Unternehmen*. IW Report, Nr. 47, Berlin/Köln. Abrufbar unter: <https://www.iwkoeln.de/en/studies/adriana-neligan-barbara-engels-thorsten-kroke-digital-product-pass-port-enabler-of-the-circular-economy.html>

New Climate Institute (2020): *Decarbonisation Pathways for the EU cement sector*. Abrufbar unter: https://newclimate.org/sites/default/files/2020/12/SGCCC-EU-Cement-paper-NewClimate_Nov2020.pdf

Nordic Council of Ministers, Nordic Innovation (2024): *The Operating Environment of Building LCA and BIM in the Nordics and Estonia*. Abrufbar unter: <https://pub.norden.org/us2023-463/preface.html>

Pfeiffer, M., Hennenberg, K., Böttcher, H., Reise, J., Mantau, U. (2023): *Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK*. Öko-Institut Working Paper 4/2023. Abrufbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf>

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (erscheint demnächst): *Klimaneutrales Deutschland 2045*. Im Auftrag von Agora Think Tanks und Agora Verkehrswende.

Ramboll (2023): *Analysis of LCA studies on buildings planned or designed by Ramboll in 2021–2022*. Publicly accessible information is available in the CO₂mpare tool.

Ramboll (2024): *CO₂mpare database*. Abrufbar unter: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNmUzYmFkYzItMmY3Mi00M2RjLTkwMTYtZjBiOTQ1MDIxYzA1IiwidCI6ImM4ODIzYzIxLWJlODEtNGY4OS1iMDIOLTZjM2RkNzg5YzEwNiIsImMiOiJh9>

Ramboll, BPIE, KU Leuven, Le Den, X., Steinmann, J., Kovacs, A., Kockat, J., Toth, Z., Röck, M., Allacker, K. (2023): *Supporting the Development of a Roadmap for the Reduction of Whole Life Carbon in Buildings*. European Commission – DG ENV. Abrufbar unter: <https://c.ramboll.com/whole-life-carbon-reduction>

Reinhardt, J., Veith, C., Lempik, J., Knappe, F., Mellwig, P., Giegrich, J., Muchow, N., Schmitz, T., Voß, I. (2019): *Ganzheitliche Bewertung von Dämmstoffalternativen – Endbericht*. Heidelberg, Neckargemünd. Abrufbar unter: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Beericht-D%C3%A4mmstoffe_23032020.pdf

Repenning, J., Harthan, R. O., Blanck, R., Böttcher, H., Braungardt, S., Bürger, V., Emele, L., Görz, W. K., Hennenberg, K., Jörß, W., Ludig, S., Matthes, F. C., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Nissen, C., Rausch, L., Scheffler, M., Schumacher, K., Wiegmann, K., Wissner, N., Zerrahn, A., Brugger, H., Fleiter, T., Rehfeldt, M., Rohde, C., Schlomann, B., Yu, S., Steinbach, J., Deurer, J., Osterburg, B., Rösemann, C., Gensior, A., Rock, J., Stümer, W., Rüter, S., Fuß, R., Tiemeyer, B., Laggner, A., Adam, S. (2021): *Projektionsbericht 2021 für Deutschland*. Berlin, Karlsruhe, Braunschweig, Eberswalde, Hamburg: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES GmbH, Thünen-Institut. Abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/projektionsbericht_2021_uba_website.pdf

Rheude, F., Röder, H. (2022): *Estimating the Use of Materials and Their GHG Emissions in the German Building Sector*. Cleaner Environmental Systems 7. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100095>

Röck, M., Mendes Saade, M. R., Balouktsi, M., Nygaard Rasmussen, F., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., Passer, A. (2020): *Embodied GHG Emissions of Buildings – The Hidden Challenge for Effective Climate Change Mitigation*. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.apener1gy.2019.114107>

Röck, M., Ramon, D., Kockat, J., Mastrucci, A., Zhong, X., Maierhofer, D., Obrecht, T., Popek, S. (2023): *Analysis of life-cycle greenhouse gas emissions of EU buildings and construction – Report with quantitative baseline figures for whole life carbon and carbon removals*. Abrufbar unter: <https://ec.europa.eu/docs-room/documents/58196>

Röck, M., Sørensen, A., Tozan, B., Steinmann, J., Horup, L. H., Le Den, X., Birgisdottir, H. (2022): *Towards Embodied Carbon Benchmarks for Buildings in Europe – #2 Setting the Baseline: A Bottom-up Approach*. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5895051>

Scheerer, S. (2023): *C3-V3.1: Ergebnishaushaus des C3-Projektes – CUBE*. TU Dresden. 2023. Abrufbar unter: https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/CRC/C3-vorhaben/C3-V3_4/C3-V3.1?set_language=de

