
Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft

Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien

STUDIE

Agora
Industrie



Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft

IMPRESSUM

STUDIE

Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft:

Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien

ERSTELLT VON

Agora Industrie
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-industrie.de
info@agora-industrie.de

PROJEKTPARTNER

Systemiq Ltd.
www.systemiq.earth
contact@systemiq.earth

PROJEKTLÉITUNG

Aylin Shawkat
aylin.shawkat@agora-energiewende.de

AUTORINNEN

Aylin Shawkat, Julia Metz (alle Agora Industrie);
Lotte Straathof, Elena Georgarakis, Ioana Simon,
Julia Okatz, Sophie Herrmann (alle Systemiq)

Satz: Urs Karcher
Korrektorat: Infotext GbR
Titelbild: Freepik



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

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wurde in Zusammenarbeit mit Vertreterinnen und Vertretern von Unternehmen und Forschungseinrichtungen entwickelt. Mit dieser Veröffentlichung möchten wir allen Beteiligten für ihre Unterstützung, ihre fachliche Kompetenz und für die konstruktive Diskussion danken. Die Schlussfolgerungen und Ergebnisse dieser Veröffentlichung spiegeln nicht notwendigerweise die Positionen der Beteiligten wider. Die Verantwortung für die Ergebnisse liegt bei Agora Industrie und Systemiq.

Für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung dieser Publikation danken wir insbesondere Holger Alwast (Alwast Consulting); Eleanor Batilliet, Helen Burmeister, Paul Münnich, Bruno Naredo, Frank Peter, Kathy Reimann, Oliver Sartor, Wido Witecka (alle Agora Industrie); Dr. Jahel Mielke, Simon Müller, Hendrik Staudinger, Alexandra Steinhardt, Anja Werner, Sabine Zentek (alle Agora Energiewende); Wilhelm Klümper (alle Agora Agrar); Fanny Tausendteufel (Agora Verkehrswende).

309/04-S-2023/DE

Version: 1.0, September 2023



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

Bitte zitieren als:

Agora Industrie, Systemiq (2023): Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft: Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien

www.agora-industrie.de

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die Grundstoffindustrie in Deutschland steht in den Startlöchern für die Transformation zur Klimaneutralität. Die Reform des Europäischen Emissionshandels gibt dabei einen ambitionierten Pfad für die Minderung der Treibhausgasemissionen vor. Insbesondere die energieintensive Industrie muss dabei unterstützt werden, zügig die notwendigen Investitionen in klimaneutrale Energien und Produktionsprozesse zu tätigen. *Speed* und *scale* sind gefragt.

Die Lieferengpässe in Folge der Corona-Pandemie, Energieversorgungs- und Energiepreiskrisen sowie eine geopolitisch angespannte Lage haben jüngst ein Augenmerk auf die Bedeutung resilienter Versorgungsstrukturen gelegt. Die Industrie muss nicht nur schnell, sondern auch resilient dekarbonisieren. Ein effizienter Energie- und Rohstoffverbrauch ist

zentral. Wer weniger verbraucht, macht sich weniger abhängig und kann oft flexibler reagieren.

Die vorliegende Studie zeigt: Die Kreislaufwirtschaft ist für energieintensive Industrien eine zentrale Dekarbonisierungsstrategie. Durch Recycling, Materialeffizienz und -substitution sowie einer längeren Produktnutzung können energieintensive Wertschöpfungsketten resilienter klimaneutral werden. Mit 3-D-Druck, High-Tech-Recycling und innovativem Produktdesign gibt es in der Kreislaufwirtschaft neue Geschäftsmodelle für die Industrie. Wir zeigen einen politischen Rahmen auf, der dies ermöglicht.

Ich wünsche eine angenehme Lektüre!

Frank Peter
Direktor, Agora Industrie

Ergebnisse auf einen Blick:

1

Resilienz ist ein zentraler Erfolgsfaktor für die Industrietransformation. Die Stärkung der Kreislaufwirtschaft spielt eine entscheidende Rolle für eine zukunftsfähige, klimaneutrale Industrie. Materialeffizienz und Recycling ermöglichen neue Geschäftsmodelle und stärken die Resilienz: Sie reduzieren die Abhängigkeit von Energie- und Rohstoffimporten und erhalten den Wert inländischer Ressourcen.

2

Durch Kreislaufwirtschaft können die Klimaziele schneller, günstiger und mit einem geringeren Energieverbrauch erreicht werden. Mit einer Kombination aus dekarbonisierter Primärproduktion und Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen in den energieintensiven Wertschöpfungsketten von Stahl, Zement und Kunststoffen können bis 2045 die kumulierten THG-Emissionen um 25% reduziert, die Transformationskosten um 45% gesenkt und der Energieverbrauch um 20% reduziert werden.

3

Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie kann mit geeigneten Instrumenten einen Markt für Kreislaufwirtschaftstechnologien und -produkte schaffen. Die Förderung von Schlüsseltechnologien und Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette sowie Standards für kreislauffähige Produktdesigns reizen entsprechende Investitionen an. Standards für den CO₂-Gehalt von Produkten, eine nachhaltige öffentliche Beschaffung und der Abbau regulatorischer Hemmnisse schaffen eine Nachfrage für kreislauffähige Technologien und Produkte.

4

Bei der Transformation zur Klimaneutralität sollte Ressourceneffizienz neben der Energieeffizienz deutlich gestärkt werden. Dies unterstützt neben den klimapolitischen Zielen auch die Ressourcenschonung und stärkt die Wettbewerbsfähigkeit. Die Bundesregierung sollte daher konkrete Ziele für die Reduktion des Ressourcenverbrauchs sowie der Steigerung von Ressourcenproduktivität und Zirkularitätsrate setzen.

Inhalt

Vorwort	3
Abkürzungsverzeichnis	5
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	6
Zusammenfassung	8
1 Kreislaufwirtschaft als Dekarbonisierungsstrategie	12
1.1 Einleitung und Definitionen	12
1.2 Die Rolle der Kreislaufwirtschaft für den Industriestandort Deutschland	14
2 Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen und ihr Treibhausgasreduzierungs­potenzial in Deutschland	24
2.1 Herangehensweise	24
2.2 Ergebnisse	25
2.3 Stahl	27
2.4 Beton und Zement	37
2.5 Kunststoffe	50
2.6 Sektorübergreifend	59
3 Politische Rahmenbedingungen für eine zirkuläre Wirtschaft	61
3.1 Indikatoren als Wegweiser für die Transformation	61
3.2 Eine Frage der Governance: von Indikatoren zur Zielsetzung	67
3.3 Politische Handlungsempfehlungen: Anreize schaffen für einen Markt für zirkuläre Technologien und Materialien	70
3.4 Angebotsseitige Maßnahmen	75
3.5 Nachfrageseitige Maßnahmen	77
Technischer Anhang	85
Annahmen	85
Methodologie	85
Literaturverzeichnis	90

Abkürzungsverzeichnis

BAU	Business-As-Usual
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BF-BOF	Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace
BIM	Building Information Modeling
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism (europäisches CO ₂ -Grenzausgleichssystem)
CCF	Corporate Carbon Footprint
CCUS	Carbon Capture, Utilisation and Storage
CEAP	Circular Economy Action Plan (Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft)
CMUR	Circular Material Use Rate (Zirkularitätsrate)
CPR	Construction Products Regulation (EU-Bauprodukteverordnung)
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
DERec	Direct Effects of Recovery (Anteil der direkten Effekte der Verwertung)
DIERec	Direct and Indirect Effects of Recovery (Anteil der direkten und indirekten Effekte der Verwertung)
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNS	Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie
DPP	Digitale Produktpässe
DRI	Direkt reduziertes Eisen
EAF	Electric Arc Furnace
EOL	End-of-Life (Ende der Nutzungsdauer eines Produkts)
EPBD	Energy Performance of Building Directive
ESPR	Eco-Design for Sustainable Products Regulation (Ökodesign-Richtlinie)
EU-ETS	EU-Emissions Trading System
IDDI	Industrial Deep Decarbonization Initiative
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRP	International Resource Panel
KI	Künstliche Intelligenz
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MPa	Megapascal
MPP	Mission Possible Partnership
NKWS	Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
PET	Polyethylenterephthalat
PS	Polystyrol
ProgRess	Programm für Ressourceneffizienz
PVC	Polyvinylchlorid
QNG	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
SCM	Supplementary Cementing Materials
SDG	Sustainable Development Goals
SSP2	Shared Socioeconomic Pathway #2
THG	Treibhausgas
WLC	Whole Life Carbon

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

- Abbildung 1:** Minderungspotenziale durch die Kombination von Kreislaufwirtschaft und Dekarbonisierung der Primärproduktion in Deutschland
- Abbildung 2:** THG-Emissionen und Materialeinsatz in Nachfragesektoren in Deutschland 2021
- Abbildung 3:** Erwartete Marktreife von Technologien zur Dekarbonisierung der Primärproduktion und der Kreislaufwirtschaft
- Abbildung 4:** THG-Minderungspotenziale durch Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen für Stahl, Zement und Kunststoffe in Deutschland
- Abbildung 5:** Effizienter Bedarf an Erneuerbaren Energien durch Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen in 2045 (Stahl, Zement und Kunststoffe)
- Abbildung 6:** Grenzkostenkurven von Emissionsminderungsmaßnahmen bis 2045 in €/t CO₂-Äquivalente
- Abbildung 7:** Kreislaufwirtschaft als Teil einer umfassenden Klimaschutzagenda für die Industrie
- Abbildung 8:** THG-Minderungspotenzial von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen
- Abbildung 9:** Produktionsrouten und THG-Emissionen der Stahlproduktion im Jahr 2022
- Abbildung 10:** Kreislaufwirtschaft in der Stahlwertschöpfungskette: Handlungsfelder, Technologien und Geschäftsmodelle
- Abbildung 11:** THG-Minderungspotential des Stahleinsatzes in den Gebäude- und Automobilssektoren in Deutschland
- Abbildung 12:** Technologien zur Entfernung von Kupferverunreinigungen in Stahlschrott
- Abbildung 13:** Beton: Produktionsprozess und THG-Emissionen
- Abbildung 14:** Kreislaufwirtschaft in der Zementwertschöpfungskette: Handlungsfelder, Technologien und Geschäftsmodelle
- Abbildung 15:** THG-Minderungspotential des Zement- und Betoneinsatzes im Gebäudesektor in Deutschland
- Abbildung 16:** Einsatzmöglichkeiten von Altbetonbestandteilen bei der Betonproduktion
- Abbildung 17:** Verfügbarkeit von SCM und Betonzusatzstoffen in Deutschland
- Abbildung 18:** Mögliche Substitutionsmaterialien für Baustoffe in Gebäuden
- Abbildung 19:** Jährliche Verfügbarkeit von Holz für den Einsatz in Gebäuden
- Abbildung 20:** Verteilung der Lebenszyklusemissionen der 2019 in Deutschland hergestellten Basischemikalien (Annäherung)
- Abbildung 21:** THG-Minderungspotenzial des Einsatzes von recyceltem Kunststoff in den Sektoren Verpackungen, Gebäude und Automobil in Deutschland
- Abbildung 22:** Kreislaufwirtschaft in der Wertschöpfungskette von Kunststoffen: Handlungsfelder, Technologien und Geschäftsmodelle
- Abbildung 23:** Komplementäre Technologien einer energie- und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe
- Abbildung 24:** THG-Emissionen, Materialeffizienz und Verunreinigungstoleranz verschiedener Kunststoffrecycling-Technologien
- Abbildung 25:** Theory of Change des Effekts von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen auf THG-Emissionen
- Abbildung 26:** Zielsetzung und Monitoring – System einer Kreislaufwirtschaft für Grundstoffe
- Abbildung 27:** Gesamtrohstoffproduktivität, BIP und Fußabdruck des Rohstoffverbrauchs in Deutschland
- Abbildung 28:** Zirkularitätsrate (CMUR) europäischer Mitgliedstaaten

Abbildung 29: Politikinstrumente für Kreislaufwirtschaft in den Grundstoffindustrien und Nachfragesektoren

Abbildung A 1: Integration der vier verwendeten Modelle

Abbildung A 2: Indexierte Entwicklung von Bevölkerung, Flächennachfrage, Pkw und Verpackungen pro Kopf in Deutschland (2020 bis 2050)

Tabellen

Tabelle T 1: Annahmen zu den im Modell betrachteten Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft

Tabelle T 2: Absolute Entwicklung von Bevölkerung, Flächennachfrage, Pkw und Verpackungen pro Kopf in Deutschland (2020, 2030 und 2045)

Infoboxen

Infobox 1: Schrottqualität – ein Problem, das gelöst werden muss?

Infobox 2: Innovative Technologien: Innovative Kupferextraktion nach 2030

Infobox 3: Innovative Technologien: Karbonatisierung von recycelten Feinstoffen

Infobox 4: Mögliche Substitutionsmaterialien im Gebäudebau

Infobox 5: Verfügbarkeit von Bauholz

Infobox 6: Innovative Technologien: Chemisches Recycling durch Solvolyse, Depolymerisation und Gasifizierung

Infobox 7: Sektorspezifische Maßnahmen für den Bereich Verpackungen

Infobox 8: Sektorspezifische Maßnahmen für den Bereich Gebäude

Infobox 9: Sektorspezifische Maßnahmen für den Bereich Fahrzeuge

Zusammenfassung

Eine Kreislaufwirtschaftsstrategie ist für das Erreichen der deutschen Klimaziele unverzichtbar: 25 Prozent kumulative Emissionseinsparungen, reduzierte Risiken in der Lieferkette und bei der Technologieskalierung, 35 bis 55 Prozent geringere Kosten sowie 15 bis 60 Prozent geringere Inanspruchnahme der knappen Erneuerbaren Energien bis 2045 sind im Vergleich zu einem dekarbonisierten, primär linearen Wirtschaftsmodell erreichbar.

Ein Viertel der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland stammt aus dem Industriesektor, davon entfallen allein 50 Prozent auf die energieintensiven Grundstoffe Stahl, Beton und Zement sowie Kunststoffe. Die meisten dieser Materialien (rund 60 Prozent) werden für Gebäude, Fahrzeuge und Verpackungen verwendet (Umweltbundesamt, 2022a).

Eine klimaneutrale Produktion von Stahl, Beton und Zement sowie Kunststoffen erfordert eine Verringerung der Treibhausgasemissionen bei der Primärproduktion – etwa durch die Umstellung auf grünen Wasserstoff, die Elektrifizierung von Prozesswärme oder durch den Einsatz von Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS). Diese Umstellungen sind jedoch abhängig von umfangreichen Investitionen in Infrastruktur, der Skalierbarkeit neuer Technologien sowie der Verfügbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit von erneuerbaren Brennstoffen, Rohstoffen und Strom. Da die Reform des EU-ETS der Industrie einen ambitionierten Dekarbonisierungspfad vorgibt, müssen alle verfügbaren Dekarbonisierungsstrategien in Betracht gezogen werden. Eine Klimastrategie, die sich allein auf die Dekarbonisierung der Primärproduktion konzentriert, läuft Gefahr, die Klimaziele zu verfehlen und sich über das Klima hinaus negativ etwa auf die biologische Vielfalt oder die Wassernut-

zung auszuwirken. Durch eine Kombination aus der Dekarbonisierung der Primärproduktion und Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft kann die Dekarbonisierung der Wertschöpfungsketten von Stahl, Beton und Zement sowie Kunststoffen schneller, resilienter und kosteneffizienter erreicht werden.

Die meisten Technologien der Kreislaufwirtschaft sind marktreif und können sofort in größerem Umfang eingesetzt werden, sofern der erforderliche regulatorische und ökonomische Kontext gegeben ist. Während die Dekarbonisierung der Primärproduktion die knappen Material-, Energie- und Kapitalressourcen stark beansprucht, tragen Strategien der Kreislaufwirtschaft dazu bei, perspektivisch steigende Abhängigkeiten, etwa von kritischen Rohstoffen, zu verringern.

Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen bieten CO₂-Minderungspotenzial in der gesamten industriellen Wertschöpfungskette, von der Produktion über die Nutzung bis zum Ende des Lebenszyklus.

Die Strategien der Kreislaufwirtschaft, die in dieser Studie behandelt werden, reichen vom verstärkten Recycling von Materialien über die effiziente Nutzung von Materialien (Leichtbau, Substitution, Minimierung von Verlusten) bis hin zur längeren Nutzung von Produkten (Verlängerung der Lebensdauer und Wiederverwendung von Komponenten). Für das modellierte Potenzial wurden ausschließlich Technologien berücksichtigt, die bereits einen Technologie-Reifegrad von mindestens 7 haben, das heißt bereits in der Praxis angewendet werden und überwiegend low-tech Lösungen sind.

Innerhalb der Wertschöpfungsketten von Gebäuden, Fahrzeugen und Verpackungen haben diese Maßnahmen das Potenzial, die jährlichen Emissionen bei der

Produktion und Verwendung von Stahl, Zement und Kunststoffen um 30 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente bis 2045 und um 18 Millionen Tonnen bereits bis zum Jahr 2030 zu reduzieren.

Bei Stahl erfordert die Verringerung der Emissionen Maßnahmen entlang der gesamten Bandbreite der Kreislaufwirtschaftsstrategien. Im Jahr 2045 ist eine Verringerung um zwei Prozent gegenüber dem Business-as-usual-(BAU)-Szenario durch die Verlängerung der Lebensdauer von Gebäuden und die Wiederverwendung von Stahlkomponenten, um 13 Prozent durch Materialeffizienz (zum Beispiel Verringerung von Fertigungsschrott) und um 23 Prozent durch verbessertes Recycling möglich. Das Potenzial für ein verstärktes Recycling hängt in hohem Maße von der Menge des verfügbaren Schrotts im Verhältnis zur Menge des benötigten Rohstahls ab. Derzeit liegt der Anteil des Schrotts an der Stahlproduktion in Deutschland bei 45 Prozent (Umweltbundesamt, 2020), womit Deutschland unter dem EU-Durchschnitt von 57 Prozent im Jahr 2020 liegt (Bureau of International Recycling, 2021).

Für Zement erfordert der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft eine enge Zusammenarbeit und Koordinierung der gesamten Wertschöpfungskette. Der Bausektor, der heute oftmals durch eine Überdimensionierung und einen *One-size-fits-all*-Einheitsansatz gekennzeichnet ist, kann in 2045 26 Prozent der Zementemissionen reduzieren, indem er die Materialeffizienz erhöht, zum Beispiel durch optimierte Gebäudeplanung und Bautechniken. Ein Potenzial von vier Prozent besteht in der Verlängerung der Lebensdauer von Gebäuden und der Wiederverwendung von Betonelementen. Großes Potenzial von 40 Prozent Emissionsreduktion in 2045 im Vergleich zum BAU-Szenario bieten die Optimierung von Zement- und Betonmischungen und der verstärkte Einsatz von Recyclingzement, Ersatzstoffen, Füllstoffen und Zusatzstoffen und -mitteln.

Bei Kunststoffen ist das Recycling mit 31 Prozent Minderungspotenzial in 2045 der wichtigste Hebel.

Um diese Emissionsminderungen zu bewirken, sind erhebliche Verbesserungen bei der Sammlung und Trennung von homogenen, monomateriellen Kunststoffen, eine Ausweitung des mechanischen Recyclings und die Entwicklung neuer chemischer Recyclingkapazitäten erforderlich. Auch durch die längere und effizientere Nutzung von Verpackungen lassen sich THG-Emissionen einsparen: Wiederverwendungsmodelle, wie zum Beispiel die Wiederbefüllung von Behältern in Geschäften, oder die Verringerung des Materialeinsatzes bei Verpackungen haben erhebliches Potenzial. Gemeinsam können diese Maßnahmen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2045 um 18 Prozent senken.

Eine Kreislaufwirtschaft fördert Innovation, Wettbewerbsfähigkeit und eine resiliente Wirtschaft in Deutschland und Europa.

Das Zielbild einer Kreislaufwirtschaft stellt einen Paradigmenwechsel gegenüber unserer traditionellen linearen Wirtschaft dar. Industrielle Tätigkeit und Lebensqualität könnten von der Nutzung (neuer) Ressourcen entkoppelt werden. Für die deutsche Wirtschaft hätte dies mehrere Vorteile. Erstens würde eine Kreislaufwirtschaft eine Verlagerung der Wirtschaftstätigkeit von Rohstoffen mit geringer Wertschöpfung hin zu innovativen Geschäftsmodellen und Materialien ermöglichen, die Effizienz belohnen, indem sie Technologien wie mathematische Topologieoptimierung oder künstliche Intelligenz (KI) nutzen. Zweitens sind in einer zunehmend klimaneutralen Welt das Recycling und die effiziente Nutzung von Materialien von entscheidender Bedeutung für die Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit. Recycling senkt häufig die Kosten pro Tonne klimaneutralen Materials, während die effiziente Nutzung den Wert pro Tonne Material erhöht. Das nötige technologische, technische und logistische Know-how könnte zum neuen Wettbewerbsvorteil werden in einer Welt, die zunehmend mit Ressourcenknappheit, steigenden Materialkosten und den

planetaren Grenzen konfrontiert wird. Und schließlich kann eine Kreislaufwirtschaft die Resilienz der deutschen Wirtschaft erhöhen, da Produktionsinputs zunehmend vor Ort aus Abfallprodukten gewonnen werden können, was die Abhängigkeit von Importen und volatilen Lieferketten verringert.

Europa und Deutschland sind für diesen Übergang gut positioniert. So könnte Deutschland mit seiner Technologieführerschaft im mechanischen Recycling (vor allem von PET) und als Hauptsitz einiger der größten Chemieunternehmen eine führende Rolle bei der Maximierung des mechanischen und der Ausweitung des chemischen Recyclings von Kunststoffen übernehmen. Auch die Dekarbonisierung der primären Stahlproduktion, die in Deutschland auf der Eisendirektreduktion beruht, kann Synergien aufweisen mit der Erhöhung der Kapazität und Flexibilität des Stahlrecyclings durch den Ausbau der Kapazitäten von Elektrolichtbogenöfen. Drittens hat Deutschland eine führende und innovative Zementindustrie, die fähig ist, die Effizienz in der gesamten Wertschöpfungskette zu verbessern. Hinzu kommt, dass Deutschland – und Europa – für ihre herausragenden Leistungen in den Bereichen Technik und funktionales Design bekannt sind, was effiziente und kreislauforientierte Design- und Technologielösungen zu einer zentralen Chance für Deutschland in einer klimaneutralen und ressourcenlimitierten Welt macht.

Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft erfordert gemeinsame Anstrengungen von Industrie und Politik.

Die Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft ist komplex: Sie bedarf einer Veränderung in der Produktion von Grundstoffen, in deren Einsatz in Nachfragesektoren und auch in Abfallwirtschaft und Recycling. Für eine erfolgreiche Transformation ist ein Monitoring erforderlich, das auf klaren Grundsätzen und Indikatoren beruht. Ohne eine entsprechende Datengrundlage über relevante Stoffströme und die Potenziale der Kreislaufwirtschaft fehlt es den

politischen Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern an Orientierung. Es werden falsche Anreize gesetzt oder wichtiges Potenzial ungenutzt gelassen. Im dritten Kapitel dieser Studie skizzieren wir deshalb, welche Anforderungen und Indikatoren ein solches Monitoring-System für die Stoffströme Stahl, Zement und Beton und Kunststoffe erfüllen und berücksichtigen muss. Das Indikatoren-System sollte dabei differenziert genug sein, um Potenziale und (Miss-)Erfolge einzelner Strategien innerhalb der jeweiligen Stoffströme abbilden zu können und auf dieser Grundlage Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern eine hinreichende Datengrundlage für Investitionsentscheidungen und politische Maßnahmen zu bieten.

Jedes Monitoring-System braucht dabei eine klare Zieldefinition. Für Deutschland sollte die NKWS ein klares Zielbild einer Kreislaufwirtschaft im Kontext einer ambitionierten Klimapolitik definieren und dieses mit konkreten Zielgrößen für die Jahre 2030 und 2045 untermauern. Übergeordnete Ziele für Ressourcenverbrauch, Ressourcenproduktivität und die Kreislaufführung von Sekundärrohstoffen sind unabdingbar, um die nötigen Leitplanken für die Transformation zu setzen.

Zuletzt legt diese Studie dar, welche politischen Maßnahmen erforderlich sind, um die benötigten Anreize in den Grundstoffindustrien zu setzen: Um die in dieser Studie identifizierten Potenziale der Kreislaufwirtschaft zu heben, bedarf es eines kohärenten Politik-Mixes. Zum einen sollten direkte regulatorische Hemmnisse identifiziert und beseitigt werden. Zum anderen sollten auf nationaler und europäischer Ebene die richtigen Leitplanken und Anreize entwickelt werden, um sowohl Produzenten als auch Verbraucherinnen und Verbraucher zu unterstützen und die Nachfrage nach kreislauffähigen Technologien und Sekundärmaterialien zu steigern.