Schneider, M., Behrouzi, D., Fleiger, K., Hoppe, H., Mohr, M., Müller, C., Palm, S., Reiners, J., Richter, T., Rickert, J., Romeike, J., Ruppert, J. (2020): *Dekarbo-nisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien*. Düsseldorf. Abrufbar unter: <https://www.vdz-online.de/aktuelles/deutsche-zementindustrie-auf-dem-weg-in-eine-co2-freie-zukunft>

Schubert, S., Bartke, S., Becken, K., Breitmeier, M., Brozowski, F., DeTroy, S., Grimski, D., Ilvonen, O., Keßler, H., Messner, D., Meilinger, V., von Schlippenbach, U., Schröder, A., Schuberth, J., Hillebrandt, A., Lerm, M., Lützkendorf, T., Reicher, C. (2023): *Umwelt und Klima schützen – Wohnraum schaffen – Lebensqualität verbessern*. Abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_uba_pos_wohnraum-schaffung_bf_2auflage.pdf

Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (2020): *IS-Mahlsdorf Bilanzierung und Bewertung alternativer Bauweisen aus ökologischer Sicht*. Abrufbar unter: <https://www.berlin.de/nachhaltige-beschaffung/studien/holz-versus-stahlbetonbauweise/>

Smith, R. (2015): *Directive 2008/94/EC of the European Parliament and of the Council of 22 October 2008*. London. Abrufbar unter: https://doi.org/10.1007/978-1-137-54482-7_44

Stadtverwaltung der Landeshauptstadt München (o. J.): *Förderprogramm Klimaneutrale Gebäude*. Das offizielle Stadtportal. Abrufbar unter: <https://stadt.muenchen.de/infos/foerderprogramm-klimaneutrale-gebäude.html>

Statista (2023): *Willingness to pay for a sustainability premium in Germany in 2021, by sector*. Abrufbar unter: <https://www.statista.com/statistics/1288667/willingness-to-pay-for-a-sustainability-premium-in-germany/>

Steger, S., Wilts, H., Bergs, L., Bergmann, L. (2022): *Energetische Sanierung von Bestandsgebäuden oder Neubau – Ökologische Bewertung hinsichtlich Materialbedarf, Primärenergieverbrauch und damit verbundenen Treibhausgas-Emissionen*. Wuppertal Institut. Abrufbar unter: https://epub.wuppertalinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7989/file/7989_Energetische_Sanierung.pdf

Steinmann, J., Le Den, X., Röck, M., Allacker, K., Lützkendorf, T. (2023): *Whole life carbon models for the EU27 to bring down embodied emissions from new buildings*. Towards a whole life carbon policy for the EU. Abrufbar unter: https://7520151.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7520151/Towards%20a%20whole%20life%20carbon%20policy%20for%20the%20EU_Ramboll_KULEuven_Jun2023.pdf

Steinmann, J., Röck, M., Lützkendorf, T., Allacker, K., Le Den, X. (2022): *Whole life carbon models for the EU27 to bring down embodied carbon emissions from new buildings*. Review of existing national legislative measures. Zenodo. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7330155>

Tauer, R., Aechtner, J. (2023): *Eine umfassende Circular Economy für Deutschland 2045 zum Schutz von Klima und Biodiversität*. Modell Deutschland Circular Economy. Abrufbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unter->

nehmen/WWF-Modell-Deutschland-Circular-Economy-Broschuere.pdf

Umweltbundesamt (UBA) (2023a): *Emission von Treibhausgasen*. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten>

Umweltbundesamt (UBA) (2023b): *Umwelt und Klima schützen – Wohnraum schaffen – Lebensqualität verbessern*. Abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_uba_pos_wohnraumschaffung_bf_2auflage.pdf

Umweltbundesamt (UBA) (2024a): *Indikator: Emission von Treibhausgasen*. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-emission-von-treibhausgasen>

Umweltbundesamt (UBA) (2024b): *Klimaemissionen sinken 2023 um 10,1 Prozent – größter Rückgang seit 1990*. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimaemissionen-sinken-2023-um-101-prozent>

University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL), Agora Energiewende (2021): *Tomorrow's markets today: Scaling up demand for climate neutral basic materials and products*. CLG Europe. Abrufbar unter: https://www.corporateleadersgroup.com/files/cisl-clg-agera_tomorrows_markets_today_report_0.pdf

Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2013): *VDI-Richtlinie 3807 – Verbrauchskennwerte für Gebäude Blatt 1*. Düsseldorf. Abrufbar unter: https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/richtlinien/inhaltsverzeichnisse/1990561.pdf

Vogl, V., Åhman, M., Nilsson, L. J. (2021): *The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase*. Climate Policy, 21:1, 78–92. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1803040>