Auf der Angebotsseite sollte die Bundesregierung Schlüsseltechnologien und Kooperationen entlang der

Wertschöpfungskette sowie Forschung und Entwicklung finanziell unterstützen. Die Bundesregierung sollte zudem mit einer Investitionsprämie für klimaneutrale Technologien auch gezielt Investitionen in innovative Technologien der Kreislaufwirtschaft anreizen. Im Rahmen der Novelle der EU-Ökodesign-Verordnung sollten ein verbessertes Design für Recycling und die Eindämmung ineffizienter Designs und Praktiken erzielt werden. Außerdem sollte die Bundesregierung die statistische Erfassung und die Berichtsinfrastruktur insbesondere für Kunststoffe verbessern, um zuverlässigere Daten über Kunststoffabfälle und Recyclingquoten zu erhalten und die Kunststoffströme in der Wirtschaft besser nachverfolgen zu können.

Um eine Nachfrage nach kreislauffähigen Technologien und Sekundärmaterialien in den relevanten Nachfragesektoren zu schaffen, ist die Messung und die Festlegung von Grenzwerten des CO₂-Gehalts von Produkten (*embodied carbon*) ein zentrales Instrument. Dieses technologieoffene Instrument kann Märkte für kreislauffähige und ressourceneffiziente Produkte und Materialien schaffen und Hersteller motivieren, Grundstoffe mit niedrigem CO₂-Gehalt zu verwenden. Grenzwerte sollten in geeigneten Regulierungen festgelegt werden, etwa in der Verpackungsregulierung oder der Gebäudeeffizienzregulierung auf europäischer oder nationaler Ebene. Die Bundesregierung sollte auch das Instrument der nachhaltigen öffentlichen Beschaffung nutzen, insbesondere um zum zirkulären Bauen anzureizen. Die öffentliche Hand sollte verstärkt die Verwendung zirkulärer Baustoffe fördern, indem sie den CO₂-Gehalt in Grundstoffen als Auswahlkriterium verwendet und Mindestquoten für recycelte oder wiederverwendete Baustoffe festlegt. Digitale Produktpässe (DPP) sind dabei eine wesentliche Voraussetzung einer effizienten Kreislaufwirtschaft. Sie erhöhen die Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Konsistenz für alle Akteure in der Wertschöpfungskette und liefern wichtige Informationen über die Herkunft und Zusammensetzung sowie die Reparatur- und Demontagemöglichkeiten eines Produkts.

Die Bundesregierung sollte sich auf europäischer Ebene für klare und in der Praxis handhabbare Leitlinien einsetzen.

Im Bereich der Kunststoffe sollte die Bundesregierung zudem die effiziente Rücknahme und Wiederverwendung von Einweg- und Mehrwegverpackungen stärken, indem Rücknahmesysteme mit verschiedenen Produktformaten kompatibel gemacht werden und eine übergreifende Infrastruktur geschaffen wird. Auch die geplante Integration der Abfallverbrennung in das EU-Emissionshandelssystem ist entscheidend, um CO₂-Emissionen im Kunststoffbereich zu reduzieren. Dies verhindert die Verlagerung von Abfällen in Länder mit niedrigeren Umweltstandards und fördert die Nachfrage nach hochwertigem Recycling. Gleichzeitig würde die Wettbewerbsgleichheit zwischen den EU-Mitgliedstaaten gewährleistet.

Für den Baubereich sollte die Bundesregierung den Abbau regulatorischer Hemmnisse vorantreiben. Dies umfasst die Überarbeitung von Normen und Bauvorschriften, um CO₂-arme und recycelte Materialien anzuerkennen, die Reform der Betonnormen, die Einführung von Experimentierklauseln und die Schaffung neuer Baunormen und Vorschriften zur Ressourcenschonung. Auch Standards zur Bewertung der Zirkularität auf verschiedenen Ebenen (Gebäude-, Bauteil-, Bauprodukt- und Materialebene) sollten geschaffen werden.

Im Bereich des Fahrzeugbaus sind die Effizienzpotenziale der hier betrachteten Kreislaufwirtschaftsstrategien weitgehend gehoben. Insbesondere für Kunststoffe könnten jedoch spezifische Quoten für den Einsatz von Sekundärmaterialien die Nachfrage nach Recyclingkunststoff stärken.

1 Kreislaufwirtschaft als Dekarbonisierungsstrategie

1.1 Einleitung und Definitionen

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 65 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren und bis 2045 klimaneutral zu sein und so dem Pfad für die Erreichung der Pariser Klimaziele und der 2030-Ziele des europäischen Green Deal zu folgen. Um mit den erhöhten Ambitionen des *Fit-for-55*-Pakets der Europäischen Union (EU), einem verschärften Emissionshandelssystem (EU-ETS) und anderen potenziell anstehenden Gesetzen wie der Verpflichtung zur Offenlegung der eingebetteten Emissionen (*embodied carbon*) gerecht zu werden, müssen bereits bis 2030 erhebliche Fortschritte erzielt werden. Energieintensive Industrien und ihre Wertschöpfungsketten müssen auf alle verfügbaren Lösungen zurückgreifen können, um so umfassend und schnell wie möglich ihre Treibhausgasemissionen zu reduzieren, andere Umweltauswirkungen zu minimieren sowie Risiken und Kosten der Transformation zu begrenzen. Diese Studie zeigt, dass die Kreislaufwirtschaft wesentliche Maßnahmen umfasst, die die Wertschöpfungsketten energieintensiver Industrien auf resiliente Weise dekarbonisieren – und so einen wichtigen Beitrag zur Transformation der Industrie und zur Erreichung der Klimaziele leisten.

Im März 2022 kündigte Bundesumweltministerin Steffi Lemke die Entwicklung einer nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie an. Neben anderen Zielen soll die Kreislaufwirtschaftsstrategie den Fahrplan Deutschlands zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2045 um wesentliche Instrumente ergänzen und dazu beitragen, den Fortschritt insbesondere in den Industriesektoren zu beschleunigen. Ein breiter Stakeholder-Dialog mit Beteiligung von Öffentlichkeit, Wissenschaft und Unternehmen wurde im Frühjahr 2023 angestoßen. Darüber hinaus

ist eine umfassende Begleitforschung zur Unterfütterung der Kreislaufwirtschaftsstrategie in Arbeit, die bis Ende 2024 abgeschlossen sein soll.

Ziel dieser Studie ist es, den Weg der Industrie in die Kreislaufwirtschaft zu skizzieren und Implikationen für die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) abzuleiten. Die Studie bietet dafür eine erste Modellierung der Potenziale der Kreislaufwirtschaft in den Bereichen Stahl, Beton und Zement sowie Kunststoffen in den Nachfragesektoren Automobil, Gebäude und Verpackungen.

Eine Dekarbonisierung der Primärproduktion durch Energieeffizienz, Elektrifizierung, Brennstoffwechsel und den Einsatz erneuerbarer Rohstoffe ist für die Zukunftsfähigkeit der Industrie in Deutschland unabdingbar und durch die Klimaziele bindend vorgeschrieben. Diese Studie zeigt jedoch, dass die Transformation der Industrie effizienter erreicht werden kann, wenn die Dekarbonisierung der Primärproduktion mit Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft kombiniert wird. Sie legt das Potenzial der technischen Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen für die energieintensivsten Grundstoffe und deren Wertschöpfungsketten dar, die zusammen mehr als 25 Prozent aller industriellen Emissionen in Deutschland ausmachen. Außerdem zeigt sie, dass die Kreislaufwirtschaft das technologische Potenzial hat, CO₂-Reduktionen bis 2045

1. schneller und mit deutlich geringeren Gesamtemissionen,
2. zu geringeren Kosten und
3. mit geringeren Energiebedarfen zu erreichen als eine Transformation der Industrie, die sich vor allem auf die Dekarbonisierung der Primärproduktion fokussiert.

Gleichzeitig kann die Kreislaufwirtschaft mit den richtigen politischen Rahmenbedingungen Innovation in allen Wertschöpfungsketten fördern und die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie in der globalen Transformation in Richtung Klimaneutralität vorantreiben.

Für den Begriff „Kreislaufwirtschaft“ gibt es viele Definitionen. Grundsätzlich kann Kreislaufwirtschaft als ein System verstanden werden, in dem die Bedürfnisse der Bürgerinnen und Bürger unter Entkopplung von Wohlfahrt und Ressourcenverbrauch erfüllt werden. Dies beinhaltet Strategien auf der Produktebene, muss allerdings auch systemweite Effizienzen über Produktgrenzen hinweg einschließen. Eine solche Vision von Kreislaufwirtschaft kann durch verschiedene Maßnahmen umgesetzt werden, die sich grob in technische Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen (Langlebigkeit von Produkten, Materialeffizienz und Recycling) und verhaltensbasierte Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen (zum Beispiel Carsharing, Verkehrsverlagerung oder Urbanisierung) unterteilen lassen. Die vorliegende Studie konzentriert sich auf technische Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen, die keine signifikante Verhaltensänderung der Verbraucherinnen und Verbraucher erfordern, sondern im Handlungsspielraum der industriellen Akteure und des Regulierers liegen. Um allerdings eine umfassende Kreislaufwirtschaft mitsamt ihren gesellschaftlichen Vorteilen zu erreichen, müssen technische Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen mit verhaltensbasierten Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen kombiniert werden. Beide sollten daher in der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie berücksichtigt werden.

Diese Studie zeigt, dass Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen Hand in Hand mit Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Primärproduktion gehen müssen, um eine schnellere Emissionsreduktion zu erreichen (die für eine ausreichende Stabilisierung des Klimas unerlässlich ist): mit einem geringeren Risiko, dass neue Technologien nicht wie geplant skaliert werden können, mit niedrigeren Kosten, einem geringeren

Bedarf an erneuerbaren Energien und mit einer höheren Resilienz gegenüber volatilen Lieferketten. Darüber hinaus reizt die Kreislaufwirtschaft Innovationen in Form von besser integrierten und leistungsorientierten Geschäftsmodellen an, die effiziente Produktionstechnologien mit effizientem Design kombinieren. Solche innovativen, diversifizierten Industrie- und Produktionsmodelle könnten Deutschland und Europa zu einer neuen Technologieführerschaft führen. Die Integration von klimaneutralen und zirkulären Strategien wird entscheidend sein, um die deutsche und die europäische Wettbewerbsfähigkeit zu stärken und eine zukunftsfähige Industrie in Europa – und in Deutschland – zu sichern.

Die beiden sich ergänzenden Strategien der Dekarbonisierung der Primärproduktion und der Innovation von auf Effizienz und auf Zirkularität ausgerichteten Technologien und Geschäftsmodellen sollten daher strategische Priorität für die deutsche Umwelt-, Klima- und Industriepolitik haben. Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie sollte genutzt werden, um eine Struktur für die Umsetzung einer kohärenten deutschen Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Die NKWS sollte dafür sorgen, dass die Notwendigkeit und Größenordnung der Kreislaufwirtschaft für die Klima- und Wirtschaftsstabilitätsziele klar anerkannt, die prioritären politischen Veränderungen und Finanzierungsbedarfe klar benannt (aufbauend auf ProgRes [Programm für Ressourceneffizienz], aber weiter priorisierend und klarstellend) und verbindliche Umsetzungsschritte beschlossen werden. Bei dieser Aufgabenteilung sollte auch die europäische und globale Führungsrolle Deutschlands berücksichtigt werden, da die meisten CO₂-intensiven Materialien grenzüberschreitend gehandelt werden und nur ein europaweiter Fortschritt in der Kreislaufwirtschaft die Senkung der deutschen (produktionsseitigen) Emissionen vollständig sicherstellen kann – und umgekehrt.

Was die erforderlichen politischen Änderungen betrifft, so müssen regulatorische Hemmnisse, die der

Kreislaufwirtschaftsstrategie entgegenstehen, identifiziert und systematisch angegangen werden. Neue Maßnahmen sind zu entwickeln, die Anreize für Kreislaufinnovationen bei Technologien und Dienstleistungen schaffen. Letzteres kann sowohl durch Anreize auf der Produktionsseite, zum Beispiel durch die Unterstützung bestimmter Recyclingtechnologien, als auch auf der Nachfrageseite, zum Beispiel durch die Festlegung von Grenzwerten für den eingebetteten CO₂-Gehalt (*embodied carbon*) von Produkten, geschehen.

Bei der Einführung der NKWS ist es entscheidend, umfassende und zugleich pragmatische Messgrößen zur Überwachung der Fortschritte festzulegen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, einen kohärenten Rahmen für Zielgrößen und Indikatoren auf nationaler Ebene und für Wertschöpfungsketten auf Sektoren- und Unternehmensebene zu schaffen. Hierbei ist es wichtig, zwischen Indikatoren, die Ergebnisse und Auswirkungen messen, und Indikatoren zur Fortschrittmessung zu unterscheiden. Letztere sollten sich auf die Bereiche der Kreislaufwirtschaft konzentrieren, in denen ein erhebliches Verbesserungspotenzial besteht.

Auch wenn eine deutsche Kreislaufwirtschaftsstrategie über die hier modellierten Sektoren und Maßnahmen hinausgehen sollte, so zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die technischen Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen für Stahl, Zement und Kunststoffe eine wichtige Rolle bei der Sicherung einer klimaneutralen und wettbewerbsfähigen deutschen Industrie spielen sollten. Sie gehören ins Zentrum der deutschen Kreislauf-, Klima- und allgemeinen wirtschaftlichen Ambitionen.

1.2 Die Rolle der Kreislaufwirtschaft für den Industriestandort Deutschland

In den letzten zehn Jahren hat Deutschland wichtige klimapolitische Fortschritte erzielt, vor allem im Energiesektor. Die Stromerzeugung aus Erneuerbaren

Energien hat sich innerhalb von zehn Jahren verdoppelt und war im Jahr 2022 fast gleichauf mit der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern (Agora Energiewende, 2023). Auch der deutsche Industriesektor hat Fortschritte zu verzeichnen. So sind beispielsweise die CO₂-Emissionen, die mit einer Tonne in Deutschland produzierten Stahls verbunden sind, seit 2010 um etwa 20 Prozent gesunken (World Steel Association, 2022), während die CO₂-Emissionen der Produktion einer Tonne Zement im gleichen Zeitraum um etwa 3,5 Prozent gesunken sind (Winter et al., 2022).

Der größte Teil dieses Fortschritts ist auf Effizienzgewinne bei der Primärproduktion zurückzuführen. Trotzdem verharren die THG-Emissionen des Industriesektors seit etwa zehn Jahren auf gleichbleibendem Niveau – insbesondere, weil etwa 80 Prozent des Energieverbrauchs weiterhin aus fossilen Quellen stammen. Für die Transformation hin zu einer klimaneutralen Industrie bedarf es einer Umstellung auf erneuerbare Brenn- und Rohstoffe, einer verstärkten Elektrifizierung und der Einführung und Skalierung von CCUS. Dafür ist der Aufbau entsprechender Infrastruktur, wie zum Beispiel einer Transport- und Speicherinfrastruktur für Kohlenstoff und Wasserstoff, erforderlich. Diese Maßnahmen sind zwar für die Produktion klimaneutraler Grundstoffe notwendig, aber für sich genommen nicht der kosten- und materialeffizienteste Weg zur Dekarbonisierung der Wirtschaft. Sie bergen zudem das Risiko neuer materieller Abhängigkeiten und technologische Risiken in der Skalierung. Daher muss eine effiziente Klimapolitik zusätzlich mit Maßnahmen für eine längere und effizientere Nutzung von (neuen) Materialien durch Kreislaufwirtschaftsstrategien flankiert werden.

Eine Kreislaufwirtschaft nutzt Rohstoffe und Energie intelligenter und effizienter als eine lineare Wirtschaft, indem sie die Nutzungsproduktivität, die Nutzungsdauer, die Materialeffizienz und das Recycling von Produkten erhöht. Eine längere Nutzungsdauer und eine höhere Materialeffizienz

verringern den Gesamtbedarf an Material und damit auch den Bedarf an konventioneller linearer Produktion. Eine höhere Recyclingrate sorgt dafür, dass Materialien länger im Kreislauf bleiben, und erhöht das Angebot an Sekundärmaterialien auf dem Markt, wodurch die Abhängigkeit von neuen Rohstoffen reduziert wird. Wie eingangs erwähnt, ist eine verhaltensbasierte „bessere Nutzung“ nicht Teil der vorliegenden Studie und ist von den Modellierungsergebnissen ausgeschlossen. Es ist jedoch zu empfehlen, dies in jede umfassende Kreislaufwirtschaftsstrategie einzubeziehen, die über die hier modellierten Maßnahmen und Stoffströme hinausgeht.

Eine Kreislaufwirtschaft schafft in den betrachteten Sektoren mehrere wichtige Vorteile sowohl für die Umwelt als auch für den Industriestandort Deutschland, die durch die alleinige Dekarbonisierung der Primärproduktion nicht erreicht werden können: Einsparungen der Treibhausgasemissionen können schneller erreicht und gleichzeitig die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen, der Energiebedarf und technologische Risiken verringert werden. Darüber

hinaus reduziert eine konsequente Kreislaufführung die Kosten der industriellen Transformation und reizt innovative neue Geschäftsmodelle an (siehe Abbildung 1).

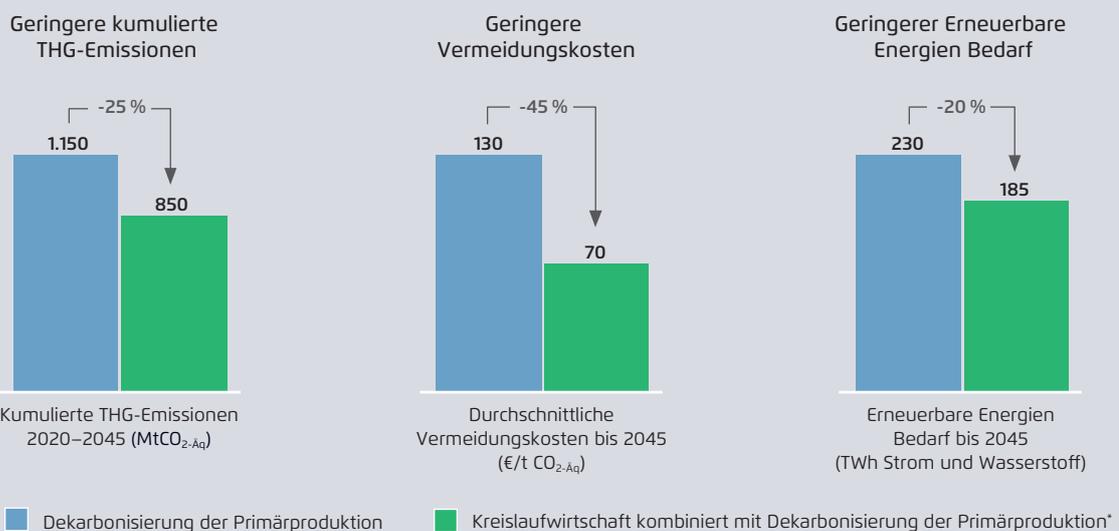
Die Kreislaufwirtschaft hat das technologische Potenzial, höhere kumulierte Einsparungen der industriellen THG-Emissionen zu erzielen.

Die industriellen Treibhausgasemissionen in Deutschland machen fast ein Viertel der gesamten Emissionen in Deutschland aus (Umweltbundesamt, 2022a). Von den Industrieemissionen entfallen rund 50 Prozent allein auf Stahl, Beton und Zement sowie auf Kunststoffe, wobei die Wertschöpfungsketten in den Nachfragesektoren Gebäude bzw. Hochbau, Automobil und Verpackungen einen großen Anteil haben (siehe Abbildung 2).

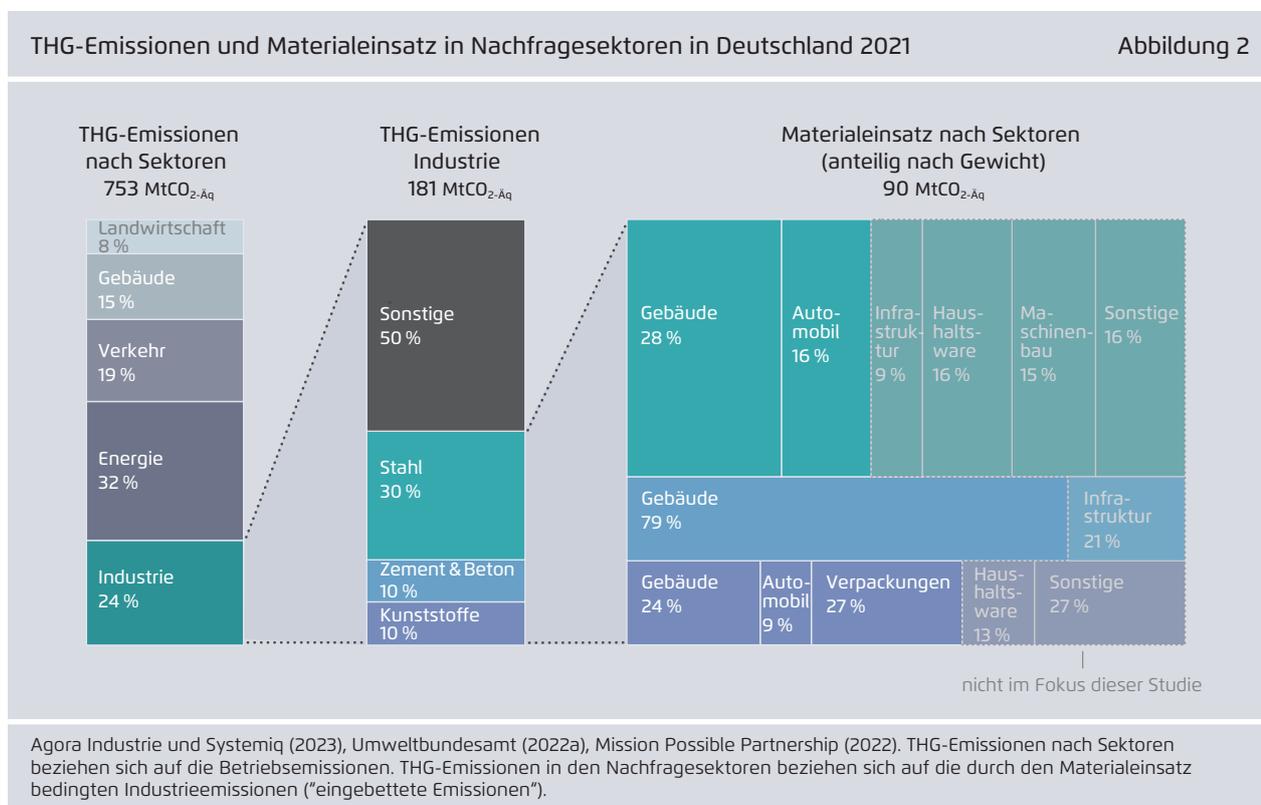
Eine Kreislaufwirtschaft reduziert die Treibhausgasemissionen auf zwei Wegen.

Minderungspotenziale durch die Kombination von Kreislaufwirtschaft und Dekarbonisierung der Primärproduktion in Deutschland

Abbildung 1



Agora Industrie und Systemiq (2023). * Modelliert für Stahl, Beton und Zement und Kunststoffe in den Nachfragesektoren Gebäude, Fahrzeuge und Verpackungen.



- Erstens werden durch die längere und effizientere Nutzung von Materialien die Materialmengen für neue Produkte direkt reduziert und damit die Emissionen proportional verringert.¹
- Zweitens führen höhere Recyclingraten bei entsprechenden Qualitätsanforderungen zu einem höheren Anteil an Sekundärmaterialien, wodurch energieintensive Primärproduktion eingespart werden kann. Die CO₂-Intensität von Sekundärmaterialien ist heute viel geringer als die von Primärstoffen: Bei chemisch recycelten Kunststoffen ist sie rund 44 Prozent² niedriger und bei Stahl etwa 80 bis 95 Prozent niedriger.³ Durch den verstärkten Einsatz von Sekundärmaterialien im

Produktionsprozess werden also die Treibhausgasemissionen verringert.

In den nächsten Jahrzehnten wird sich das Gefälle in der CO₂-Intensität zwischen Primärmaterialien und Sekundärmaterialien voraussichtlich verringern. So könnten beispielsweise neue, klimaneutrale Technologien in der Stahlproduktion dazu führen, dass die CO₂-Intensität der Produktionsstränge bis 2045 auf null sinkt. Ein weiteres Beispiel ist die biobasierte Herstellung von Polymeren, die in Verbindung mit elektrifizierten Produktionsprozessen die CO₂-Intensität von neuem Kunststoff erheblich reduzieren könnte. Dennoch ist eine Kreislaufwirtschaft für den Übergang in die Klimaneutralität unerlässlich, da der Ersatz fossiler Ressourcen durch Erneuerbare Energien bei der Herstellung von Neopolymeren sehr energie- und ressourcenintensiv ist. Durch Recycling wird der Ausbau Erneuerbarer Energien entlastet und darüber hinaus die Emissionen aus der Abfallbehandlung von Kunststoffen am Ende ihres Lebenszyklus verringert – die mehr als 50 Prozent

1 Aufgrund von internationalem Handel können Emissionsminderungen durch Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen teilweise außerhalb Deutschlands anfallen.

2 Vergleich zwischen neuem Kunststoff, der am Ende seiner Lebensdauer verbrannt wird, und chemisch recyceltem Kunststoff, der nicht verbrannt wird.

3 Abhängig vom Anteil Erneuerbaren Energien im Netzstrom.

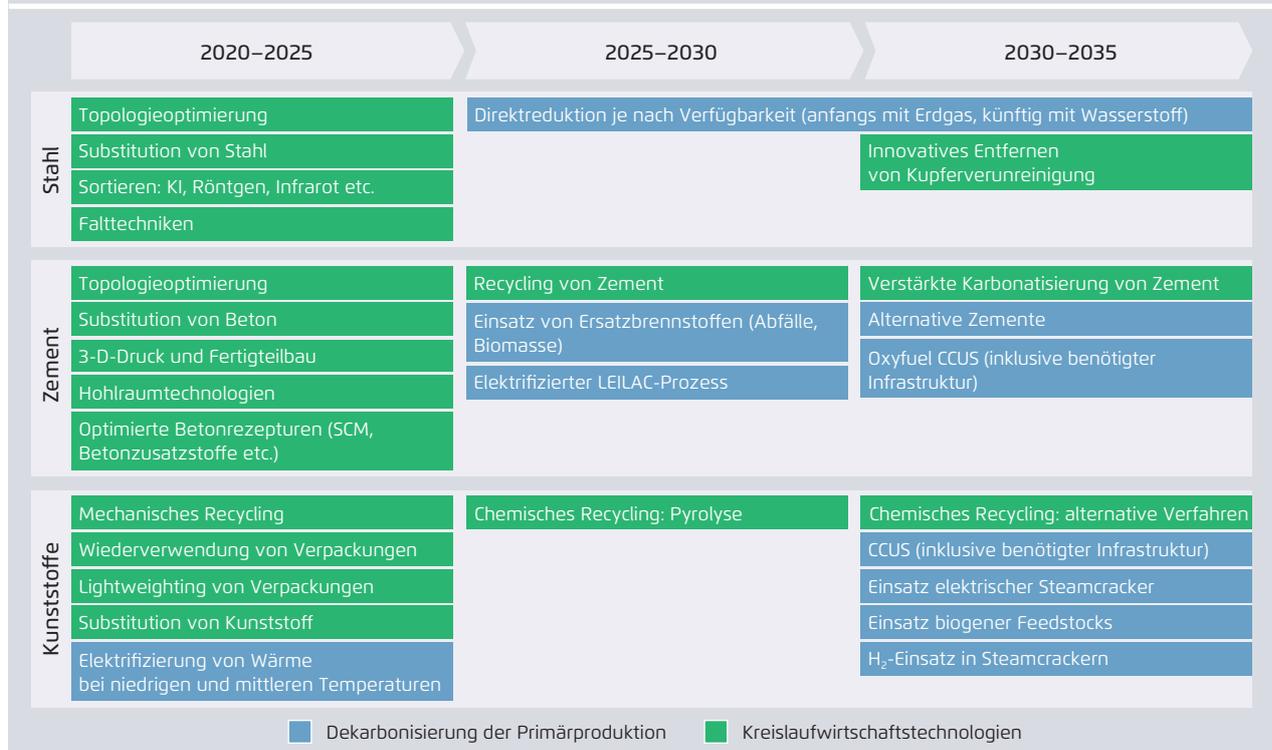
der Lebenszyklusemissionen eines Kunststoffprodukts ausmachen (Agora Industrie und Carbon Minds, 2023).

Insbesondere ist die Kreislaufwirtschaft für den Übergang zur Klimaneutralität unverzichtbar, da sie aus technologischer Sicht und mit den erforderlichen regulatorischen Änderungen – eine schnellere Minderung der THG-Emissionen und somit höhere kumulierte Einsparungen ermöglicht. Das ist dem technologischen Stand der Dekarbonisierung der industriellen Primärproduktion geschuldet: Einerseits haben viele industrielle Prozesse einen sehr hohen Wärmebedarf und die Technologien zur direkten Elektrifizierung dieser Wärme müssen noch skaliert werden (Agora Industrie und FutureCamp, 2022), andererseits spielt Kohlenstoff in vielen industriellen Prozessen eine zentrale Rolle: In der

Stahlproduktion wird Kohlenstoff beispielsweise zur Reduktion von Eisenerz verwendet, in der Zementproduktion ist Kohlendioxid ein unvermeidliches Nebenprodukt bei der Verarbeitung von Kalkstein zu Klinker, und in der Kunststoffproduktion ist Kohlenstoff der wichtigste Ausgangsstoff für das Produkt. Neue innovative Technologien für die kohlenstoffarme Primärproduktion haben Marktreife erlangt, sind aber derzeit zum Teil den Aufbau großer angelegter Infrastrukturen für Wasserstoff und CCS sowie auf die Nachrüstung oder den Ersatz bestehender Produktionsanlagen angewiesen. Die vollständige Dekarbonisierung der Produktionskapazitäten erfordert daher einen entsprechenden zeitlichen Vorlauf und ist mit Skalierungsunsicherheiten behaftet.

Erwartete Marktreife von Technologien zur Dekarbonisierung der Primärproduktion und der Kreislaufwirtschaft

Abbildung 3



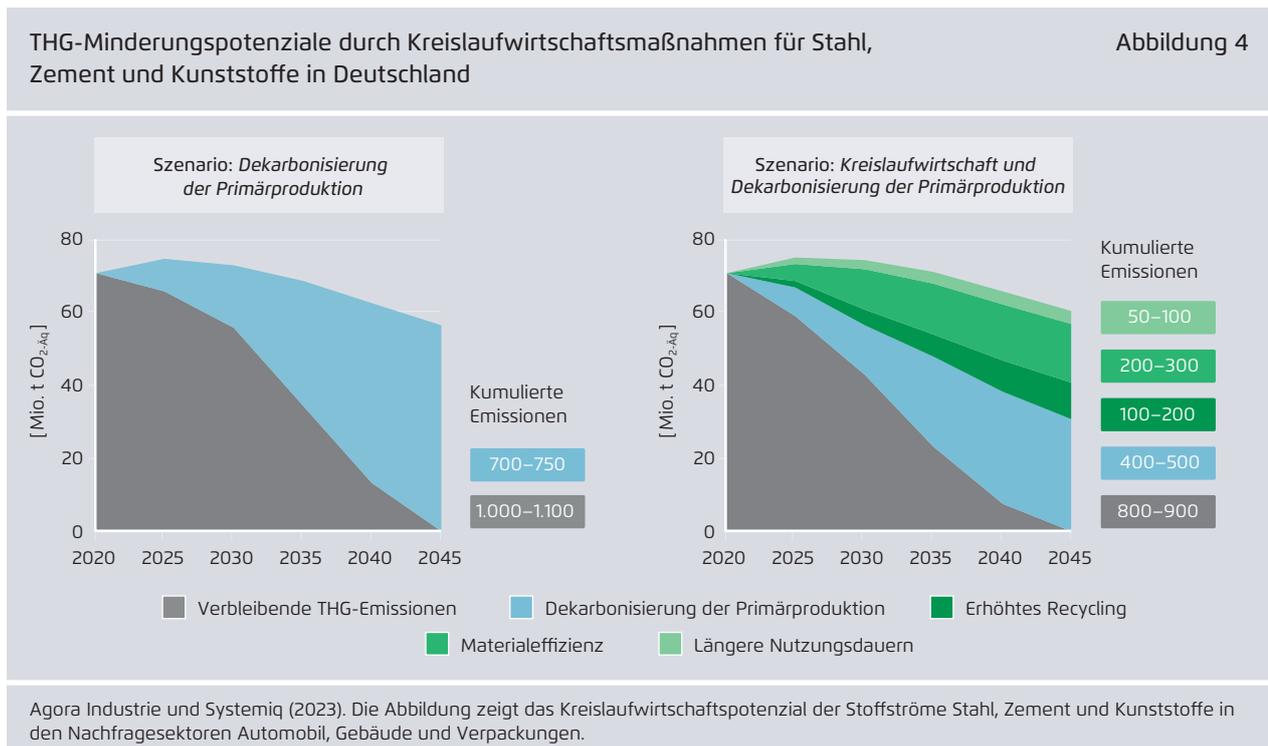
Agora Industrie und Systemiq (2023) basierend auf Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2021), Systemiq (2022), Mission Possible Partnership (2022a), Systemiq (2022). * Zur Marktreife der Pyrolyse gibt es auch abweichende Expertenmeinungen.

Da die Reduzierung der kumulierten Emissionen in den nächsten zwei Jahrzehnten entscheidend ist, müssen alle verfügbaren Maßnahmen und Hebel in Betracht gezogen werden: Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen sind dabei unverzichtbar, da die entsprechenden Technologien zumeist bereits marktreif sind und somit sofort skaliert werden könnten (siehe Abbildung 3). Eine Marktreife von Technologien wird angenommen, wenn die Technologie kommerziell verfügbar ist und die nötige Infrastruktur (zum Beispiel CO₂-Transport- und -Speicherinfrastruktur für CCUS) sowie Brennstoffe und Rohstoffe ausreichend vorhanden sind (zum Beispiel ausreichend grüner Wasserstoff).⁴

Eine rasche Implementierung von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen kann die kumulierten Treibhausgasemissionen zwischen heute und 2045 um rund 200 Megatonnen CO₂-Emissionen verringern, was etwa dem Dreifachen der derzeitigen jährlichen

Emissionen Deutschlands in diesen Sektoren entspricht (siehe Abbildung 4). Insbesondere bis 2030 können Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft aufgrund ihres technologischen Reifegrads und kurzfristiger Skalierbarkeit nennenswerte Treibhausgas-minderungen in den Industriesektoren erzielen. Durch ihre Implementierung können im Jahr 2030 etwa 25 Prozent niedrigere CO₂-Emissionen erzielt werden als in einem Szenario, in dem ausschließlich auf eine Dekarbonisierung der Primärproduktion gesetzt wird. Aufgrund der vergleichsweise leicht erreichbaren Emissionsreduktion sollten Kreislaufwirtschaftsstrategien in den Wertschöpfungsketten von Stahl, Zement und Kunststoffen eine entscheidende Ergänzung darstellen, damit eine effektive Transformation der Industrie möglich ist.

4 In dieser Studie wurden nur die Technologien modelliert, die vor 2030 Marktreife erreichen.



Die Kreislaufwirtschaft reduziert industrielle Treibhausgasemissionen und stärkt die Resilienz gegenüber kritischen Rohstoffen, Energiebedarfen und technologischen Risiken.

Die Covid-19-Pandemie, die russische Invasion in der Ukraine und die anschließende Energiekrise haben Europa das Risiko vor Augen geführt, zu stark von Importen kritischer Rohstoffe und Produkte abhängig zu sein.

Während die Transformation der Industrie zur Klimaneutralität zu einer geringeren Abhängigkeit von fossilen Öl- und Gasimporten beiträgt, besteht die Gefahr, dass im Zuge der Transformation neue Abhängigkeiten von kritischen Rohstoffen und Importen Erneuerbaren Energien entstehen. Auch aus der Perspektive planetarer Grenzen blieben bestehende Probleme ungelöst: Biodiversität, Landnutzung, Wassernutzung und Umwelt würden in einem primär linearen Wirtschaftsmodell selbst bei klimaneutraler Industrieproduktion unhaltbar belastet.

Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft können die Resilienz im Zuge der Energiewende und industriellen Transformation auf dreierlei Weise erhöhen. Erstens verringern sie die Abhängigkeit von neuen Rohstoffen. Im Gegensatz zu linearen Wertschöpfungsketten halten zirkuläre Wertschöpfungsketten Materialien nach dem Lebensende im Kreislauf und tragen so zu ihrer eigenen Versorgung mit Input- oder Sekundärmaterialien bei. Darüber hinaus reduziert die Materialeffizienz den Gesamtbedarf an Rohstoffen. Insbesondere im Fall von Kunststoffen und Stahl, wo Rohstoffe zu großen Teilen importiert werden, erhöht Zirkularität die Autonomie, die Widerstandsfähigkeit gegenüber Unterbrechungen der Lieferkette und Preisschwankungen bei Primärrohstoffen.

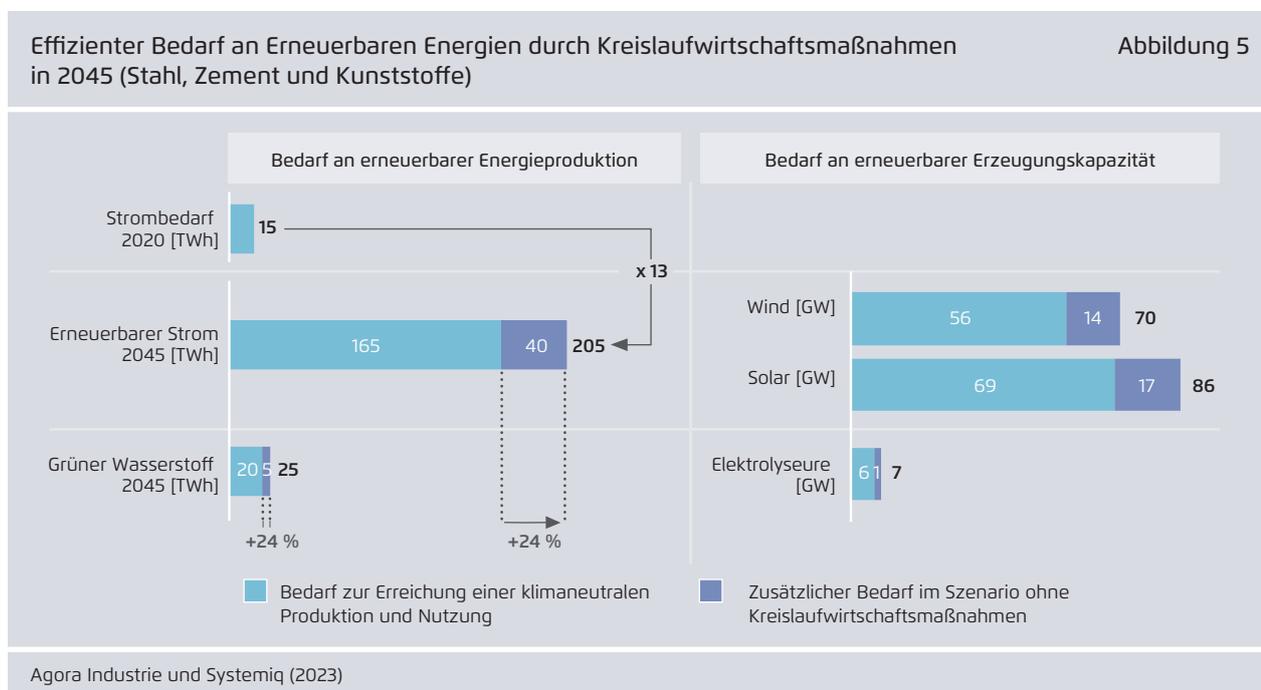
Zweitens ermöglicht eine Kreislaufwirtschaft eine effizientere Nutzung von Energie. Viele Technologien

zur Dekarbonisierung der industriellen Primärproduktion sind auf große Mengen an erneuerbarem Strom oder grünem Wasserstoff angewiesen. Beispiele sind die Elektrifizierung von *Steamcrackern*, der Einsatz von CCUS oder die energetische oder stoffliche Verwendung von grünem Wasserstoff. Infolgedessen würde sich bei einer industriellen Transformation ohne Kreislaufstrategien der Stromverbrauch der Stahl-, Zement- und Chemiesektoren mehr als verzehnfachen. Durch Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen kann der weitere Anstieg des Bedarfs an erneuerbarem Strom und grünem Wasserstoff um jeweils 24 Prozent begrenzt werden, was rund 31 Gigawatt an zusätzlicher erneuerbarer Erzeugungskapazität entspricht (siehe Abbildung 5).⁵ Mehrere Rohstoffe, die für die Produktion dieser Produktionskapazitäten benötigt werden, stehen auf der EU-Liste kritischer Rohstoffe und sind weltweit begrenzt verfügbar (zum Beispiel Niob, Aluminium, Tantal, Vanadium, Strontium), andere wurden von der Europäischen Kommission unter Beobachtung gesetzt (zum Beispiel Nickel, Mangan, Bor) (Europäische Kommission, 2023a). Ein effizienter Energieverbrauch hilft eine weitere Zunahme der Abhängigkeit von (kritischen) Rohstoffen zu vermeiden.

In der Übergangszeit der industriellen Transformation, in der einige Produktionsanlagen bereits auf klimaneutrale Technologien umgerüstet wurden, aber grüner Wasserstoff gegebenenfalls noch nicht in ausreichenden Mengen verfügbar wäre, kann die Nachfrage nach Erdgas vorübergehend steigen. Durch Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft kann dieser zusätzliche Bedarf um rund zwölf Terawattstunden jährlich reduziert werden, was etwa zwei Prozent des gesamten Erdgasverbrauchs im Jahr 2022 entspricht (Bundesnetzagentur, 2023).

Schließlich bietet eine Kreislaufwirtschaftsstrategie Absicherung gegenüber technologischen Skalierungsrisiken. Die Dekarbonisierung der Produktion

5 Auf Basis der Modellierungen im Systemiq-Circular-Economy-Modell.



von Stahl, Zement und Kunststoffen stützt sich auf eine begrenzte Anzahl von Schlüsseltechnologien, die noch nicht in großem Maßstab eingesetzt werden. Beispielsweise stützt sich die Dekarbonisierung der traditionellen Zementproduktion stark auf CCUS-Technologien, die derzeit nur in einzelnen Pilotprojekten angewendet werden. Daher besteht das Risiko, dass mit einer industriellen Transformation, die nur auf die Dekarbonisierung der Primärproduktion setzt, das Ziel der Klimaneutralität Deutschlands bis 2045 nicht zu erreichen ist. Die Kombination der Dekarbonisierung der Primärproduktion mit einer Kreislaufwirtschaftsstrategie erhöht die Chancen Deutschlands, seine Klimaziele zu erreichen.

Mit einer Kreislaufwirtschaft können die Treibhausgasemissionen der Industrie zu geringeren Kosten reduziert werden.

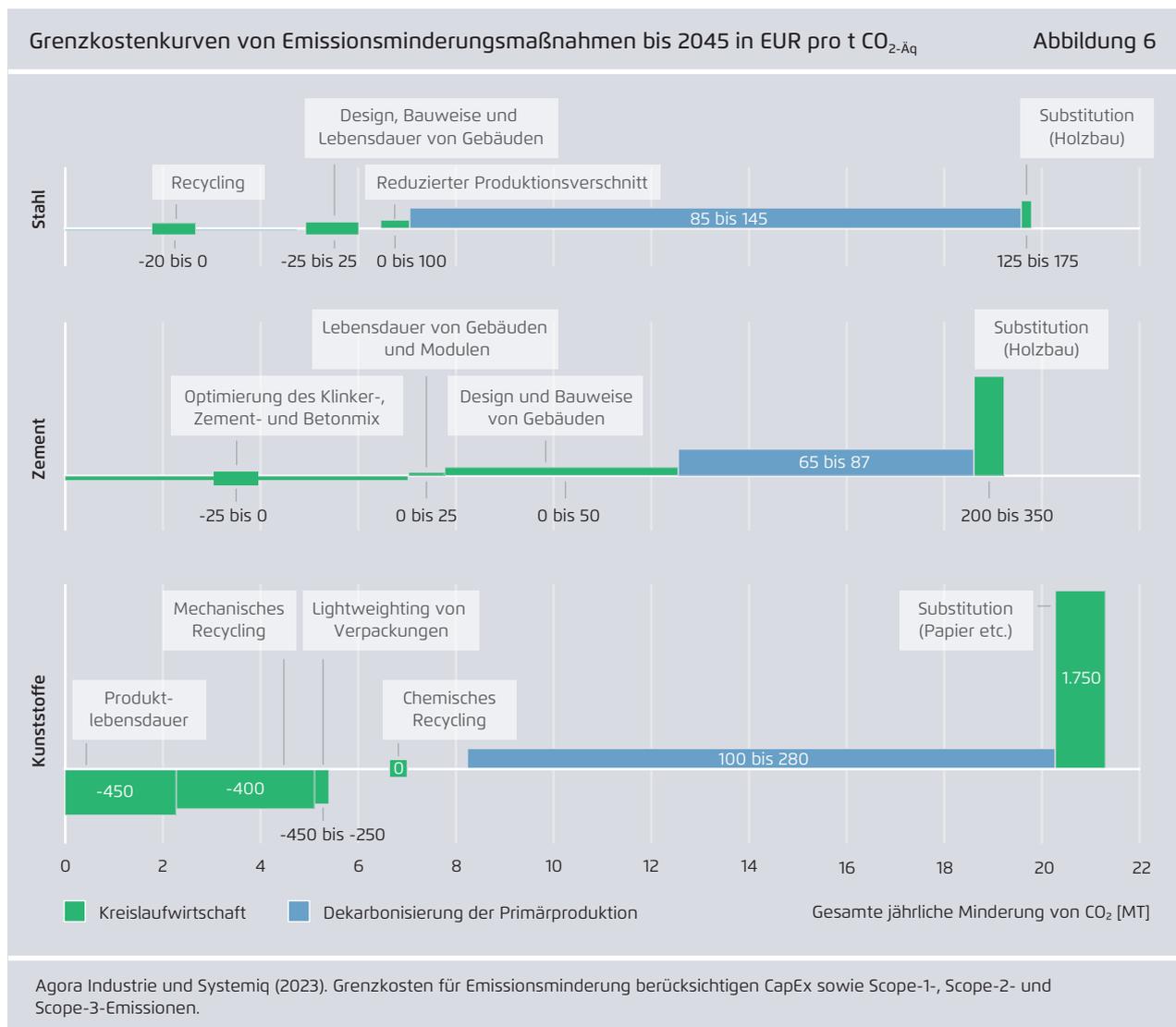
In den meisten Fällen ist die Dekarbonisierung der Primärproduktion mit zusätzlichen Kosten verbunden – etwa in der Höhe von 65 bis 87 Euro pro Tonne CO₂-Einsparung bei der Zementherstellung mit CCS-Technologie und dem Oxyfuel-Verfahren (Agora

Energiewende und Wuppertal Institut, 2021) oder in der Höhe von 180 bis 380 Euro pro Tonne eingespartes CO₂ bei der Kunststoffproduktion mit CCUS, Elektrifizierung und dem Einsatz von Wasserstoff (Planet Positive Chemicals, 2022). Im Gegensatz dazu sind die marginalen Kosten der Emissionsminderung der meisten Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen oft niedrig oder sogar negativ. Daher können die durchschnittlichen Minderungskosten um rund 35 Prozent für Stahl, 55 Prozent für Zement und 55 Prozent für Kunststoffe gesenkt werden (siehe Abbildung 6).

Mehrere Faktoren sind für die niedrigeren Minderungskosten von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen verantwortlich. Erstens sind die Investitionskosten tendenziell niedriger: Abgesehen vom Recycling erfordern die meisten Maßnahmen nur geringe Kapitalinvestitionen und hängen eher von Software- und Optimierungsinvestitionen ab. Zweitens ermöglicht die effiziente Nutzung von Ressourcen die Produktion von Endprodukten mit weniger Input, was in vielen Fällen zu niedrigeren Rohstoff- und Betriebskosten führt. Und drittens haben ausgediente End-of-Life-Produkte (EOL-Produkte) einen erheblichen Wert, den eine Kreislaufwirtschaft durch

Recycling monetarisieren kann. Dieser Wert spiegelt sich in den Minderungskosten durch kostengünstigere Inputmaterialien wider. Aktuell produziert Deutschland jährlich eine Gesamtabfallmenge von 330 Millionen Tonnen (NABU, 2021). Fast ein Drittel (101 Millionen Tonnen) dieser Abfallmenge resultiert aus den drei in dieser Studie untersuchten Grundstoffen. Während fast alle Stahlabfälle recycelt werden, werden die meisten Kunststoffe (mehr als 60 Prozent) und Beton (100 Prozent) „downgecycelt“, verfüllt oder verbrannt (Agora und Carbon Minds, 2023; BDE, 2020). Recycling reduziert Abfallmanagementkosten und erhält effektiv den Wert von Abfall-

materialien. Darüber hinaus mildert die Minderung des Gesamtabfallvolumens die negativen Folgen von Abfällen, einschließlich der Freisetzung von Schadstoffen aus der Verbrennung oder Deponierung, und verhindert damit verbundene Gesundheitsgefahren für Mensch und Natur. Diese negativen Externalitäten von Umweltverschmutzung und Gesundheitsgefahren sind jedoch nicht in den Kostenkurven in Abbildung 6 enthalten.



Eine Kreislaufwirtschaft trägt zu einer innovativen und resilienten Wirtschaft bei.

Eine Kreislaufwirtschaft hätte eine Reihe wichtiger Vorteile für die deutsche Wirtschaft.