Weidner, S., Mrzigod, A., Bechmann, R., Sobek, W. (2021): *Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien*. Beton- und Stahlbetonbau 116 (12): 969–77. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1002/best.202100065>

Weißberger, M. N. (2016): *Lebenszyklus-orientierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik*. München. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.14459/2016MD1325463>

Wilke, S. (2024): *Indikator: Emission von Treibhausgasen*. Umweltbundesamt. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-emission-von-treibhausgasen>

Wirtschaftsvereinigung (WV) Stahl (2023): *Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland*. Berlin. https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2023_Web.pdf

Wirtschaftsvereinigung (WV) Stahl (2024): *Einführung eines Low Emission Steel Standard (LESS) zur Unterstützung der Transformation der Stahlindustrie*. Berlin. Abrufbar unter: https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/20240422_Konzeptpapier_LESS.pdf

Zeumer, M., El Khouli, S., John, V. (2014): *Nachhaltig konstruieren. Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialwahl – Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren*. München. Abrufbar unter: https://issuu.com/detail-magazine/docs/bk_greenbook_nachhkonstr_2014_d_opt

Zimmermann, P., Brischke, L.-A., Bierwirth, A., Buschka, M. (2023): *Unterstützung von Suffizienzansätzen im Gebäudebereich*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Abrufbar unter: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/pdf/Unterst%C3%BCtzung_von_Suffizienzans%C3%A4tzen_im_Geb%C3%A4udebereich_Online_Publication_BBSR_09_2023.pdf

Publikationen von Agora Industrie

Auf Deutsch

Wasserstoffimporte Deutschlands

Welchen Beitrag können Pipelineimporte in den 2030er Jahren leisten?

Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft

Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien

Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland

Analyse mit einer Vertiefung zu Synthetischem Erdgas (SNG) bei nahezu geschlossenem Kohlenstoffkreislauf

Chemie im Wandel

Die drei Grundpfeiler für die Transformation chemischer Wertschöpfungsketten

Power-2-Heat

Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Stahl) – Update

Aktualisierte Analyse zur Stahlbranche

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Zement)

Analyse zur Zementbranche

12 Thesen zu Wasserstoff

Mobilisierung der Kreislaufwirtschaft für energieintensive Materialien (Zusammenfassung)

Wie Europa den Übergang zu einer fossilfreien, energieeffizienten und energieunabhängigen industriellen Produktion vollziehen kann

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Gesamtstudie)

Kurzfristige Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität der deutschen Grundstoffindustrie

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Stahl)

Analyse zur Stahlbranche

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-industrie.de

Publikationen von Agora Industrie

Auf Englisch

Creating markets for climate-friendly basic materials

Potentials and policy options

Direct electrification of industrial process heat

An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU

9 Insights on Hydrogen – Southeast Asia Edition

12 Insights on Hydrogen – Brazil Edition

Low-carbon technologies for the global steel transformation

A guide to the most effective ways to cut emissions in steelmaking

Circular Economy and Net-Zero Industry

Potentials for energy-intensive value chains in Germany

EU policies for climate neutrality in the decisive decade

20 Initiatives to advance solidarity, competitiveness and sovereignty

Labels for climate-friendly basic materials

A guide to the debate

Hydrogen import options for Germany (Summary)

Analysis with an in-depth look at synthetic natural gas (SNG) with a nearly closed carbon cycle

Ensuring resilience in Europe's energy transition

The role of EU clean-tech manufacturing

Chemicals in transition

The three pillars for transforming chemical value chains

Levelised cost of hydrogen

Making the application of the LCOH concept more consistent and more useful

15 Insights on the Global Steel Transformation

12 Insights on Hydrogen – Argentina Edition

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-industry.org

Publikationsdetails

Über Agora Industrie

Agora Industrie erarbeitet unter dem Dach der Agora Think Tanks wissenschaftlich fundierte und politisch umsetzbare Konzepte für einen erfolgreichen Weg zur klimaneutralen Industrie – in Deutschland, Europa und international. Die Denkfabrik agiert unabhängig von wirtschaftlichen und parteipolitischen Interessen und ist ausschließlich dem Klimaschutz verpflichtet.

Agora Industrie

Agora Think Tanks gGmbH
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2
10178 Berlin | Deutschland
T +49 (0) 30 7001435-000

www.agora-industrie.de
info@agora-industrie.de

Korrekturat/Lektorat: Karen Matzke

Satz: Urs Karcher, Anja Werner

Titelfoto: Punkbarby | iStock

341/09-S-2024/DE

Version 1.2, November 2024



Unter diesem QR-Code steht
diese Publikation als PDF zum
Download zur Verfügung.



Dieses Werk ist lizenziert
unter CC-BY-NC-SA 4.0.