Erstens führt eine Kreislaufwirtschaft zu einer relativen Verlagerung der Grundstoffproduktion hin zu stärker integrierten und höherwertigen Wirtschaftstätigkeiten (siehe zum Beispiel EY, 2022 oder McKinsey & Company, 2020). Das Ziel einer Kreislaufwirtschaft ist es, den Verbraucherinnen und Verbrauchern die gleiche – oder sogar bessere – Produktfunktionalität zu bieten, jedoch verbunden mit einem effizienteren Material- oder Produkteinsatz und somit einem geringeren Einsatz von Primärrohstoffen: Es kann eine höhere Leistung – und damit eine höhere Wertschöpfung – pro Tonne Material erzielt werden. Innovative Geschäftsfelder ergeben sich aus Hightechlösungen wie etwa mathematisch optimierten Gebäudedesigns, vielseitig wiederverwendbaren Baumodulen, 3-D-Druck, fortschrittlichen Sortiertechnologien, hochwertigen Recyclingmaterialien und vielem mehr. Diese materialeffizienten Lösungen werden zunehmend durch digitale Technologien wie innovatives *Building Information Modeling* (BIM), digitale Produktpässe, Modulstandardisierung und Vorfertigung sowie künstlicher Intelligenz (KI) ermöglicht.

Um diese neuen Geschäftsfelder zu erschließen, gibt es bereits erste Kollaborationen entlang der Wertschöpfungsketten. In der Wertschöpfungskette von Gebäuden sind beispielsweise *Materials-as-a-Service*, topologieoptimierte Bauteile sowie Rücknahme- und Recyclingmodelle Möglichkeiten, bei denen hohe Qualität und Langlebigkeit zum Verkaufsargument werden (ARUP, 2019). Außerdem beginnen große und kleine Akteure damit, Verfahren zur strategischen Dekonstruktion zur Wiederverwendung anzubieten.⁶

6 Erste Akteure sind hier zum Beispiel das deutsche Unternehmen Konkular oder die niederländischen Unternehmen Superuse Studios und die Delta Development Group.

Im Bereich Kunststoffe und insbesondere Verpackungen eröffnen sich Geschäftsmodelle durch die Monetarisierung von Materialeffizienz. Marktakteure positionieren sich strategisch mit recycelbaren Produkten (zum Beispiel durch ungefärbtes Verpackungsmaterial) und Kooperationen werden zwischen Vertriebsunternehmen und öffentlicher/städtischer Infrastruktur gebildet, um Pfandsysteme zur Wiederverwendung oder zum Recycling aufzubauen.

Zweitens erhöht die Kreislaufwirtschaft die Wettbewerbsfähigkeit in einer klimaneutralen Welt. Die deutsche und europäische Industrie agiert im Kontext eines zunehmend verschärften EU-ETS, zugleich gibt es eine wachsende Anzahl an Vorschriften der europäischen Mitgliedstaaten zu den eingebetteten Emissionen in Produkten (*embodied carbon*) und darüber hinaus das ehrgeizige Ziel, bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Auch mit Umsetzung des europäischen CO₂-Grenzausgleichs (CBAM) wird der internationale Wettbewerb in einer klimaneutralen Welt stark sein. Kreislaufwirtschaftsstrategien können helfen, die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Da die Herstellung einer Tonne klimaneutralen Materials durch Recycling beispielsweise günstiger ist als durch eine Dekarbonisierung der Primärproduktion, senkt die Erhöhung des Anteils an recyceltem Material in den verwendeten Baumaterialien die Durchschnittskosten. Da Deutschland und Europa für die Produktion von günstigem grünem Wasserstoff und Strom nicht gut aufgestellt sind, ist die Fähigkeit, hohe Recyclinganteile zu erreichen, ein Weg, Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Gleichzeitig erhöht die Fähigkeit, die gleichen Güter mit weniger Material herzustellen, den Wert pro Tonne Material. Die Technologie-, Ingenieurs-, Design- und Logistikexpertise, die im Sinne einer Kreislaufwirtschaft in Industriesektoren optimiert und ausgebaut wird, könnte ein neues Feld für Technologieführerschaft werden. Hier kann eine Parallele zu den Bemühungen zur Steigerung der Energieeffizienz von Geräten und Fahrzeugen in den 1990er-Jahren gezogen werden, als Energieeffizienz zu einer zentralen Quelle der

Wettbewerbsfähigkeit für Hersteller wurde und die vermehrte Nutzung von Geräten erfolgreich vom Energieverbrauch entkoppelt wurde.

Drittens schafft die Kreislaufwirtschaft ein Angebot an Sekundärrohstoffen innerhalb Deutschlands und Europas. Vor allem in der Stahl- und Kunststoffindustrie wird der Großteil der Rohstoffe für die Primärproduktion importiert. Ein erhöhtes lokales Angebot an Sekundärmaterial, das den Bedarf an (importierten) Primärrohstoffen in der Produktion ersetzen kann, kann die Anfälligkeit für Preisschwankungen oder Ausfälle in den Lieferketten verringern.

Schließlich ist der deutsche Industriestandort gut genug positioniert, um durch die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft eine industrie- und klimapolitische *Win-win*-Situation zu erzeugen. Der Technologiepfad zur Dekarbonisierung der Primärstahlproduktion birgt in Verbindung mit verstärktem Recycling ein hohes Maße an Synergieeffekten.⁷

Außerdem ist Deutschland in der Lage, Herausforderungen wie der Verunreinigung der Stahlschrotte technologisch zu lösen, etwa durch innovatives Auto-design deutscher Automobilhersteller, KI-gestützte und *Post-Shredder*-Sortierung von Stahlschrott oder die chemische Extraktion von Kupfer nach dem Schmelzen. Bei Kunststoffen verfügt die deutsche Industrie über die Expertise und die erforderliche Infrastruktur, um die europäische chemische Recyclingkapazität zu skalieren. Im Bereich Zement gibt es in Deutschland erhebliche Forschungs- und Entwicklungskapazitäten, die Innovationen im Recycling von Zement, in der Verringerung des Klinkerverbrauchs, der Optimierung des Zementgehalts im Beton und in der Entwicklung neuer Methoden für effizientes Bauen (wie zum Beispiel 3-D-Druck) vorantreiben.

7 Bei der Stahlerzeugung erfordern sowohl die DRI-Route als auch das Schrottreycling Elektrolichtbogenöfen zur Erzeugung von Rohstahl. DRI und Schrott können sich je nach Verfügbarkeit und Kostendynamik flexibel ergänzen.

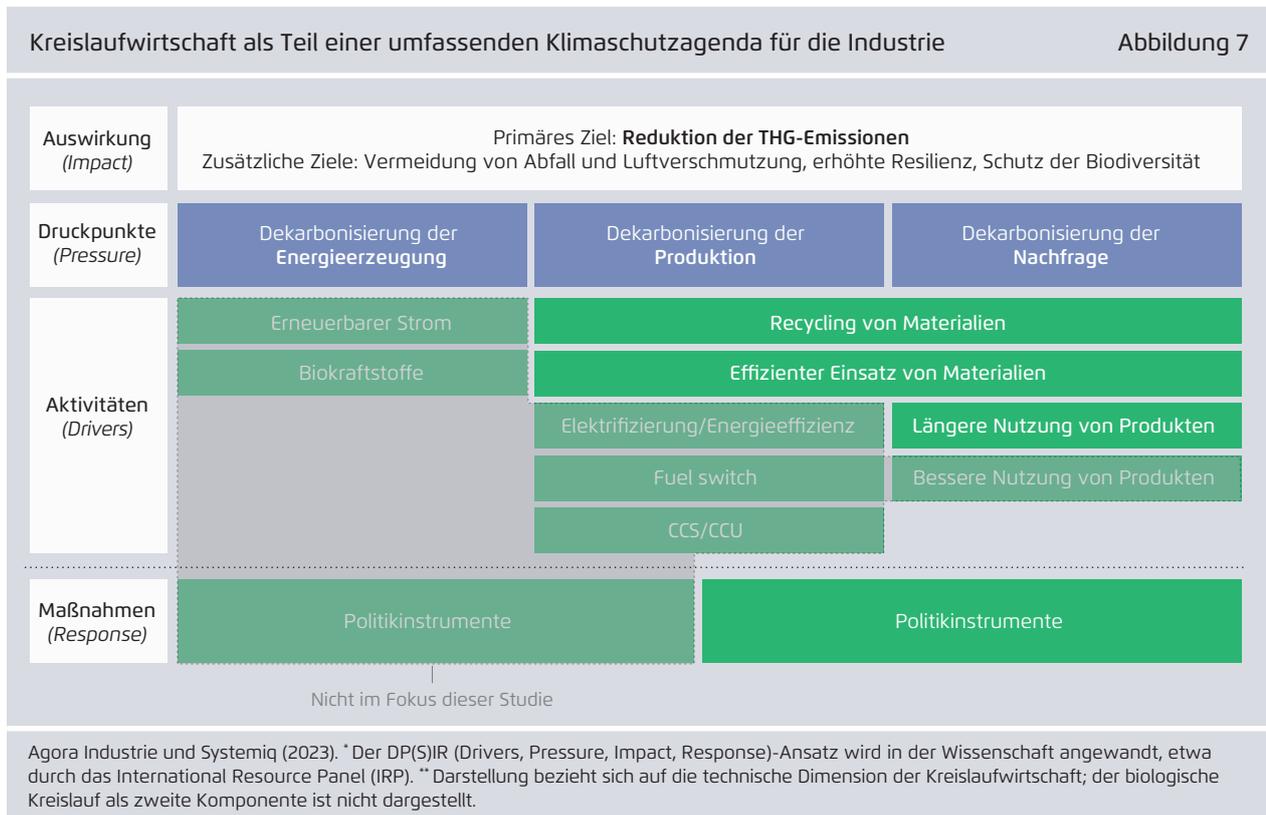
2 Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen und ihr Treibhausgasreduzierungs­potenzial in Deutschland

2.1 Herangehensweise

Um das CO₂-Reduktionspotenzial von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen zu quantifizieren, werden Emissionspfade basierend auf dem „aktuellen politischen Rahmen“ mit Emissionspfaden, die auf einer „Kreislaufwirtschaft“ fußen, verglichen. Beide Szenarien basieren auf dem an Deutschland angepassten *Shared Socioeconomic Pathway #2 (SSP2)*. SSPs sind in der Klimamodellierung und -forschung weitverbreitet und werden zum Beispiel beim *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* verwendet. SSP2 wird als „mittlerer“ SSP definiert, bei dem Deutschland einem Pfad folgt, bei dem die sozialen, wirtschaftlichen und technologischen Trends nicht deutlich von den historischen Mustern

abweichen. Abbildung 7 im technischen Anhang zeigt grafisch, was SSP2 für die in diesem Bericht verwendeten Schlüsselindikatoren bedeutet. Eine detaillierte Übersicht über die Annahmen findet sich ebenfalls im technischen Anhang (Abbildung A.2 und Tabelle A.2).

In dieser Studie werden ausschließlich technologische Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen modelliert, das heißt Recycling, eine effizientere Nutzung von Materialien und eine längere Nutzung von Produkten. Wie zuvor erläutert, werden verhaltensbasierte Kreislaufwirtschaftsstrategien, die die Nutzung von Produkten miteinbeziehen (zum Beispiel Carsharing), in dieser Studie nicht berücksichtigt. Abbildung 7 gibt



einen Überblick über den Fokus dieser Studie im Kontext einer umfassenden klimapolitischen Agenda.

Um das Potenzial dieser Strategien zu quantifizieren, werden alle Technologien, die bereits marktreif sind oder die Marktreife vor 2030 erreichen werden, modelliert – also, wenn die Technologie erprobt wurde, für den kommerziellen Einsatz bereit ist, die erforderliche Infrastruktur vorhanden ist (zum Beispiel CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur für CCUS) und die benötigten erneuerbaren Brennstoffe und Rohstoffe in ausreichendem Umfang verfügbar sind (wie grüner Wasserstoff). Technologien der Kreislaufwirtschaft, die voraussichtlich nach 2030 Marktreife erlangen werden, werden gesondert erörtert, aber nicht modelliert. Das bedeutet, dass künftige Innovationen die Grenzen dessen, was durch eine Kreislaufwirtschaft möglich ist, weiter verschieben können, über das hinaus, was in dieser Studie modelliert wird. Das Dekarbonisierungspotenzial der Primärproduktion wird auf Grundlage früherer Agora-Veröffentlichungen exogen bestimmt und ist nicht Teil der Modellierungen in dieser Studie.

Die Studie berücksichtigt die Wechselwirkungen der verschiedenen Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen und ihr Dekarbonisierungspotenzial. Ein Beispiel: Wenn die Lebensdauer von Gebäuden verlängert wird, sinkt das jährliche Angebot an Stahlschrott aus Gebäuden und damit auch das Recyclingpotenzial von Stahl. Ein weiteres Beispiel: Durch die Senkung des Klinker-Zement-Verhältnisses kann das Zement-Beton-Verhältnis möglicherweise nicht mehr bis auf das technische Minimum reduziert werden. Bei der Modellierung dieser Interaktionseffekte priorisieren wir die Effekte auf der Grundlage des Kaskadenprinzips der Kreislaufwirtschaft, das heißt, es werden die Maßnahmen, wie sie in Abbildung 8 dargestellt sind, von oben nach unten angewendet.

Die Studie berücksichtigt zudem die Praxistauglichkeit der modellierten Maßnahmen. Insbesondere im Gebäudesektor ist das technische Potenzial tendenziell (deutlich) höher als das modellierte Potenzial.

Weitere Informationen hierzu sind im technischen Anhang zu finden.

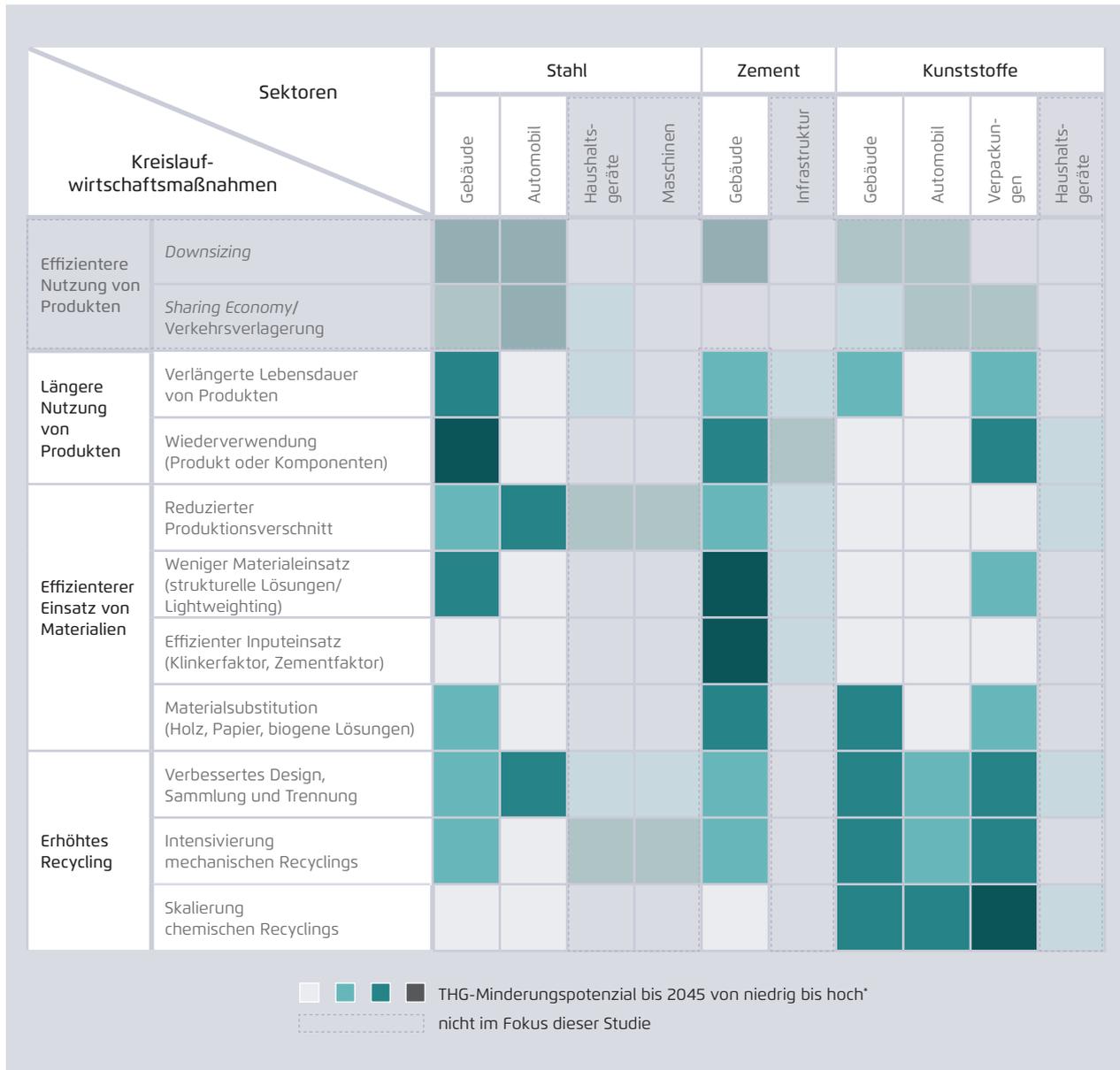
Diese Studie baut dabei auf einer wachsenden Anzahl industriegestützter und/oder von Expertinnen und Experten begutachteter Studien zu Kreislaufwirtschaftsstrategien in verschiedenen Sektoren auf globaler, europäischer oder nationaler Ebene auf. Auf globaler Ebene berücksichtigt die Mission Possible Partnership Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft in ihre Modelle ein, um gemeinsam mit den Akteuren aus der Industrie Dekarbonisierungspfade für Stahl (2022) sowie für Beton und Zement (Veröffentlichung voraussichtlich 2023) zu entwickeln. Für Europa untersucht Agora Industrie (2022) das Potenzial, die Kreislaufwirtschaft für energieintensive Grundstoffe zu mobilisieren, und Material Economics (2019) zeigt Wege zur Erreichung von Klimaneutralität in der europäischen Grundstoffindustrie auf, die Kreislaufwirtschaftsstrategien beinhalten. Die Studie *ReShaping Plastics* von Systemiq (2022) bietet ebenfalls einen Weg speziell für ein kreislauforientiertes und klimaneutrales Kunststoffsystem in Europa. Auf deutscher Ebene haben Pauliuk und Heeren (2020) in ihrer Studie *Ressourceneffizienz und Klimawandel* (2020) die Auswirkungen von Materialeffizienzmaßnahmen auf der Grundlage der globalen Modellierung des International Resource Panel (IRP) quantifiziert. Das Umweltbundesamt (UBA) schließlich untersucht in seiner umfassenden RESCUE-Studie aus dem Jahr 2020 den Zusammenhang zwischen Ressourcennutzung und Klimaschutz in sechs Szenarien, die unterschiedlich stark auf Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen basieren.

2.2 Ergebnisse

Um eine zirkuläre Wirtschaft zu verwirklichen, braucht es eine breite Palette von Technologien und Maßnahmen, meist abhängig von dem spezifischen Grundstoff oder Sektor: Es gibt keine Patentlösung für alle Materialien und Sektoren. Abbildung 8 zeigt, welche Maßnahmen im Hinblick auf die Reduktion

THG-Minderungspotenzial von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen

Abbildung 8



Agora Industrie und Systemiq (2023). Grafik gibt zusätzliches Potenzial zum Status quo an. * Von hell nach dunkel (in Mio. t CO₂-Äq-Einsparung in 2045): <0,01; 0,01-0,25; 0,25-0,8; >0,8.

von Treibhausgasen am wirkungsvollsten sind. Die Sektoren und Maßnahmen, die weiß hinterlegt sind, sind in dieser Studie berücksichtigt und ihre THG-Minderungspotenziale werden modelliert. Sektoren und Maßnahmen, die grau hinterlegt sind, werden in dieser Studie nicht betrachtet, und ihre in

Abbildung 8 dargestellten THG-Minderungspotenziale beruhen auf vorhandenen Studien.

In den folgenden Abschnitten wird das Treibhausgas-minderungspotenzial für die modellierten Maßnahmen und Technologien in den betrachteten Sektoren näher erläutert. Zunächst werden die Ergebnisse

eines verstärkten Recyclings und einer effizienteren Nutzung von Materialien für jeden Grundstoff – Stahl, Zement und Kunststoffe – vorgestellt.

Anschließend werden die modellierten Potenziale einer längeren Nutzung von Gebäuden, Fahrzeugen und Verpackungen betrachtet.

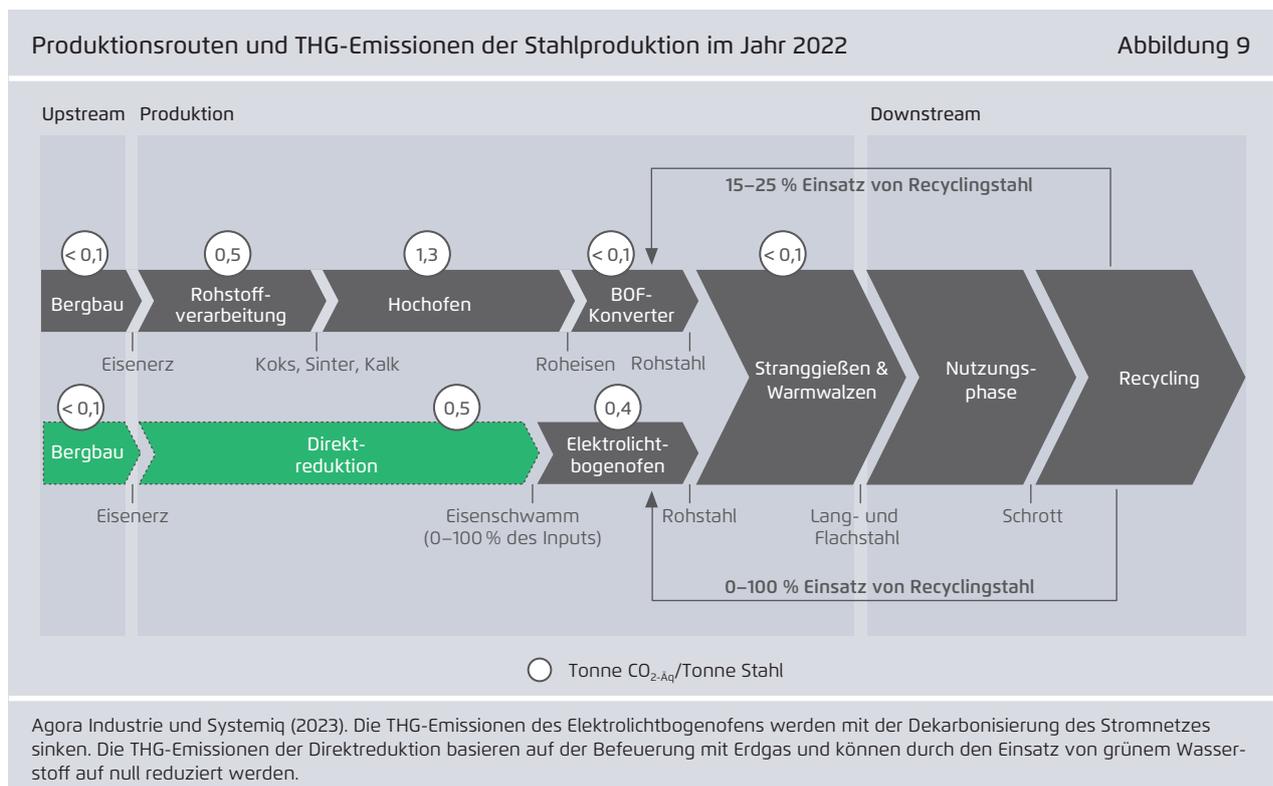
2.3 Stahl

Stahl ist ein wichtiger Bestandteil der deutschen und der globalen Wirtschaft, da er für den Bau von Gebäuden, für Infrastrukturen sowie die Herstellung von Transportmitteln und Haushaltsgeräten unverzichtbar ist. Stahl ist widerstandsfähig, langlebig, vielseitig einsetzbar und einer der wenigen Werkstoffe, die ohne Qualitätsverlust unendlich oft recycelt werden können. Das spiegelt sich in einer bereits sehr hohen Recyclingquote von 80 bis 95 Prozent weltweit und nahezu 100 Prozent in Deutschland wider (Mission Possible Partnership, 2022). In der Praxis treten jedoch Qualitätsprobleme im Zusammenhang mit

Verunreinigungen im Stahlschrott auf, hierauf wird später im Kapitel eingegangen.

Während die Stahlnachfrage in einigen Sektoren (insbesondere der Energieinfrastruktur) insgesamt steil ansteigen dürfte, wird erwartet, dass sie im Automobil- und Bausektor zunächst bis 2030 zunimmt und dann bis 2045 auf das derzeitige Nachfrageniveau zurückfällt (unter der Annahme, dass die derzeitigen Trends anhalten und Innovation in den verbrauchernahen Sektoren begrenzt bleibt). Wichtige Einflussfaktoren sind auf der einen Seite Verbrauchsindikatoren wie Wohnfläche in Quadratmetern pro Kopf und mit dem Auto zurückgelegte Kilometerzahl pro Kopf, die beide in der Regel im Laufe der Zeit zunehmen, sowie auf der anderen Seite das Bevölkerungswachstum, das in Deutschland voraussichtlich zurückgehen wird.

In Deutschland wird Stahl, wie in den meisten anderen europäischen Ländern auch, auf zwei Produktionsrouten hergestellt (siehe Abbildung 9).

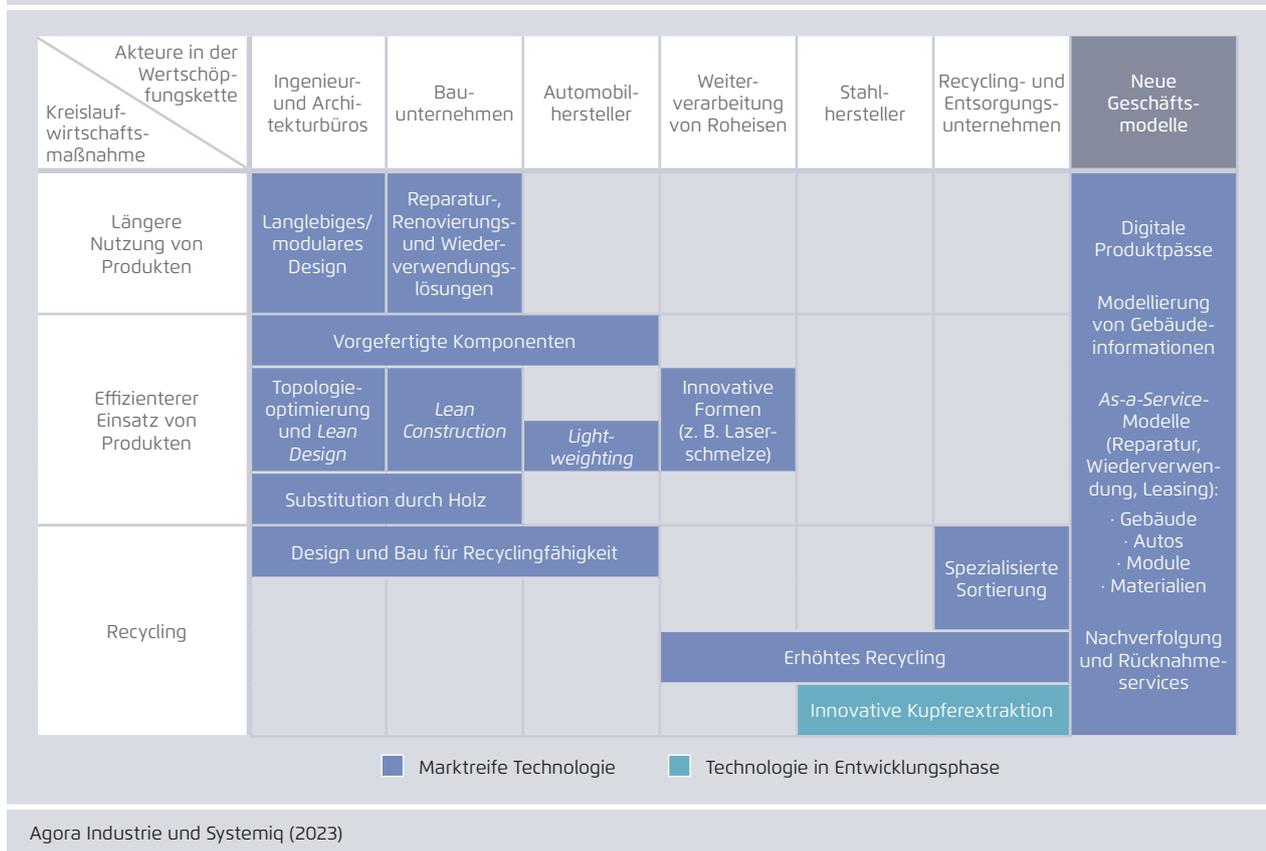


Die vorherrschende Technologie sind CO₂-intensive integrierte Stahlwerke, jeweils bestehend aus einem Hochofen-Sauerstoffblaskonverter (BF-BOF) und verschiedenen weiterverarbeitenden Prozessen, die im Jahr 2021 rund 75 Prozent der deutschen Stahlwerke ausgemacht haben und für etwa 70 Prozent der Stahlproduktion verantwortlich waren. Das Haupteinsatzmaterial für das integrierte Stahlwerk ist neues Eisenerz, wobei etwa 20 Prozent Schrott eingesetzt wird, der als Kühlmittel im Hochofen dient. Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen einer Tonne Stahl liegen bei diesem Verfahren bei rund 1,8 Tonnen, da die Öfen fossile Brennstoffe benötigen und nur geringe Mengen an Sekundärmaterial tolerieren. Die alternative Route ist der Elektrolichtbogenofen (EAF, auch als *Mini-Mill* bezeichnet), der etwa 25 Prozent des deutschen Anlagenparks und 2021

rund 30 Prozent der Produktion ausgemacht hat (Global Energy Monitor, 2023). Die EAF können perspektivisch nicht nur mit sauberem Strom betrieben werden, sondern sind in einer Kreislaufwirtschaft synergetisch für Primärinputs und Sekundärinputs nutzbar: Als Input kann hier entweder direkt reduziertes Eisen (DRI) oder Schrott verwendet werden, wobei das Verhältnis flexibel ist. Da die Direktreduktionskapazitäten in Deutschland noch gering sind, ist Schrott derzeit das wichtigste Einsatzmaterial. Die Emissionsintensität von Sekundärstahl liegt dabei etwa 80–95 Prozent unter Primärstahl aus dem Hochofen-Sauerstoffblaskonverter, abhängig vom Anteil der Erneuerbaren Energien im Strommix.

Kreislaufwirtschaft in der Stahlwertschöpfungskette: Handlungsfelder, Technologien und Geschäftsmodelle

Abbildung 10



Der Anteil der EAF-Kapazitäten in Deutschland ist im europäischen Vergleich relativ gering (rund 40 Prozent) und deutlich niedriger als beispielsweise in den USA (etwa 60 Prozent) (Global Energy Monitor, 2023).

2.3.1 Überblick: Kreislaufwirtschaft in Stahl-Wertschöpfungsketten

Möglichkeiten der Kreislaufwirtschaft für Stahl gibt es auf allen Stufen der Wertschöpfungskette. Wegen der bereits hohen Recyclingquote liegt das größte Potenzial jedoch in nachgelagerten Teilen der Wertschöpfungskette, also in der Optimierung von Produktdesign und Fertigung in den Nachfragesektoren. Zur Steigerung der Einsatzquoten von recyceltem Stahl wären größere Kapazitäten von EAF und fortschrittliche Sortieranlagen erforderlich, um für die notwendige Schrottqualität zu sorgen. Alle Maßnahmen bauen auf bestehenden Technologien und Geschäftsmodellen in der gesamten Stahlwertschöpfungskette und den Nachfragesektoren Bau- und Automobilindustrie auf, wobei ausgewählte

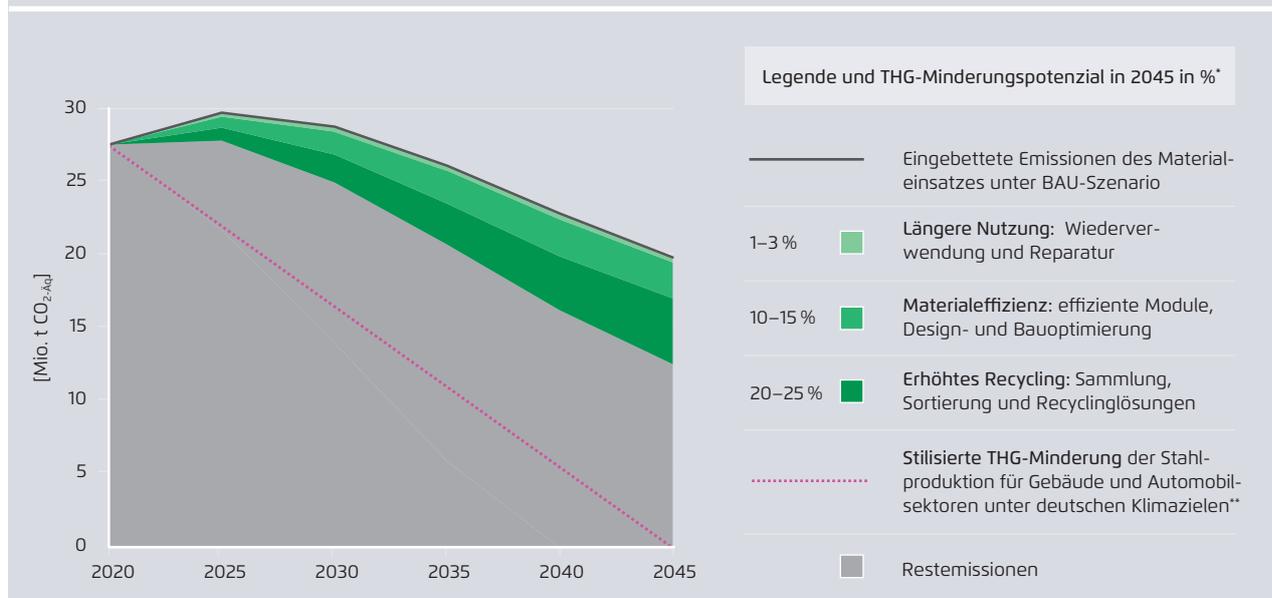
Technologien noch in der Entwicklungsphase sind (siehe Abbildung 10).

Im Gebäudesektor (28 Prozent der gesamten deutschen Stahlnachfrage) und im Automobilssektor (16 Prozent) ist das Gesamtpotenzial für die Verringerung der Treibhausgasemissionen durch Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft mit sieben Millionen Tonnen (mehr als 35 Prozent) in 2045 im Vergleich zum BAU-Szenario erheblich (siehe Abbildung 11).⁸ Bereits in 2030 ist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 13 Prozent möglich. Das kann erheblich zur Erreichung der Klimaziele beitragen, zumal die kurzfristige Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff zur Dekarbonisierung der Primärproduktion noch mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Hebel der Kreislaufwirtschaft müssen allerdings Hand in Hand mit Maßnahmen zur Dekarbonisierung

8 Die Modellierung beinhaltet nur Scope-1-Emissionen für die Dekarbonisierung der Primärproduktion.

THG-Minderungspotenzial durch den Stahleinsatz in den Gebäude- und Automobilssektoren in Deutschland

Abbildung 11



Agora Industrie und Systemiq (2023). * Konkreter Beitrag der THG-Minderung durch Kreislaufwirtschaftsheel zum Erreichen der deutschen Klimaziele ist nicht eindeutig bestimmbar, da in der Studie keine Annahmen zur Entwicklung von Exporten/Importen getroffen wurden. ** Die Modellierung des Dekarbonisierungspfad der Stahlindustrie ist nicht Teil dieser Studie. Gemäß der deutschen Klimaziele muss die Stahlindustrie spätestens 2045 klimaneutral sein. Die EU-ETS-Reform und die Einführung des CBAM erfordern jedoch eine schnellere Transformation.

der Primärproduktion gehen, da letztere immer noch den Großteil der erforderlichen Emissionsreduktion im Stahlsektor ausmacht.

Stahl wird in großem Umfang international – beziehungsweise für Deutschland meist europäisch – gehandelt. Deutschland importiert jährlich etwa 60 Prozent seines gesamten verbrauchten Stahls und exportiert umgekehrt etwa 60 Prozent seiner Stahlproduktion. Diese Handelsströme wirken sich darauf aus, wo die Treibhausgaseminderungen von in Deutschland umgesetzten Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen zum Tragen kommen. Wenn ein Bauunternehmen beispielsweise Häuser nach *Lean-Design*-Prinzipien baut und dadurch den Gesamtstahlbedarf pro Haus reduziert, aber seinen gesamten Stahl aus den Niederlanden importiert, wird sich die Reduktion der Stahlnachfrage hauptsächlich auf die Produktion in den Niederlanden und nicht in Deutschland auswirken. Wie sich die Verteilung der Produktionsmengen von Stahl in Europa und darüber hinaus entwickeln könnte, wird im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet.

In den folgenden Abschnitten werden die Auswirkungen der einzelnen Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen auf die Stahlwertschöpfungsketten erörtert.

2.3.2 Recycling

Stahl ist ein langlebiger Grundstoff – er wird verwendet, aber nie verbraucht. Er ist seit mehr als 150 Jahren ein Kreislaufmaterial, und heute ist er das am häufigsten recycelte Material der Welt, mit weltweiten Recyclingraten zwischen 80 und 95 Prozent. Grund ist der geringe Energiebedarf bei der Sammlung von Stahlschrott und der Herstellung von Sekundärstahl im Vergleich zur Herstellung von neuem Stahl: Die magnetischen Eigenschaften des Stahls können für die einfache Sammlung genutzt werden und im Anschluss kann der so gewonnene Stahlschrott theoretisch ohne wesentliche Qualitätseinbußen unendlich oft zu neuem Lang- und Flachstahl recycelt werden.

Deutschland ist mit einer Sammel- und Recyclingquote von nahezu 100 Prozent ein Vorreiter beim Stahlrecycling (Mission Possible Partnership, 2022). Es wird erwartet, dass die Verfügbarkeit von Schrott aus Gebäuden und Fahrzeugen in den nächsten zwei Jahrzehnten erheblich steigen wird, was auf die Zunahme von Gebäudeabrissen und Autoverschrottung sowie einen höheren durchschnittlichen Stahlgehalt zurückzuführen ist. Die effektive Nutzung dieses hochwertigen Sekundärmaterials in Deutschland erfordert eine Verbesserung der Qualität und des Einsatzes von Schrott und recyceltem Stahl sowie eine Erhöhung der (klimaneutralen) Verarbeitungskapazität für Stahlschrott. Zusammen können die oben genannten Maßnahmen den Recyclinganteil von Stahl in den untersuchten Nachfragesektoren Automobil und Gebäude von rund 25 Prozent auf rund 50 Prozent bis 2045 erhöhen, in Übereinstimmung mit dem Pfad der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2045* (Agora Energiewende, 2021). Diese Steigerung des Recyclings führt in 2045 zu einer zusätzlichen Verringerung der Treibhausgasemissionen um 23 Prozent im Vergleich zu einer Strategie, die sich allein auf die Dekarbonisierung der Primärproduktion bis 2045 konzentriert. Mit Hinblick auf die kumulierten THG-Emissionen bis 2045 kann die Steigerung des Recyclings 9 Prozent der Emissionen in den betrachteten Nachfragesektoren einsparen.

2.3.3 Verbesserung der Qualität und Nutzung von Stahlschrott

Die Verwendung von Schrott für die Stahlerzeugung hat zahlreiche Vorteile, darunter geringere Treibhausgasemissionen, ein niedrigerer Rohstoffeinsatz, geringerer Energieverbrauch und niedrigere Kosten. Ein großes Problem bei der Verwendung von Stahlschrott ist jedoch, dass er häufig verunreinigt ist. Einige Verunreinigungen können leicht gereinigt (zum Beispiel Sand) oder nach dem Schreddern entfernt werden (zum Beispiel Kunststoff). Manche Verunreinigungen können durch Oxidation aus dem flüssigen Stahl gelöst werden (zum Beispiel Aluminium). Kupfer kann jedoch nicht durch Oxidation aus dem Stahl entfernt werden. Kupferanteile mindern

jedoch die Qualität des Stahls und führen zu Warmbrüchigkeit, was insbesondere bei Stahlblechen zu Oberflächenrissen führen kann.

Die Verunreinigung von Schrott hängt in hohem Maße von der Herkunft des Schrotts ab, und die Verunreinigungstoleranz hängt wiederum in hohem Maße von der vorgesehenen Anwendung ab. Beispielsweise ist Automobilschrott durch die Verwendung von komplexen Verbundwerkstoffen, Legierungen und eines allgemein hohen Kupferanteils in der Regel stark verunreinigt, während Bauschrott meist nur geringe Verunreinigungen aufweist. Bei der Toleranz in Produkten gegenüber Verunreinigungen verhält es sich umgekehrt, da im Automobilsektor überwiegend dünne Stahlbleche verwendet werden

und die Toleranz gegenüber Verunreinigungen gering ist, während dicker Stahl für den Bausektor toleranter gegenüber Verunreinigungen ist (University of Cambridge, 2019).

Einer der zentralen Gründe für den Export erheblicher Mengen an Stahlschrott aus Deutschland ist das Missverhältnis zwischen Schrottqualität und Stahlnachfrage. Um den Anteil des recycelten Stahls auf dem deutschen Markt zu erhöhen, muss daher eine Lösung für das Problem der mangelnden Qualität des Stahlschrotts gefunden werden.

Infobox 1: Schrottqualität – ein Problem, das gelöst werden muss?

In der Regel wird der in Deutschland gesammelte Stahlschrott dem Recycling zugeführt, entweder in Deutschland oder im Ausland. Vor allem minderwertiger Schrott wird häufig zum Recycling ins Ausland exportiert. In Ländern mit hohem Bevölkerungswachstum und Bauboom besteht eine Nachfrage nach minderwertigem Schrott, da Baustahl sehr tolerant gegenüber Verunreinigung ist. Es stellt sich also die Frage, ob es für die Umwelt von Vorteil ist, die Qualität des deutschen Schrotts zu verbessern, wenn dieser Schrott ohnehin anderswo produktiv recycelt werden kann.

Mit Blick auf die globalen Treibhausgasemissionen gibt es zwei Argumente, die dafür sprechen, die Schrottqualität zu maximieren und Stahlschrott lokal zu verwerten. Zum einen hat die lokale Verwertung geringere Transportemissionen zur Folge. Zum anderen führt Schrott minderer Qualität zu Stahl minderer Qualität, der wiederum bestenfalls eine geringere Schrottqualität generieren wird. Solange die Schrottqualität nicht an der Quelle verbessert wird, werden die Verunreinigungsprobleme mit der Zeit weltweit zunehmen. Wenn Deutschland gangbare Wege zur Verbesserung der Schrottqualität aufzeigen kann, könnte dies weltweit nachgeahmt werden, um langfristig hohe Recyclingraten von Stahl zu sichern.

Aus deutscher Perspektive gibt es eine Reihe weiterer Gründe, die für eine verbesserte Trennung von Stahl und anderen verunreinigenden Stoffen sprechen. Ein höherer Anteil von Schrott als Input in der deutschen Stahlindustrie ergänzt den Bedarf an primärem Material wie grünem DRI und senkt somit die Kosten für klimaneutralen Stahl, was die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands erhöht.

Die Verbesserung der Schrottqualität erfordert Investitionen in neue Prozesse und Technologien. Dabei ist es wichtig, dass es eine Nachfrage nach hochwertigem Schrott zum richtigen Preis gibt. Verstärkte Bemühungen um ein besseres Produktdesign für Recycling und eine bessere Trennung und Aufbereitung von Stahlschrott hängen dabei zentral von der Preisgestaltung des EU-Emissionshandelssystems für neuen Stahl ab, können aber auch durch private Nachfrage oder öffentliche grüne Leitmärkte angereizt werden. Eine Definition von „Grünstahl“, inklusive eines Label-Systems, wäre hierfür essenziell.

Verbesserung des Produktdesigns für besseres Recycling

Um eine höhere Schrottqualität zu erzielen, ist ein verbessertes Produktdesign zentral. Das Produktdesign muss so verbessert werden, dass Kupfer durch alternative Materialien ersetzt werden kann, die manuelle Trennung von Verunreinigungen am Ende des Lebenszyklus erleichtert wird, die Verwendung von unlegiertem Material maximiert wird und nur noch wenige Materialgruppen mit leicht zu lösenden Verbindungen vorhanden sind. Für die Automobilindustrie ist das aus mehreren Gründen von besonderer Bedeutung, da der Schrott aus dem Automobilsektor einen hohen Verschmutzungsgrad aufweist, obwohl ein erhebliches Verbesserungspotenzial besteht. Angesichts des wachsenden Anteils von Elektrofahrzeugen mit höherem Kupferanteil wird das Problem der Kupferverunreinigung voraussichtlich weiter zunehmen, wenn es nicht richtig angegangen wird. Da die durchschnittliche Lebensdauer eines Autos bei rund 15 Jahren liegt, werden die Auswirkungen eines verbesserten Designs bereits in den nächsten zwei Jahrzehnten spürbar sein. Deutschland hat dabei aufgrund seines hoch entwickelten und innovativen Automobilsektors die Chance, für die gesamte Branche weltweit Maßstäbe zu setzen.

Entfernung von Verunreinigungen im Stahlschrott mit neuen Technologien

Mehrere Technologien zur Entfernung von Verunreinigungen aus Stahlschrott sind marktreif und einsatzbereit. Dabei wird eine breite Palette von Techniken angewendet: die Sortierung mit künstlicher Intelligenz (KI) basierend auf der Metallfarbe, die Nahinfrarotsortierung basierend auf der molekularen Zusammensetzung der Materialien, die Röntgensortierung basierend auf unterschiedlicher Strahlung, die von den verschiedenen Materialien reflektiert wird, und die Schwimm-/Sink-Technologie auf Basis von Unterschieden in der Dichte der verschiedenen Materialien. Weitere fortschrittliche Technologien zur Kupferentfernung könnten nach 2030 kommerziell verfügbar werden (siehe Infobox 2).

Erhöhung der Verunreinigungstoleranz von Stahlanwendungen bis höhere Schrottqualitäten verstärkt verfügbar sind

Da es einige Zeit braucht, um durch ein verändertes Design bessere Schrottqualitäten in der Breite für Recycling und neue Technologien verfügbar zu machen, können in der Zwischenzeit Strategien zur erhöhten Toleranz von Verunreinigungen angewendet werden. So kann beispielsweise die Kreislaufwirtschaft im Automobilsektor dazu beitragen, durch *Closed-loop*-Recycling die Herausforderungen beim Recycling von Legierungen zu lösen. Durch die Sortierung des Schrotts nach dem Legierungsgehalt und die Wiederverwertung dieser Legierungen kann hochwertiger legierter Stahl ohne die Materialverluste, die bei der Oxidation zur Reinigung von Stahlschrott entstehen, effektiv recycelt werden. Ein anderer Weg wäre, weniger an bestehenden Produktionsweisen festzuhalten und die hohen Anforderungen an die Verwendung von recyceltem Stahl, insbesondere im Automobilsektor, zu reduzieren. Beispielsweise liegt der derzeitige Rezyklatgehalt von Stahl in Autos bei etwa 20 bis 30 Prozent, während ein *Secondary-First*-Ansatz, bei dem die individuellen Anforderungen an jedes Bauteil kritisch geprüft werden, den Rezyklatgehalt auf rund 50 Prozent steigern kann (BMW, 2023). Schließlich können neue Stahlverarbeitungstechniken (zum Beispiel kürzere Oxidationszeiten und Oberflächenabschreckung) oder Änderungen der Zusammensetzung der verwendeten Legierungen (zum Beispiel durch Zugabe von Nickel oder Silizium) die Kupfertoleranz von Stahl erhöhen und so die Warmbrüchigkeit reduzieren (Daehn et al, 2017). Diese Optionen werden bereits bei Sekundärstahl angewendet, der in Elektro Stahlwerken zur Belieferung der Automobilindustrie hergestellt wird, wobei ein Recyclinganteil von mehr als 85 Prozent bei hochfestem Stahl erreicht wird (Outokumpu, 2023).

Erhöhung der Recyclingkapazität für klimaneutralen Stahl durch EAF

Die Menge an Stahl, die in Deutschland recycelt wird, könnte zukünftig stark zunehmen. Denn aufgrund

Infobox 2: Innovative Technologien: Innovative Kupferextraktion nach 2030

Für die Kreislaufwirtschaft im Stahlbereich sind fortschrittliche Technologien zur Kupferextraktion aus Stahlschrott zentral. Wie bereits erörtert, liegt ein zentrales Hemmnis für das Recycling von Stahlschrott in seiner Verunreinigung. Kupfer ist eine besonders komplexe Stahlverunreinigung, die die Qualität des Stahls mindert. Sobald Kupfer im flüssigen Stahl gelöst ist, kann es nicht mehr durch Oxidation entfernt werden. Auf Basis der Modellierung der verfügbaren Schrottmengen und ihrer durchschnittlichen Verunreinigung in den untersuchten Sektoren wird das heutige technische Potenzial für den Einsatz recycelten Stahls auf rund 70 Prozent geschätzt. Dieser Anteil kann durch innovative Kupferextraktion noch erhöht werden.

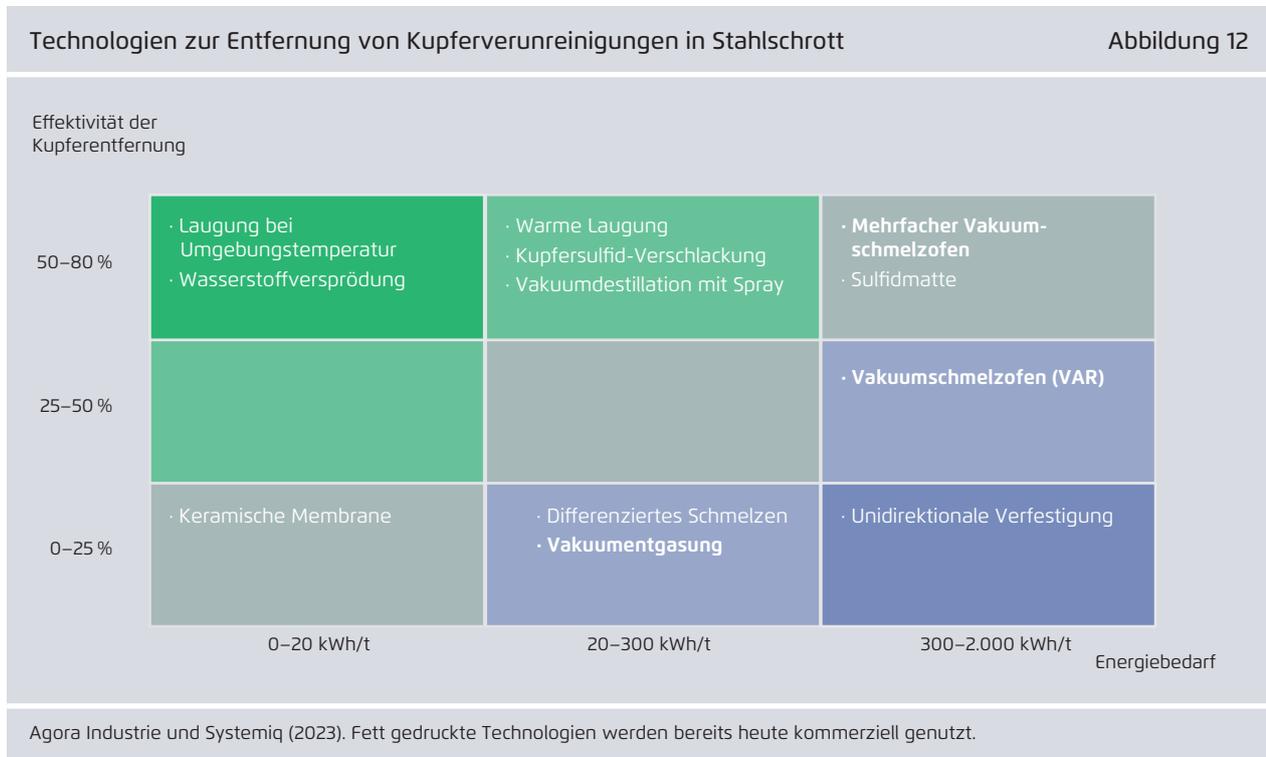
Für das Entfernen von Kupfer aus flüssigem Stahl gibt es zahlreiche Verfahren, von denen sich die meisten in einem frühen Entwicklungsstadium befinden (TRL < 4). Einige der infrage kommenden Verfahren sind in Bezug auf ihren Energiebedarf und ihre Effektivität vielversprechend, wie zum Beispiel die Laugung bei Umgebungstemperatur und die Wasserstoffversprödung (Abbildung 12). Andere Technologien werden bereits in Sektoren mit hohem Stahlbedarf, wie der Luft- und Raumfahrt, kommerziell angewendet (fettgedruckt in Abbildung 12: Vakuumentgasung, Vakuumschmelzofen, mehrfacher Vakuumschmelzofen). Diese Technologien sind jedoch aufgrund des hohen Energiebedarfs für eine großtechnische Anwendung derzeit nicht rentabel oder können den Kupfergehalt nur unzureichend reduzieren. Die Verbesserung der Leistung dieser Technologien ist ein weiterer möglicher Weg zu einer erfolgreichen Verringerung der Kupferkontamination (University of Cambridge, 2019).

des zunehmenden Stahleinsatzes und der Masse der verschrotteten Produkte wird erwartet, dass das Schrottangebot in den nächsten Jahrzehnten steigen wird. Außerdem exportiert Deutschland rund 25 Prozent seines Schrotts, der in Zukunft (sofern sinnvoll) vor Ort recycelt werden könnte. Allerdings sind die wichtigsten Schrottverarbeitungsanlagen (Elektrolichtbogenöfen) in Deutschland in der Regel voll ausgelastet, was die Möglichkeit des Stahlrecyclings einschränkt.

Wenn Schrott heute in Deutschland recycelt wird, kann dies auf zwei Wegen geschehen: Entweder wird der Schrott als Kühlmittel und als zusätzliche Eisenquelle in der Hochofenroute zur Stahlerzeugung verwendet. Die Mindestmenge an Schrott, die im Hochofen zugesetzt werden muss, beträgt rund fünf Prozent, die Höchstmenge circa 25 Prozent. In Deutschland arbeiten die meisten BF-BOF-Anlagen mit etwa 20 Prozent Schrott (Mission Possible Partnership, 2022) Integrierte BF-BOF-Anlagen

werden nicht in der Lage sein, höhere Rezyklatanteile als 20 bis 25 Prozent zu verarbeiten. Außerdem wird die BF-BOF-Route aufgrund der Reform des EU-ETS und der Einführung des CO₂-Grenzausgleichs (CBAM) zunehmend von steigenden CO₂-Preisen betroffen und mittelfristig nicht mehr wirtschaftlich rentabel sein.⁹ Die Alternative zu Schrott ist die direkte Verarbeitung zu Stahl in einem Elektrolichtbogenofen (EAF). Der Hauptvorteil des EAF ist die Flexibilität in Bezug auf die Menge des verwendeten Schrotts. Heute arbeiten die meisten Elektrostahlwerke mit sehr hohen Schrottanteilen von bis zu 100 Prozent (Global Energy Monitor, 2023), doch könnte der Schrott in Zukunft flexibel durch direkt reduziertes Eisen (DRI) ersetzt werden, sodass der Anteil des Schrotts flexibel zwischen null und 100 Prozent liegen kann. Die Erweiterung des

⁹ BF-BOFs können auf DRI-SMELT-BOFs umgerüstet werden, dabei bleibt jedoch die Schrott-Obergrenze von maximal 25 Prozent unverändert.



deutschen Anlagenparks um EAF-Kapazitäten ist daher entscheidend, um mehr Stahlrecycling zu ermöglichen. Während des Stahlherstellungsprozesses kann Stahlschrott mit DRI vermengt werden, um die Verunreinigungen „auszugleichen“¹⁰ und die Stahlqualität zu optimieren.

2.3.4 Materialeffizienz

In diesem Abschnitt werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Materialeffizienz von Stahl erörtert. Zusammengefasst können durch Materialeffizienz im Stahleinsatz in den betrachteten Nachfragesektoren 13 Prozent der THG-Emissionen des BAU-Szenarios in 2045 eingespart werden. Zwischen 2020 und 2045 bedeutet das eine Einsparung der kumulierten THG-Emissionen von 6 Prozent.

Zunächst werden die Möglichkeiten in der Automobilindustrie und anschließend im Gebäudesektor dargestellt.

Automobilindustrie

Die Automobilindustrie ist im Produktdesign bereits sehr fortschrittlich und optimiert das Design und die Leistung eines Fahrzeugs in zahlreichen verschiedenen Dimensionen. In vielen Fällen, insbesondere bei der Optimierung der Kraftstoffeffizienz, stehen diese Optimierungen in Synergie mit der Materialeffizienz. Viele Optionen zur Verbesserung der Effizienz im Stahleinsatz wurden bereits genutzt. Eine gewisse Steigerung der Materialeffizienz kann jedoch durch zwei Maßnahmen erreicht werden: ein verbessertes Produktdesign zur Verringerung des Fertigungsschnitts und eine weitere Gewichtsreduzierung durch Leichtbau. Die Technologien für diese beiden Maßnahmen sind marktreif und werden bereits eingesetzt.

¹⁰ Zur Veranschaulichung: 50 Prozent Schrott mit 0,2 Prozent Kupferkontamination gemischt mit 50 Prozent neuem Stahl mit null Prozent Kupferkontamination ergibt Stahl mit 0,1 Prozent Kupferkontamination.

Verringerung des Fertigungsverschnitts

Bei der Herstellung von Autos werden erhebliche Mengen an hochwertigem Stahl verschrottet, ohne jemals verwendet worden zu sein. Diese Verschnittraten können bei Blechen bis zu 40 Prozent betragen, wobei der Verschnitt bei der Herstellung von Kotflügeln und Seitenwänden der Karosserie besonders hoch ist (Horton und Allwood, 2018). Um diesen Verschnitt zu reduzieren, können verschiedene Optimierungstechnologien eingesetzt werden: Die Materialnutzung bei Blechen kann durch eine bessere Anordnung der ausgestanzten Formen verbessert werden. Beispielsweise kann die Materialeffizienz von Platinen auf dem Blech optimiert werden, indem verschiedene Teile verschachtelt werden (Horton und Allwood, 2018). Darüber hinaus kann die Gestaltung der (Komponenten der) Fahrzeuge bei gleichzeitiger Optimierung zur Reduktion der Verschnittrate die Überlappung verringern und die Passfähigkeit erhöhen. Technologien zur Optimierung sind bereits vorhanden und weitverbreitet, müssen aber weiterentwickelt werden, um die Materialeffizienz zu erhöhen. Die Maximierung des Potenzials kann zu einer Verringerung des Fertigungsausschusses von 14 Prozent auf sieben Prozent führen, was zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um mehr als drei Prozent im Jahr 2045 führt.

Leichtbau bei Autos

Leichtbau bedeutet, dass beim Bau eines Fahrzeugs – zum Beispiel durch die Nutzung dünnerer Bleche – weniger Materialien verwendet werden, um das Gewicht des Fahrzeugs zu verringern, ohne seine Größe zu reduzieren.¹¹ Da das Gewicht eines Fahrzeugs ein wichtiger Faktor für die Kraftstoffeffizienz und die Fahrleistung ist, setzen die Automobilhersteller bereits in großem Umfang Leichtbautechniken ein. Es gibt nur ein begrenztes zusätzliches Potenzial für den Leichtbau, obwohl die breitere Anwendung von ultrahochfestem Stahl, Stahlfalttechniken und

Stahlblechen, die nicht überall gleich dick sind, den Gesamtbedarf an Stahl noch weiter senken könnte.

Eine gängige Praxis zur Verringerung des Stahlanteils eines Fahrzeugs ist die Substitution von Stahl durch Aluminium. Der Hauptvorteil dabei sind niedrigere Emissionen und eine höhere Leistung während der Nutzungsphase des Fahrzeugs, da Aluminium leichter ist als Stahl. Reines Aluminium hat jedoch einen etwa achtmal höheren CO₂-Fußabdruck als reiner Stahl (Agora Industrie, 2022). Um CO₂-Vorteile zu erzielen, statt die Emissionen zu erhöhen, ist daher die Verwendung von Sekundäraluminium erforderlich, das einen wesentlich kleineren CO₂-Fußabdruck hat, oder aber die Dekarbonisierung der Primärproduktion von Rohaluminium. Daher wird die Substitution von Stahl durch Aluminium in den Modellierungen und Ergebnissen dieses Berichts nicht berücksichtigt. Sobald klimaneutrales Aluminium in größerem Umfang verfügbar ist, wird eine verstärkte Substitution durch Aluminium sinnvoll sein.

Gebäude

Im Gegensatz zur Automobilindustrie gibt es im Gebäudesektor noch ein großes Potenzial zur Verbesserung der Materialeffizienz. Hierfür gibt es drei Gründe. Erstens tragen die bestehenden Anreize in der Bauindustrie nicht zu mehr Materialeffizienz bei: Zwei wichtige Leistungsindikatoren für Gebäude sind Sicherheit (strukturelle Festigkeit) und thermische Effizienz. Diese drängen den Bausektor eher zu einem höheren als zu einem geringeren Materialeinsatz. Zweitens ist der Bausektor dezentraler organisiert als die Automobilherstellung, was in der Praxis zu großen Unterschieden führt. Drittens kann eine Überdimensionierung des Materialeinsatzes unter Kostengesichtspunkten optimal sein, da Materialeinsparung einen individuelleren und arbeitsintensiveren Bau erfordern kann.

Die Materialeffizienz im Gebäudesektor kann anhand von drei Hebeln verbessert werden, ohne die strukturellen Eigenschaften der Gebäude zu beeinträchtigen:

11 Der Begriff Leichtbau kann auch die Verkleinerung von Fahrzeugen einschließen, was in der Modellierung dieser Studie jedoch nicht berücksichtigt wird.

Verringerung des Stahlabfalls, Optimierung des Gebäudeentwurfs und Ersatz von Stahl durch Holz.

Verringerung des Stahlabfalls

Während der Bauphase von Gebäuden kann Stahlabfall durch sorgfältige Planung und durch Anpassung des Gebäudeentwurfs an bereits vorgefertigte Stahlkomponenten vermieden werden. Da vorgefertigte Stahlträger und -rohre beispielsweise in genormten Längen geliefert werden, die je nach Verwendungszweck bestellt werden, kann Abfall durch Schneiden vermieden werden. Noch wichtiger ist das Zurückfahren von Überdimensionierung zur Senkung der Stahlnachfrage im Bausektor. Eine britische Studie (Moynihan; Allwood, 2014) schätzt, dass bis zu 50 Prozent des Stahls in Gebäuden keinen zusätzlichen Nutzen für die Sicherheit der Struktur haben. In diesem Bericht wird argumentiert, dass der Stahlabfall bis 2045 von vier Prozent auf ein Prozent reduziert werden kann, was zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen um etwa ein Prozent bis 2045 führt.

Optimierung des Gebäudedesigns

Der Entwurf eines Gebäudes kann optimiert werden, um die Materialeffizienz zu erhöhen, ohne die strukturelle Integrität oder die Nutzbarkeit von Gebäuden zu beeinträchtigen. Mit automatisierten Entwurfsmethoden und mathematischen Optimierungsmodellen können Designoptionen getestet werden, die weniger Material benötigen. Technologien zur Topologieoptimierung sind bereits verfügbar und werden in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt und im Bauwesen kommerziell genutzt.

Stahl ist sehr gut verarbeitbar, da das Material bei normaler Temperatur sehr widerstandsfähig gegen äußere Kräfte ist, sich aber bei Erwärmung leicht verformen lässt. Das macht die Konstruktion von topologieoptimierten Stahlkonstruktionen möglich. Durch Gießen, Walzen und Stanzen lassen sich relativ leicht komplexe Formen herstellen. Für kompliziertere Konstruktionen bietet das selektive Laserschmelzen zusätzliche Flexibilität. Diese Technologie

wird bereits kommerziell in anderen Bereichen zur Gewichtsoptimierung eingesetzt, kann aber auch im Bauwesen angewendet werden (Yap et al., 2015). Darüber hinaus werden und können topologieoptimierte Elemente modular hergestellt werden, sodass sie leichter in neuen Gebäuden mit ähnlichen Eigenschaften und ähnlichen strukturellen Anforderungen wiederverwendet werden können.

Die Anwendung von optimierten Gebäudedesigns in großem Maßstab kann den Bedarf an Stahl für Wohngebäude von 53 kg/m² im Jahr 2020 auf 43 kg/m² im Jahr 2045 und bei Nichtwohngebäuden von 149 kg/m² im Jahr 2020 auf 120 kg/m² im Jahr 2045 senken, was zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen um mehr als acht Prozent in 2045 führt.

Substitution von Stahl durch andere Materialien

Stahl kann durch hochfeste CO₂-ärmere Materialien ersetzt werden, insbesondere durch Holz. Gebäude in Holzrahmenbauweise sind in Deutschland und anderen Teilen der Welt sehr verbreitet. Brettsperrholz (CLT) kann Stahlträger direkt ersetzen und hat ähnliche Leistungsmerkmale, ist aber viel leichter. Wenn Holz als Ersatz für Beton verwendet wird, führt die Substitution von Beton auch zu Einsparungen bei der verwendeten Stahlbewehrung. Obwohl die Anwendung bei allen Gebäudetypen technisch möglich ist, wird der Ersatz von Stahl durch Holz bei größeren Gebäuden oft nicht in Betracht gezogen. Stahlbeton und Stahlträger haben eine höhere Tragfähigkeit als Holz, was größere Freiflächen oder Räume im Gebäude ermöglicht, in denen weniger Stützbalken benötigt werden. Es müsste von Fall zu Fall geprüft werden, ob ein Holzrahmenbau gegenüber einem (leichten) Stahlrahmenbau zusätzliche Vorteile bietet.

Bambus ist ein weiteres hochfestes Material, das Baustahl ersetzen kann. Bambus wächst im Vergleich zu Bäumen sehr schnell und speichert während seines Lebens erhebliche Mengen CO₂. Der Transport von Bambus aus Produktionsregionen in Asien ist jedoch unter Emissionsgesichtspunkten nicht

sinnvoll, und die Produktion von Bambus in Deutschland ist aufgrund des Klimas in Deutschland begrenzt. Zukünftige Bemühungen, die Bambusproduktion vor Ort zu steigern, könnten nach sorgfältiger Analyse der Lebenszyklusemissionen und der Landnutzungskonflikte in Betracht gezogen werden.

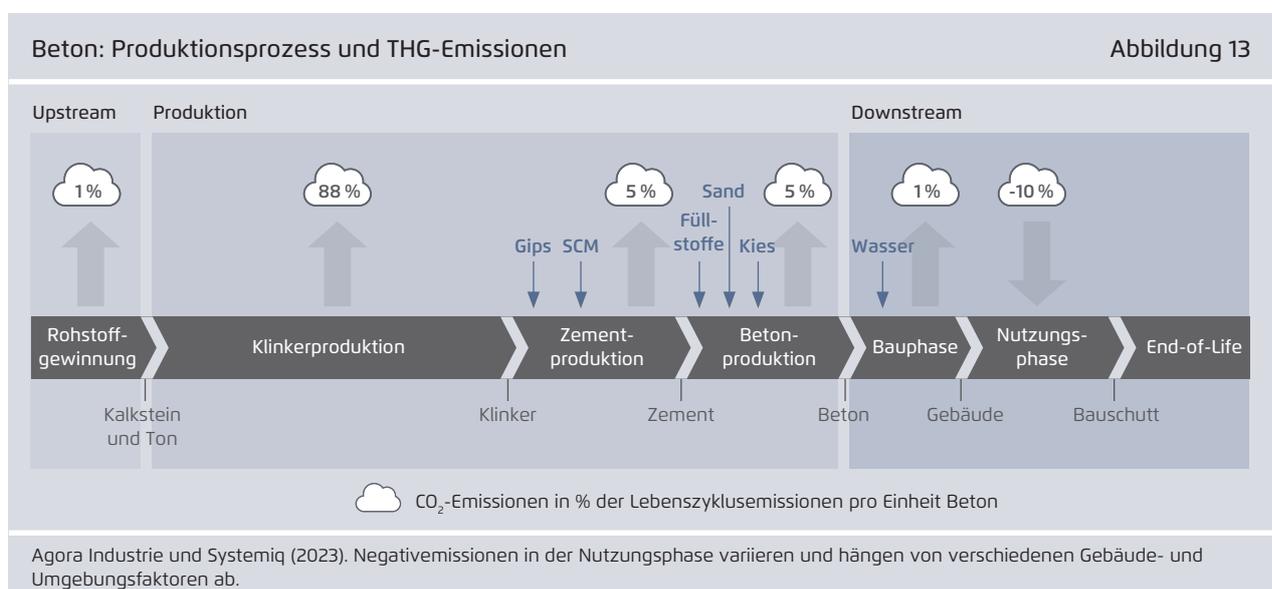
In dieser Studie wird nur Holz als marktfähiges Substitutionsmaterial für Stahl in Gebäuden betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass Holz bis 2045 zusätzliche fünf Prozent der Stahlverwendung in Gebäuden ersetzen kann, was zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen um mehr als ein Prozent führt (siehe auch Infobox 4 zur Substitutionsmaterialien in Gebäuden und Infobox 5 zur Holzverfügbarkeit).

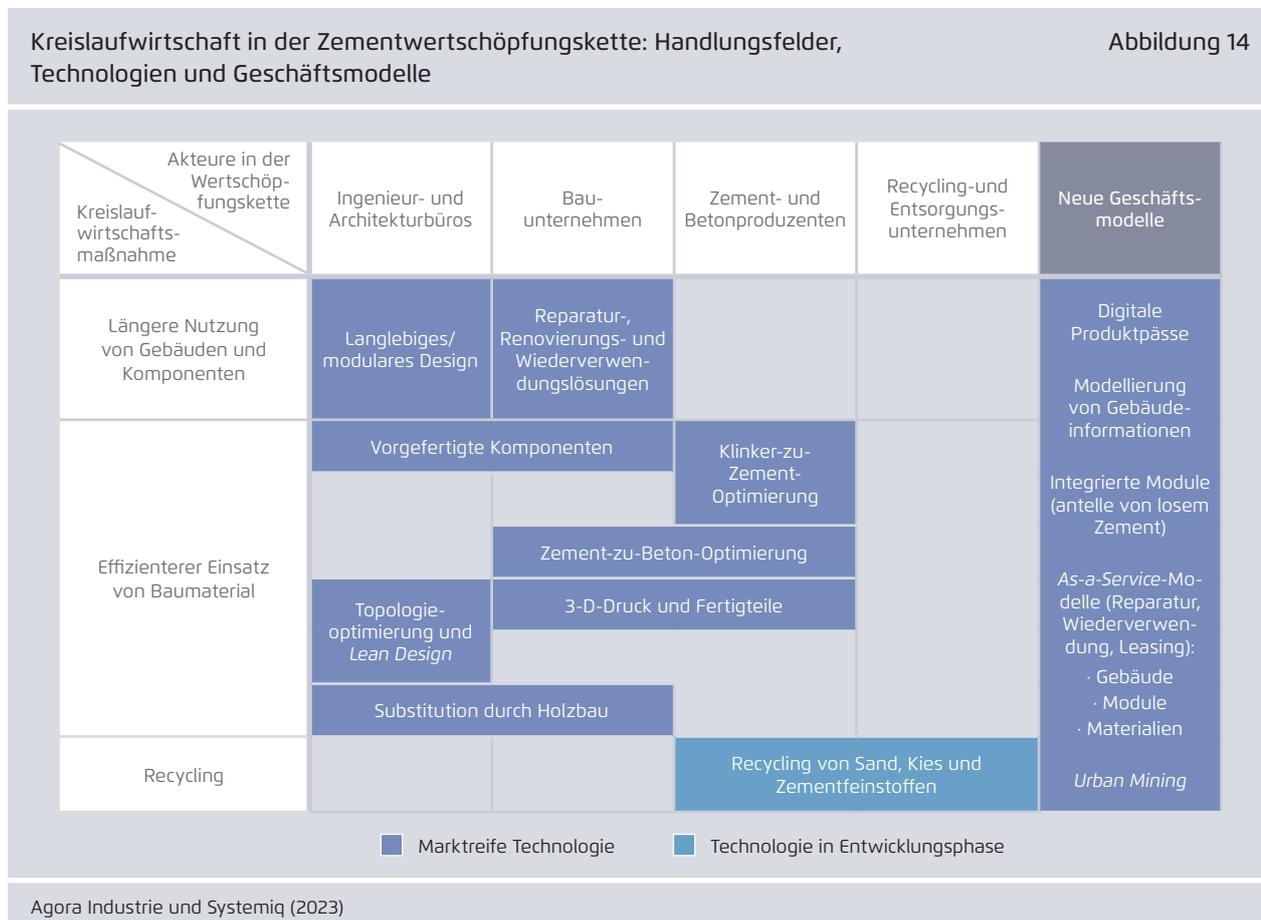
2.4 Beton und Zement

Beton ist ein wesentlicher Bestandteil der deutschen und der globalen Wirtschaft, da er für Gebäude und Infrastrukturen von entscheidender Bedeutung ist. Nach Wasser ist er das am häufigsten verwendete Material (Mission Possible Partnership, 2023). Unter Annahme eines unveränderten Regulierungsrahmens wird erwartet, dass die Nachfrage nach Beton und

Zement im Bausektor bis zum Jahr 2030 steigen wird, getrieben durch einen Anstieg der durchschnittlichen Wohnfläche pro Kopf. Nach 2030 jedoch führen eine sinkende Bevölkerungszahl und die lange Lebensdauer von Gebäuden zu einem leichten Rückgang der Nachfrage – vorausgesetzt, es werden keine neuenswerten Maßnahmen zur Steigerung der Raumnutzungseffizienz eingeführt.

Emissionen aus Beton entstehen in der gesamten Wertschöpfungskette vom Rohstoffabbau bis zum Bau. Die meisten Emissionen entstehen jedoch bei der Klinkerherstellung. Bei der Klinkerherstellung sind etwa 65 Prozent der Emissionen unvermeidbare Prozessemissionen, welche bei der chemischen Reaktion während der Umwandlung von Kalkstein zu Klinker auftreten. Der Rest sind Energieemissionen aufgrund des hohen Wärmebedarfs in der Produktion. Während der Nutzungsphase entstehen negative Emissionen, da Beton auf natürliche Weise CO₂ bindet („karbonatisiert“), während er der Umgebungsluft ausgesetzt ist (siehe Abbildung 13). In dieser Studie nehmen wir zehn Prozent gebundene, negative Emissionen während der Nutzungsphase an. Das Ausmaß der Karbonatisierung variiert jedoch und





hängt von Umweltfaktoren und dem Alter des Gebäudes ab.¹²

In Deutschland werden Beton und Zement hauptsächlich (rund 80 Prozent) im Bausektor verwendet und sind für rund zehn Prozent der industriellen Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt, 2022a; Material Economics, 2019). Heute gibt es 53 Zementwerke in Deutschland, von denen 60 Prozent über eine Klinkerproduktionskapazität verfügen (VDZ, 2022a).

2.4.1 Überblick: Kreislaufwirtschaft in der Wertschöpfungskette von Beton und Zement

Kreislaufwirtschaftshebel für Beton und Zement bestehen auf allen Stufen der Wertschöpfungskette, angefangen beim optimierten Materialeinsatz bei der Zementherstellung, der optimierten Bauplanung durch Ingenieur- und Architekturbüros, innovative Baupraktiken durch Bauunternehmen bis zu Recycling durch Abfallentsorgungsunternehmen (siehe Abbildung 14).

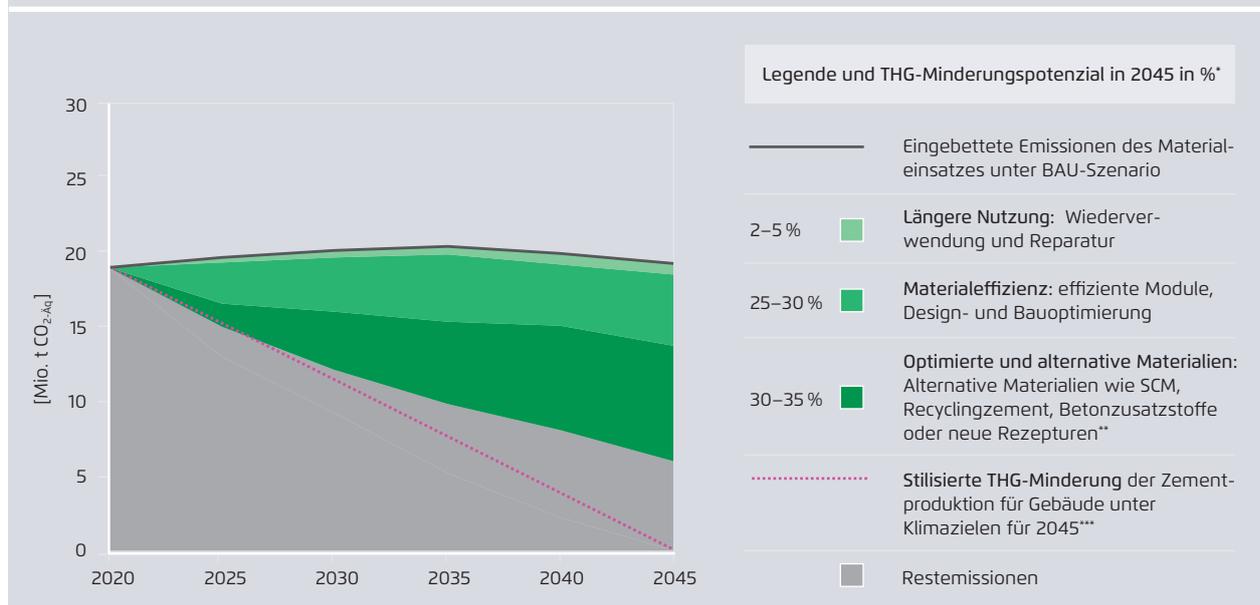
Gemeinsam haben diese Maßnahmen das Potenzial, die Emissionen in 2045 um 13 Millionen Tonnen (mehr als 65 Prozent)¹³ gegenüber einem BAU-Szena-

12 Das IVL Swedish Environmental Research Institute geht beispielsweise von einer Karbonatisierung von 20 Prozent aus.

13 Bei der derzeitigen CO₂-Intensität der Zementherstellung von 0,6 Tonnen CO₂ pro Tonne Zement. Quelle: VDZ (2022a).

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

Abbildung 15



Agora Industrie und Systemiq (2023). * Konkreter Beitrag der THG-Minderung durch Kreislaufwirtschaftshebel zum Erreichen der deutschen Klimaziele ist nicht eindeutig bestimmbar, da in der Studie keine Annahmen zur Entwicklung von Exporten/Importen getroffen wurden. ** Diese Hebel werden von Expert:innen zum Teil nicht als Strategien der Kreislaufwirtschaft, sondern zur Dekarbonisierung der Primärproduktion klassifiziert. *** Die Modellierung des Dekarbonisierungspfads 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.

rio ohne verstärkte Kreislaufwirtschaft zu reduzieren. Bereits in 2030 ist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um etwa 40 Prozent möglich (siehe Abbildung 15). Die vollständige Dekarbonisierung von Zement wird in jedem Szenario CCUS erfordern. Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen können den Bedarf an CCUS jedoch verringern.

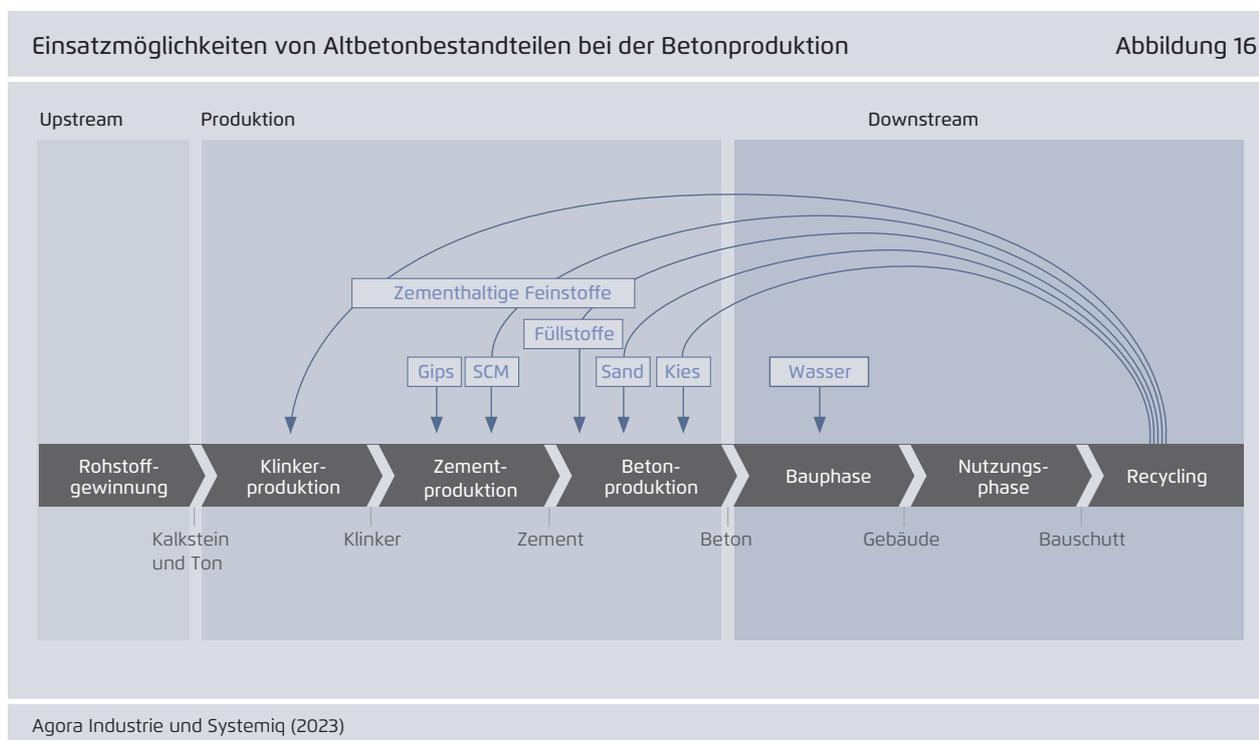
Im Gegensatz zu Stahl und Kunststoffen wird Zement heute international nicht in großen Mengen gehandelt. Deutschland exportiert etwa 15 Prozent seiner Produktion in die Nachbarländer, während es nur rund fünf Prozent seines Verbrauchs importiert (VDZ, 2022a). Daher werden sich die Auswirkungen von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen hauptsächlich innerhalb Deutschlands bemerkbar machen. Da sich die Nachfrage nach klimafreundlicheren reaktiven Materialien als Klinkerersatz in Zukunft erhöhen wird, könnte sich jedoch die Handelsdynamik für Rohstoffe ändern. Erhöhte Materialeffizienz und Innovation bei Zementinhaltsstoffen können dazu

beitragen, eine günstige Wettbewerbsposition Deutschlands und Europas in der Wertschöpfungskette von Baumaterialien zu sichern.

2.4.2 Recycling

Für das Recycling von Beton und Zement gibt es viele Definitionen. In der Regel bedeutet Betonrecycling die Zerkleinerung von Altbeton und seine Verwendung zur Aufschüttung von Straßen oder Fundamenten oder als Schotter für neuen Beton. Obwohl dies aus abfallwirtschaftlicher und logistischer Sicht wichtig ist, sind das THG-Minderungspotenzial dieser Praxis begrenzt.

In dieser Studie definieren wir Recycling von Beton und Zement als Wiederverwertung von Betonbestandteilen, die als neue Materialien in neuem Beton verwendet werden. Dieses hochwertige Recycling wird derzeit nirgendwo auf der Welt in großem Maßstab praktiziert, ist aber theoretisch möglich und erfordert zwei Maßnahmen: die Trennung von



Altbeton in die Bestandteile Kies, Sand und zementhaltige Feinstoffe zum Standardverfahren zu machen sowie zementhaltige Feinstoffe in einer möglichst hochwertigen Anwendung zu nutzen, wobei eine maximale Substitution von neuem Klinker angestrebt wird. Hierbei können innovative Technologien wie *Vibrating Cone Crusher* zur sanften Aufmahlung genutzt werden. Abbildung 16 bietet einen schematischen Überblick darüber, wie das Recycling von Beton und Zement aussehen könnte.

Trennung von Altbeton in die Bestandteile Kies, Sand und zementhaltige Feinstoffe

In der Zement- und Baubranche werden derzeit mehrere Technologien entwickelt und erprobt, die den Altbeton in seine ursprünglichen Bestandteile Kies, Sand und zementhaltige Feinstoffe trennen. Im Gegensatz zu gebrochenem Beton können die bei diesen Verfahren anfallenden Sande und Kiese ohne Verlust der strukturellen Festigkeit für die Herstellung von neuem Beton wiederverwendet werden.

Das Recycling von Beton zur Gewinnung seiner Hauptbestandteile hat mehrere Vorteile. Erstens wird

dadurch der Abbau von jährlich 35 Millionen Tonnen Sand und 28 Millionen Tonnen Kies vermieden (Mission Possible Partnership, 2023; siehe auch Systemiq Circular Economy Modell). Obwohl die CO₂-Auswirkungen der Sand- und Kiesnutzung gering sind, sind recycelter Sand und Kies in der Regel örtlich eher verfügbar als Rohsand und -kies und greifen weniger in Ökosysteme ein. Dennoch könnte die Logistik das Haupthindernis für eine Ausweitung des Betonrecyclings sein. Aufgrund der großen Masse von Beton und seinen Bestandteilen sollte die Verarbeitung in der Nähe der Quelle der Abfallströme sowie in der Nähe des Zielortes des neuen Betons erfolgen. Dies ist in der Regel in und um städtische Zentren der Fall, weswegen sich im urbanen Raum gute Anwendungsmöglichkeiten bieten. In ländlichen Gebieten ist eine breite Anwendung limitiert.

Minderung des Bedarfs an neuem Klinker durch Einsatz zementhaltiger Feinstoffe

Um die Treibhausgasemissionen durch Recycling zu verringern, ist der wichtigste zu recycelnde Bestandteil des Betons der Zementstein. Diese Partikel

können Klinker bis zu einem gewissen Grad ersetzen und hätten daher ein großes CO₂-Einsparpotenzial.

Wenn Zement beim Mischen von Beton mit Wasser in Berührung kommt, löst dies eine chemische Reaktion aus, bei der der Zement hydratisiert und aushärtet. Nach dem ersten Kontakt mit Wasser erfolgt die Hydratation zunächst relativ schnell. Mit zunehmendem Anteil an hydratisiertem gegenüber nicht

hydratisiertem Zement verlangsamt sich der Hydrationsprozess jedoch. Tatsächlich kann dieser Prozess nach dem ersten Anmischen des Betons und dem Bau des Gebäudes über viele Jahre sehr langsam fortschreiten. Je nach genauer Betonmischung, dem verwendeten Wasser-Zement-Verhältnis, dem Alter des Gebäudes und den Umweltbedingungen in und um das Gebäude kann ein Teil des Zements beim Abriss des Gebäudes noch nicht hydratisiert sein.

Infobox 3: Innovative Technologien: Karbonatisierung von recycelten Feinstoffen

Der im Baubeton enthaltene Zement durchläuft mit der Zeit einen natürlichen Karbonatisierungsprozess. Karbonatisierung bezieht sich auf die chemische Reaktion zwischen dem hydratisierten Kalziumsilikat und Kalziumhydroxid im Zement und dem Kohlendioxid (CO₂) in der Luft. Dieser Prozess führt dazu, dass CO₂ der Luft entzogen und im Beton gespeichert wird – dadurch wirken Gebäude als Kohlenstoffsenken. Wie viel des Zements karbonatisiert wird, hängt von einer Reihe von Faktoren ab wie der Lebensdauer des Gebäudes, der Oberfläche und der Festigkeit des Betons. Das Potenzial ist jedoch limitiert. Eine zu hohe Carbonatisierungsrate während des Betriebs des Gebäudes kann zudem Probleme verursachen, da dadurch Metalle in stahlbewehrten Betonstrukturen korrodieren können (IVL Swedish Environmental Research Institute, 2021).



Bild: Heidelberg Materials, 2021

Am Ende seines Lebenszyklus kann der Beton jedoch als effizienter Weg zur Abscheidung und Bindung von CO₂ genutzt werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten, das zu erreichen. Eine Low-Tech-Maßnahme zur Erhöhung der Karbonatisierung besteht darin, den Beton am Ende der Lebensdauer eines Gebäudes zu zerkleinern, um die Oberfläche zu maximieren. Wenn dieser zerkleinerte Beton der Luft ausgesetzt wird, führt dies zu einer weiteren Karbonatisierung von bis zu 20 Prozent (Material Economics, 2019).

Um die Karbonatisierung von Altbeton zu beschleunigen und zu erhöhen, wird eine verstärkte Karbonatisierung von recyceltem Zementstein vorgeschlagen. Dabei wird feiner Zementstein im Betonrecyclingprozess abgetrennt und anschließend erhitzter Luft mit hohem CO₂-Gehalt ausgesetzt. Dieses CO₂ kann bereits bei der Herstellung von Klinker im Brennofen aufgefangen werden. Der karbonatisierte Zementstein kann dann als neues zementartiges Material (SCM) verwendet werden, um den Klinker bei der Herstellung von neuem kohlenstoffärmerem Zement zu ergänzen. Die Technologie wird derzeit von der deutschen Zementindustrie zusammen mit Partnern getestet (Heidelberg Materials, 2021).

Über den durchschnittlichen Anteil von nicht hydratisiertem Zement in Betonanwendungen besteht nach wie vor große Unsicherheit, aber jüngere Forschungen deuten darauf hin, dass er im Bereich von etwa fünf bis zehn Prozent liegt (Kulisch et al., 2023).

Nach der Rückgewinnung der Feinstoffe gibt es mehrere Einsatzmöglichkeiten. Eine davon besteht darin, die Feinstoffe ohne vorherige Behandlung als Füllstoff in den Zement zu geben. Das feine Füllmaterial erhöht die strukturelle Festigkeit der Mischung und beschleunigt den Hydratationsprozess des Frischzements. So kann der zementhaltige Feinstoff das erforderliche Zement-Beton-Verhältnis insgesamt leicht verringern.

Eine weitere Möglichkeit, die sich allerdings derzeit noch in der Testphase befindet, besteht darin, die hydratisierten Feinstoffe von den nicht hydratisierten Feinstoffen zu trennen. Unhydratisierter Zement hat ähnliche Eigenschaften wie „neuer“ Zement und reagiert und härtet aus, wenn er mit Wasser in Berührung kommt. Dieser wasserfreie Zement könnte, wenn er richtig abgetrennt wird, ohne zusätzliche Behandlung als Zementersatzstoff (*Supplementary Cementitious Materials*, SCM, weitere Ausführungen unten) verwendet werden. Er könnte Klinker jedoch nicht vollständig ersetzen, da die Zusammensetzung von nicht hydratisiertem Zement aufgrund der inhomogenen Hydratationsgeschwindigkeit der Zementbestandteile unterschiedlich ist. Der hydratisierte Anteil des Zements kann dann als Füllstoff verwendet werden.

Die letzte Option ist die Verwendung der zementhaltigen Feinstoffe als Einsatzmaterial für den Klinkerofen. Studien im Labormaßstab zeigen, dass die thermische Behandlung im Zementofen die Partikel zu Klinker „reaktivieren“ kann, wobei 10 bis 20 Prozent der zementhaltigen Eigenschaften des Klinkers wiederhergestellt werden (Florea et al., 2014). Die behandelten Feinstoffe können anschließend als SCM verwendet werden.

Die jeweils optimale Verwendung zementhaltiger Feinstoffe nach ihrer Rückgewinnung hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Erstens bestimmt die örtliche Verfügbarkeit und Qualität von SCM, inwieweit unhydrierte oder reaktivierte Feinstoffe benötigt werden, um das gewünschte Klinker-Zement-Verhältnis zu erreichen. Dabei sollte eine ganzheitliche Bewertung der verschiedenen SCM-Optionen in Betracht gezogen werden.

In unserer Modellierung haben wir keine Annahmen über den Anteil von Recyclingzement in der SCM-Mischung getroffen. Daher wird das Treibhausgasreduktionspotenzial von Recyclingzement ausschließlich durch die Optimierung des Klinker-Zement-Verhältnisses und des Zement-Beton-Verhältnisses erfasst (siehe nächster Abschnitt).

2.4.3 Materialeffizienz und Verwendung von alternativen Materialien in der Betonmischung

Die Materialeffizienz im Beton- und Zementsektor kann in verschiedenen Bereichen der Betonherstellung und -nutzung erhöht werden: effizientere Verwendung von Klinker im Zement durch Substitution von Klinker durch andere Materialien, effizientere Verwendung von Zement im Beton durch Verringerung der Überdimensionierung und Zugabe von Füllstoffen und Zusatzmitteln, effizientere Verwendung von Beton durch Substitution mit anderen Materialien, Verringerung von Bauverlusten und verbesserte Gebäudeplanung und *structural design*.

Effizientere Verwendung von Klinker in Zement

Klinker ist das emissionsintensivste Material in Beton. Abbildung 16 veranschaulicht den Prozess der Betonherstellung und die entsprechenden CO₂-Emissionen in jedem Prozessschritt. Dabei ist die Klinkerproduktion für rund 88 Prozent der Emissionen von Beton verantwortlich (Mission Possible Partnership, 2023). Daher ist eine Verringerung des benötigten Klinkers ein wichtiger Hebel, um THG-Emissionen in der Betonproduktion zu reduzieren.

Die Rohstoffe für Klinker sind Kalkstein und Ton, die zur Herstellung von Klinker thermisch behandelt werden. Beim Erhitzen gibt der Kalkstein CO₂ ab. Dieser chemische Prozess ist für rund 65 Prozent der Emissionen bei der Klinkerherstellung verantwortlich. Die verbleibenden circa 35 Prozent der Emissionen sind auf den sehr hohen Wärmebedarf für die Behandlung des Kalksteins zurückzuführen.

Klinker ist aufgrund seiner Reaktionsfähigkeit mit Wasser ein wichtiger Bestandteil im Zement: Wenn er mit Wasser in Berührung kommt, hydratisiert er mit der Zeit und härtet aus. Um die Erstarrungsreaktion zu verzögern und Beton herzustellen, bevor dieser aushärtet, wird Gips zugesetzt. Um die benötigte Klinkermenge im Zement zu reduzieren, können ergänzende zementhaltige Materialien (SCM) hinzugefügt werden, die ähnliche Eigenschaften wie Klinker aufweisen, wenn sie mit Wasser in Berührung kommen. SCM werden bereits seit Jahrzehnten in großem Umfang eingesetzt. Die Substitution eines Teils des Klinkers durch solche Materialien kann auch zur Treibhausgasreduktion beitragen, da SCM

keine Emissionen oder geringere als Klinker haben. Zement wird in Deutschland heute mit einem durchschnittlichen Klinker-Zement-Verhältnis von 0,71 hergestellt, der Rest sind Gips und SCM. Dieses durchschnittliche Verhältnis kann jedoch weiter auf 0,56 gesenkt werden, in einigen Fällen ist sogar ein noch geringeres Klinker-Zement-Verhältnis technisch möglich, ohne die Anforderungen an die strukturelle Festigkeit zu beeinträchtigen (Mission Possible Partnership, 2023). Ohne jegliche Dekarbonisierung im Klinkerproduktionsprozess (etwa durch einen Brennstoffwechsel oder CCUS) kann dies die CO₂-Intensität von Zement von rund 0,6 Kilogramm CO₂ pro Kilogramm Zement (VDZ, 2022a) auf rund 0,5 senken, was zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen um circa 20 Prozent im Jahr 2045 führt.

Um das Klinker-Zement-Verhältnis zu senken, muss die deutsche Zementindustrie Beschaffungs- und Lieferketten für zusätzliche und neue SCM entwickeln. Heute sind 96 Prozent der in Deutschland eingesetzten SCM granuliert Hochofenschlacke



(auch Hüttensand, GBFS), ein Nebenprodukt der Hochofenstahlerzeugung (VDZ, 2022b). In den kommenden Jahren muss die deutsche Zementindustrie ihr SCM-Portfolio diversifizieren, um einen Anstieg des SCM-Einsatzes zu ermöglichen und einer zukünftigen Verringerung von Hüttensand aufgrund der Dekarbonisierung der Stahlindustrie und der damit einhergehenden Verringerung der aktiven Hochöfen Rechnung zu tragen.

Es gibt eine Vielzahl von alternativen SCM, von denen einige in Deutschland reichlich vorhanden sind (siehe Abbildung 17). Neben dem oben genannten recycelten Zement gibt es mit kalziniertem Ton, gemahlenem Kalkstein und Vulkanasche weitere vielversprechende SCM. Kalzinierter Ton ist ein hochreaktives puzzolanisches Material, das ebenso reichlich verfügbar ist wie Kalkstein. Kalzinierter Ton muss zwar vor der Verwendung thermisch behandelt werden, setzt aber im Behandlungsprozess kein CO₂ frei, sodass er rund 65 Prozent niedrigere CO₂-Emissionen hat als Klinker. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz gemahlenen Kalksteins, also desselben Rohstoffs, der für Klinker genutzt wird, aber ohne thermische Behandlung. Das Material ist inert, hat aber nachweislich sehr positive Auswirkungen auf die Hydratation des Zements und die konstruktive Festigkeit des Betons, wodurch die benötigte Gesamtmenge an Zement reduziert wird (siehe auch nächster Abschnitt). Vulkanasche schließlich verhält sich wie kalzinierter Ton puzzolanisch, jedoch mit minimalen Verarbeitungsanforderungen. Vulkanasche ist in der EU vor allem im Mittelmeerraum verfügbar, wo sie bereits für die Zementherstellung verwendet wird (zum Beispiel in Griechenland und Italien), und würde für einen Einsatz in Deutschland einen zusätzlichen Transport erfordern (Material Economics, 2019).

Neben den technischen Möglichkeiten, die sich durch alternative SCM ergeben, müssen die Normen und Standards, die derzeit den Klinkeranteil für verschiedene Zementsorten festlegen, entsprechend aktualisiert werden. Die Bauindustrie unterliegt in hohem Maße der Regulierung. Es ist nicht möglich, die

Zusammensetzung von Zement ohne behördliche Genehmigung zu ändern. Für die spezifischen Zementsorten, bei denen der erforderliche Klinkerfaktor derzeit den Anteil an SCM begrenzt¹⁴, müssen die Vorschriften in den kommenden Jahren überarbeitet werden, um neue SCM und einen höheren Anteil an SCM gegenüber Klinker zu ermöglichen. Da die optimale Zementzusammensetzung von den lokal verfügbaren Ressourcen abhängt und sich in den nächsten zehn Jahren aufgrund von Innovationen in diesem Bereich erheblich ändern kann, ist eine dynamischere Anpassungsfähigkeit seitens der Regulierungsbehörden zentral, um Zementvorschriften rechtzeitig aktualisieren zu können.

Effizientere Verwendung von Zement in Beton

Neben der Optimierung des Klinkeranteils im Zement kann auch der Zementanteil im Beton optimiert werden. Es gibt drei Möglichkeiten, den Zementein-
satz pro Betoneinheit zu reduzieren.

Erstens kann der Einsatz vorgemischten Betons durch Massenverfahren wie Transportbeton und Fertigbeton erhöht werden. Die Umstellung auf Schüttgutverfahren kann zu Materialeffizienz führen, da beim Mischen gesackten Zements auf der Baustelle häufig zu viel Zement verwendet wird. In Deutschland wird auf Baustellen jedoch bereits größtenteils vorge-mischter Transportbeton eingesetzt.

Zweitens kann die Überdimensionierung von Zement im Beton reduziert werden. Die Menge an Zement, die zur Herstellung von Beton mit einer bestimmten Festigkeit verwendet wird, variiert stark. Diese Streuung zeigt, dass es ein erhebliches Potenzial zur CO₂-Minderung gibt, indem die Effizienz der Zementverwendung verbessert wird. Beispielsweise beträgt für Betone mit einer Druckfestigkeit von

14 Eine Übersicht über die aktuellen Klinkerfaktoren der 27 gebräuchlichen Zemente, wie sie in der deutschen/europäischen Norm DIN EN 197-1 normiert sind, sind hier zu finden: <https://www.betontechnische-daten.de/de/27-normalzementarten-nach-din-en-197-1>.

30 Megapascal (MPa) – was im Bereich des häufig verwendeten Betons liegt – die Mindestbindemittelintensität etwa acht kg pro MPa/m³. Der Durchschnitt liegt jedoch bei etwa 12 kg pro MPa/m³, was einem Unterschied von 33 Prozent entspricht (Material Economics, 2019). Eine Verringerung der Überdimensionierung birgt also ein großes Einsparpotenzial.

Drittens können Vorschriften zur Mindestmenge von Zement pro Betoneinheit überarbeitet werden. Heute ist das Zement-Beton-Verhältnis als absolute Mindestmenge an Zement (rund 280 kg) pro Kubikmeter Beton unabhängig von den Druckfestigkeitsanforderungen der Betonanwendung geregelt (Müller, 2012). Für Anwendungen mit hohen Druckfestigkeitsanforderungen (mehr als 55 MPa) führt dies zu optimalen Ergebnissen: Für jede Einheit der erforderlichen Druckfestigkeit (gemessen in MPa) beträgt die Zementmenge rund 5 kg/m³ Beton. Bei Anwendungen mit geringen Druckfestigkeitsanforderungen (weniger als 30 MPa) führt dies jedoch zu einer erheblichen Überspezifizierung von etwa zehn bis 20 Kilogramm Zement pro MPa/m³ Beton.

Analysen zeigen, dass es technisch machbar wäre, alle Mindestanforderungen an den Zement auf der Grundlage von rund fünf kg pro MPa/m³ Beton zu erreichen, ohne die strukturelle Festigkeit von Beton in seinen Anwendungen zu beeinträchtigen (Damineli et al, 2010; Favier et al, 2018; Scrivener et al, 2018). Dänemark hat seine Regulierung des Zement-Beton-Verhältnisses bereits angepasst und damit seinen durchschnittlichen Zementeinsatz pro Kubikmeter Beton auf 150 Kilogramm reduziert,¹⁵ was etwas mehr als der Hälfte des derzeitigen deutschen Minimums entspricht (Müller, 2012).

Um dieses technische Potenzial auszuschöpfen, sind weitere Analysen zur verbesserten Zusammensetzung von Beton- und Zementmischungen erforder-

lich. Zunächst müsste der Betonmischung zusätzliches (inertes) feines Füllmaterial zugesetzt werden, um die strukturelle Festigkeit zu gewährleisten, zum Beispiel gemahlener Kalkstein oder recycelte Feinanteile. Die Verwendung von Zusatzmitteln (wie Verflüssiger oder Dispergiermittel) kann die Verarbeitbarkeit verbessern. Zweitens spielt die Zusammensetzung des Zements eine wichtige Rolle für die Druckfestigkeit. Von einigen SCM ist bekannt, dass sie unter sonst gleichen Bedingungen die Druckfestigkeit des Betons erhöhen (Scrivener et al., 2018). Einige SCM können jedoch die Druckfestigkeit beeinträchtigen. Die Normen für das Zement-Beton-Verhältnis sollten daher nach Zementart und -zusammensetzung differenziert werden. Das Zusammenspiel zwischen der Reduktion des Klinkeranteils im Zement und der Verringerung des Zementanteils im Beton sind in der wissenschaftlichen Literatur gut dokumentiert.

Auch logistisch sind Herausforderungen zu bewältigen: Da ein typisches Gebäude aus Elementen mit unterschiedlichen Druckfestigkeitsanforderungen besteht, würde ein hohes Maß an Differenzierung des Zementgehalts dazu führen, dass auf einer Baustelle mehrere unterschiedliche Betonmischungen verwendet werden. Die zunehmende Digitalisierung der Prozesse kann dazu beitragen, das Fehlerrisiko zu verringern.

In dieser Studie wird eine erhöhte Effizienz des Zement-Beton-Verhältnisses von 15 Prozent auf acht Prozent bis 2045 modelliert, was zusammen mit einer Senkung des Klinkerfaktors von 71 Prozent im Jahr 2020 auf 56 Prozent im Jahr 2045 zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen um circa 40 Prozent im Jahr 2045 führt. Im Hinblick auf kumulierte THG-Emissionen zwischen 2020 und 2045 kann durch diese Effizienzstrategien eine Reduktion von 22 Prozent bewirkt werden.

Effizientere Verwendung von Beton

In der Bauphase von Gebäuden kommt es zu viel Abfall und übermäßigem Materialverbrauch. Dies ist

15 Unter der Voraussetzung, dass insgesamt 375 kg Füllmaterial verwendet werden. Wert bezieht sich auf CEM I (Portlandzement).

auf eine Kombination aus Überdimensionierung durch strenge und umsichtige Vorschriften, Trägheit gegenüber Veränderung in der Baupraxis und Abwägungen zwischen Arbeits- und Materialkosten zurückzuführen. Zusammengefasst können durch Materialeffizienz im Betoneinsatz 26 Prozent der THG-Emissionen des BAU-Szenarios in 2045 eingespart werden. Zwischen 2020 und 2045 bedeutet das eine Einsparung der kumulierten THG-Emissionen von 17 Prozent. Es gibt dabei drei Möglichkeiten, Ineffizienzen zu verringern.

Die erste Möglichkeit liegt in der Verbesserung der Bauplanung, um Beton effizienter zu nutzen. Bereits in der Planungsphase neuer Gebäude gibt es Möglichkeiten, den Bedarf an Beton und damit an Zement zu senken. Obwohl technisch machbar, wird eine verbesserte Bauplanung zur Optimierung des Materialeinsatzes nicht in vollem Umfang genutzt, da fehlende Anreize und bestehende Vorschriften diese Praxis nicht ausreichend fördern und das nötige Bewusstsein für die Problematik oft fehlt. Ein wichtiger Hebel ist der Abbau von Überdimensionierungen: Die beim Bau verwendete Betonmenge übersteigt häufig die für die notwendige strukturelle Festigkeit erforderliche Menge. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass Bauplaner lieber auf „Nummer sicher“ gehen, insbesondere bei einem relativ günstigen Material wie Beton. Ein weiterer Grund kann die Kostenoptimierung sein, da die Arbeitskosten für die Anpassung der Betonstärke an den tatsächlichen Bedarf die Kosten für zusätzlichen Beton übersteigen können. Schätzungen zufolge ist der Betonbedarf in Europa im Durchschnitt um 20 Prozent überdimensioniert (Favier et al., 2018).

Zur weiteren Optimierung des Materialeinsatzes können *Lean-Design*-Prinzipien und Topologieoptimierung angewendet werden. Dabei können automatisierte Designprozesse und mathematische Optimierungsmodelle genutzt werden, um materialeffiziente Designoptionen zu evaluieren. Durch das Testen von Designentscheidungen in der gesamten Wertschöpfungskette zielt ein schlanker Designprozess darauf

ab, Materialverschwendung zu reduzieren und gleichzeitig die Wertschöpfung zu maximieren (Franco und Picchi, 2016). Die Topologieoptimierung, die in der Produktgestaltung weitverbreitet ist, zielt darauf ab, das materialeffizienteste Design unter bestimmten strukturellen Bedingungen zu ermitteln, und hat in letzter Zeit auch in architektonischen Entwurfsprozessen zunehmend Beachtung gefunden (Barragan et al., 2021).

Die Konstruktion der Betonelemente anhand von Topologieoptimierungssoftware kann jedoch oft eine Herausforderung darstellen. Das manuelle Aushärten des Betons vor Ort erlaubt es nicht, die komplexeren Entwürfe ordnungsgemäß zu bauen. Die folgenden neuen Konstruktionstechniken können jedoch zu einer besseren Nutzung von Beton beitragen.

- Das Belassen von Hohlräumen oder Poren und die Verwendung von Füllmaterial: Hohlräume oder alternative Füllmaterialien können verwendet werden, wenn sie die strukturelle Integrität der Betonelemente nicht beeinträchtigen. Porenbeton zum Beispiel ist eine Art von Beton, bei dem Gas in eine Betonmischung injiziert wird, um Mikroblasen zu erzeugen und das Volumen zu vergrößern. Die Leichtbetonblöcke haben ähnliche Eigenschaften wie herkömmliche Betonblöcke, benötigen aber weniger Material (Dejtjar, 2019).
- Biaxiale Hohlkörperdecken: Eine weitere Anwendung, die bereits auf dem Markt erhältlich ist, sind biaxiale Hohlkörperdecken, die eine Alternative zu herkömmlichen Stahlbetonplatten darstellen. Hier werden größere luftgefüllte Kugeln aus recyceltem Kunststoff in den Beton eingebracht, um dessen Masse zu verringern und gleichzeitig die erforderliche strukturelle Integrität zu erhalten (Souza, 2020).
- Vorgegossene oder 3-D-gedruckte Elemente: Das Vorgießen oder der 3-D-Druck ermöglichen die Herstellung von Elementen, die hinsichtlich Struktur und Effizienz optimiert sind. Solche Produktionstechniken reduzieren auch den Abfall vor Ort während des Baus (Mission Possible

Partnership, 2023). Durch das Vorgießen von Bauelementen (in Formen) können komplexere Formen in Serie realisiert werden. Auch der 3-D-Druck mit einer Betonmischung wurde in

der Praxis bereits erfolgreich eingesetzt, sowohl direkt auf der Baustelle als auch in Produktionsstätten, von wo aus die Elemente zur Baustelle transportiert werden.

Infobox 4: Mögliche Substitutionsmaterialien im Gebäudebau

Es gibt mehrere Materialien, die Beton, Stahl und Kunststoffe in Gebäuden ersetzen können. Hier wird eine Auswahl von acht vielversprechenden Materialien vorgestellt:

Mögliche Substitutionsmaterialien für Baustoffe in Gebäuden

Abbildung 18

Gebäudeelement	Traditionelles Baumaterial	Mögliche Substitutionsmaterialien							
		Holz	Bambus	Kork	Hanfbeton	Mycelium	Strohballen	Recycelte Kunststoffe	Recycelte Textilien
Strukturelle Elemente (Rahmen, tragende Wände)	Beton, Stahl, Stahlbeton, Ziegel, Holz	✓	✓						
Nichttragende Wände	Beton, Gips	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Decke	Gips	✓	✓						
Fußboden	Holz, Kunststoff, Stein	✓	✓	✓					
Fundament	Beton	✓							
Fenster- und Türrahmen	Kunststoff, Holz	✓							
Dach	Stahl, Metall, Ton, Schindeln	✓	✓			✓	✓	✓	
Dämmung	Kunststoff	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rohre	Kunststoff, Stahl								

Agora Industrie und Systemiq (2023). Übersicht vielversprechender Substitutionsmaterialien; nicht vollständig.

→ **Holz** als alternatives Baumaterial zu Beton und Stahl wird bei Weitem am meisten beachtet. Es ist eines der wenigen Materialien, die strukturelle Elemente eines Gebäudes ersetzen können. In Deutschland hat Holz eine lange Geschichte als Baumaterial, ist in gewissem Umfang verfügbar und gilt als optisch ansprechend. Ein weiterer Vorteil von Holz liegt in seiner Vielseitigkeit und seiner Anwendbarkeit auf

fast alle Elemente eines Gebäudes. Der wichtigste limitierende Faktor für die Substitution von Holz ist die nachhaltige Versorgung mit Holz (Infobox 5).

- **Bambus** ist eine schnell wachsende Pflanze, die erneuerbar und langlebig ist. Sie kann für Fußböden, Wandverkleidungen, Dächer und sogar für Bauelemente verwendet werden. Vor allem in asiatischen und lateinamerikanischen Ländern erleben traditionelle Bambusbautechniken eine Renaissance in der nachhaltigen und modernen Bauweise. Ein Nachteil ist, dass erhebliche Ackerflächen für den Anbau zur Verfügung gestellt werden müssten. Da die klimatischen Bedingungen in Deutschland nicht angemessen für den Anbau von Rieserbambus sind und es eine zunehmende Konkurrenz in der Bodennutzung gibt, wird die Rolle von Bambus in dieser Studie nicht berücksichtigt. Die Einbeziehung von Bambus in eine ganzheitliche deutsche Biomassestrategie ist jedoch ratsam.
- **Kork** ist ein erneuerbares Material, das für Bodenbeläge, Wandverkleidungen und Isolierung verwendet werden kann. Er ist langlebig, ungiftig und bietet eine gute Isolierung.
- **Hanfbeton** wird aus dem holzigen Kern von Hanfpflanzen hergestellt und mit Kalk und Wasser vermischt. Er ist leicht, stabil und hat gute Dämmeigenschaften.
- **Mycel** ist die Wurzelstruktur von Pilzen, die als Baumaterial verwendet werden kann. Es ist leicht, feuerbeständig und kann in unterschiedlicher Form gezüchtet werden.
- **Strohballen** können für Wände, Dächer und zur Isolierung verwendet werden. Sie sind erneuerbar, kostengünstig und bieten eine gute Isolierung.
- **Recycelter Kunststoff** kann für Dachziegel, Wandverkleidungen und Isolierungen verwendet werden. Er ist haltbar, leicht und wartungsarm.
- **Recycelte Textilien** können zur Herstellung von Dämmmaterial verwendet werden.

Quellen: Ellis (2023), Islam Bhat (2019), Beck (2020), Jackson (2021)

Infobox 5: Verfügbarkeit von Bauholz

Wie in Infobox 4 erörtert, ist Holz ein geeignetes Ersatzmaterial für mehrere Elemente eines Gebäudes: von den tragenden Wänden bis zu den Fußböden und Fensterrahmen. Rein bautechnisch gesehen könnten etwa 65 Prozent des gesamten Betons und etwa 35 Prozent des gesamten Stahls in Gebäuden durch Holz ersetzt werden. Die höheren Kosten und die eingeschränkte nachhaltige Verfügbarkeit von Holz begrenzen jedoch das Substitutionspotenzial in der Praxis.

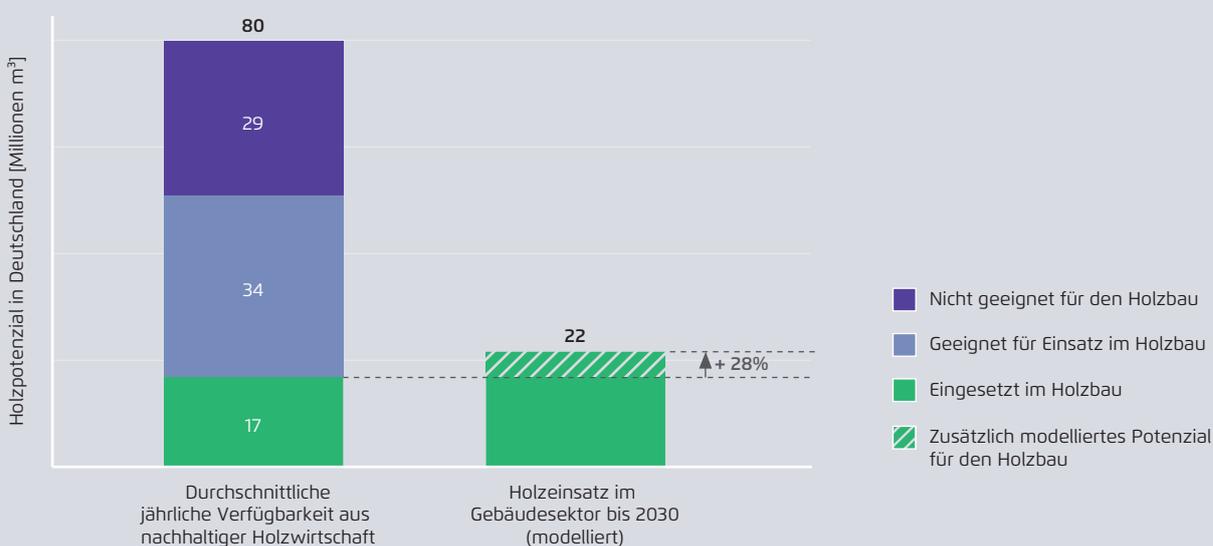
Das jährliche nachhaltige Holzangebot in Deutschland wird vom Umweltbundesamt auf 80 Millionen Kubikmeter geschätzt. Davon werden heute etwa 17 Millionen Kubikmeter im Baubereich genutzt. Weitere 34 Millionen Kubikmeter Holz wären für den Bau geeignet, werden aber anderweitig genutzt. Die verbleibenden 29 Millionen Kubikmeter erfüllen nicht die Qualitätsanforderungen für Bauholz, können aber für die Energie- und Papierproduktion verwendet werden (Wolf et al., 2020).

In der vorliegenden Modellierung wurde eine konservative Schätzung des Holzangebots für den Bausektor vorgenommen: Bis 2030 wird die Verwendung von Holz im Bauwesen allmählich zunehmen und zusätzlich zehn Prozent des Betons und fünf Prozent des Stahls ersetzen. Nach 2030 werden die Substitutionsraten aufgrund der unsicheren Versorgungslage auf fünf beziehungsweise 2,5 Prozent zurückgehen. Im Spitzenjahr 2030 ergibt sich daraus ein zusätzlicher Bedarf von 4,8 Millionen Kubikmetern im Gebäudebereich –

etwa ein Viertel des Holzes, das 2018 in deutschen Haushalten als Brennholz verbrannt wurde (Döring et al, 2020). Entscheidend für die Realisierung dieses Potenzials ist die Umwidmung des deutschen Holzes von geringwertigen zu höherwertigen Anwendungen wie dem Baubereich. Die Kaskadenstrategie für Holz in Deutschland bietet hierfür eine Grundlage (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2021). Diese Strategie sieht vor, Holz so lange, so oft und so effizient wie möglich als Werkstoff zu nutzen, bevor es als Energieträger eingesetzt wird.

Jährliche Verfügbarkeit von Holz für den Einsatz in Gebäuden

Abbildung 19



Agora Industrie und Systemiq (2023)

Die tatsächliche Holzverwendung im Bauwesen hängt maßgeblich vom Regulierungsrahmen und der jährlichen Walddynamik ab. So ist in manchen Jahren mit einer großen Verfügbarkeit von zusätzlichem Holz zu rechnen, insbesondere von Fichtenholz, das aufgrund von Klimawandel, Schädlingsbefall und Dürreperioden geschlagen werden muss. Die Quantifizierung dieser jährlichen Angebotsschwankungen ist mit großen Unsicherheiten behaftet, weshalb das Substitutionspotenzial von Bauholz auf der Grundlage der neuesten Waldzustandsberichte regelmäßig neu bewertet und aktualisiert werden sollte.

Eine zweite Möglichkeit des materialeffizienten Einsatzes von Beton liegt in der Verringerung des Materialverlustes im Bauprozess. Es ist zum Beispiel üblich, dass zu viel Transportbeton bestellt wird, um Engpässe während des Baus zu vermeiden, die zu Verzögerungen im Zeitplan führen könnten. Neben einer sorgfältigen Planung der benötigten Beton- und

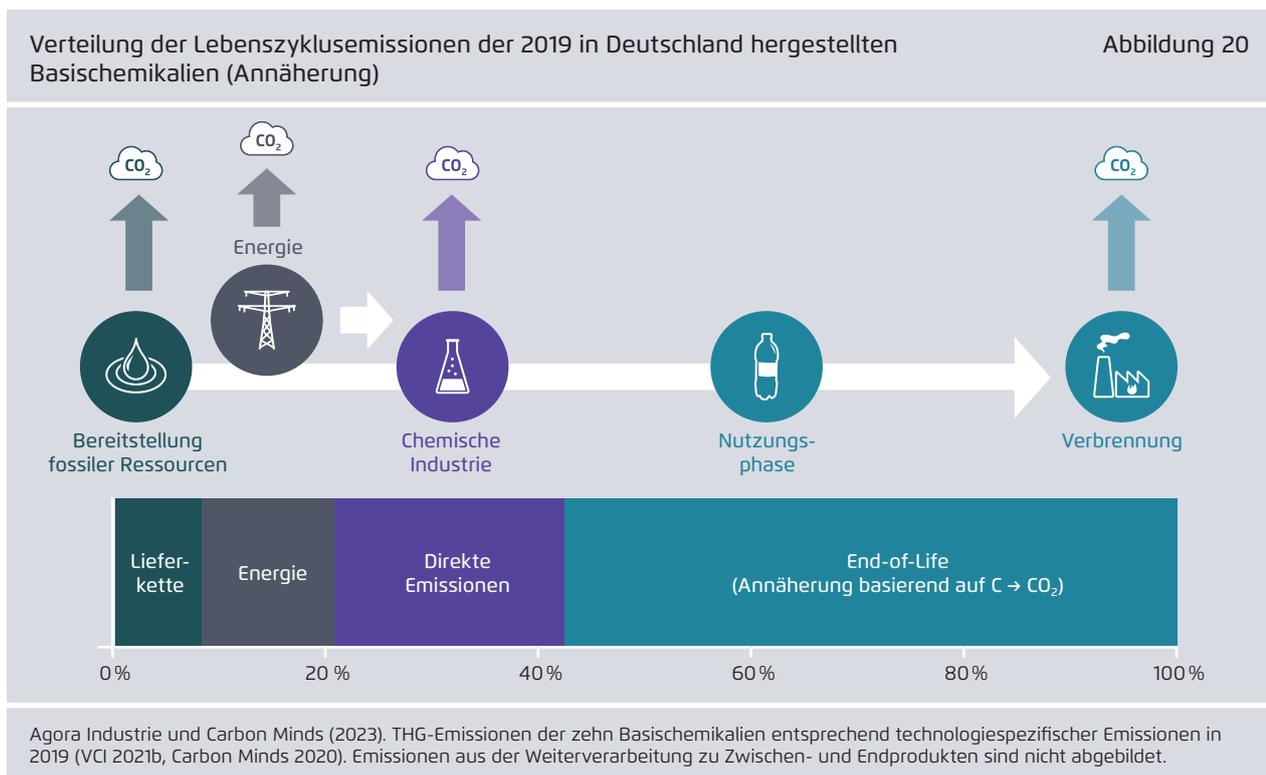
Zementmengen im Vorfeld können Verluste auch durch die Verwendung von Fertigteilen vermieden werden (Material Economics, 2019). Durch die Minimierung von Verlusten kann der Bedarf an Beton bis 2045 um zwei Prozent gesenkt werden, was zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen um etwa ein Prozent bis 2045 führt.

Drittens kann Beton durch andere Materialien ersetzt werden. Holz ist das Material, das am häufigsten als nachhaltiges Baumaterial infrage kommt. Historisch gesehen war Holz in Deutschland ein wichtiges Baumaterial und erlebt derzeit eine Renaissance – in Hamburg wird beispielsweise ein 18-stöckiges Holzgebäude gebaut, was die technischen Möglichkeiten von Holz im Bauwesen zeigt. Die Stadt Amsterdam hat sich beispielsweise zum Ziel gesetzt, die Zahl der hauptsächlich aus Holz gebauten Häuser bis 2025 auf mindestens 20 Prozent zu erhöhen (Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions, 2021). Infobox 4 gibt einen Überblick über mögliche Substitutionsmaterialien für Gebäude und Infobox 5 über die Verfügbarkeit von Holz als Baumaterial. Diese Studie geht davon aus, dass die Substitution von Beton durch Holz um zehn Prozent bis 2030 und um weitere fünf Prozent bis 2045 zunimmt.

2.5 Kunststoffe

Kunststoffe spielen in vielen Anwendungsbereichen eine wichtige Rolle, darunter im Gesundheitswesen, im Bauwesen, in Lebensmittelketten, bei der Energieerzeugung und im Verkehrsbereich. Kunststoffe sind erschwinglich, zweckdienlich, flexibel einsetzbar, langlebig und leisten gleichzeitig einen Beitrag zum Klimaschutz, beispielsweise durch die Isolierung von Gebäuden oder den Leichtbau von Fahrzeugen.

Gerade wegen der beschriebenen Vorteile für Verbraucherinnen und Verbraucher wird erwartet, dass der Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoffen in allen in dieser Studie betrachteten Nachfragesektoren steigen wird. Insbesondere wird erwartet, dass der Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoffverpackungen in Deutschland bis zum Jahr 2045 um rund 20 Prozent zunehmen wird (WWF, 2021). Der Kunststoffverbrauch im Automobil- und Gebäudesektor wird – entsprechend den der Modellierung zugrunde liegenden Nachfrage treibern wie gefahrenen Personenkilometern und



Quadratmetern Wohnfläche – in einem ähnlichen Maße zunehmen. Diese Zuwächse werden über den Zeitverlauf durch den Bevölkerungsrückgang bis 2045 teilweise ausgeglichen, führen aber dennoch zu einem Gesamtanstieg des Kunststoffverbrauchs.

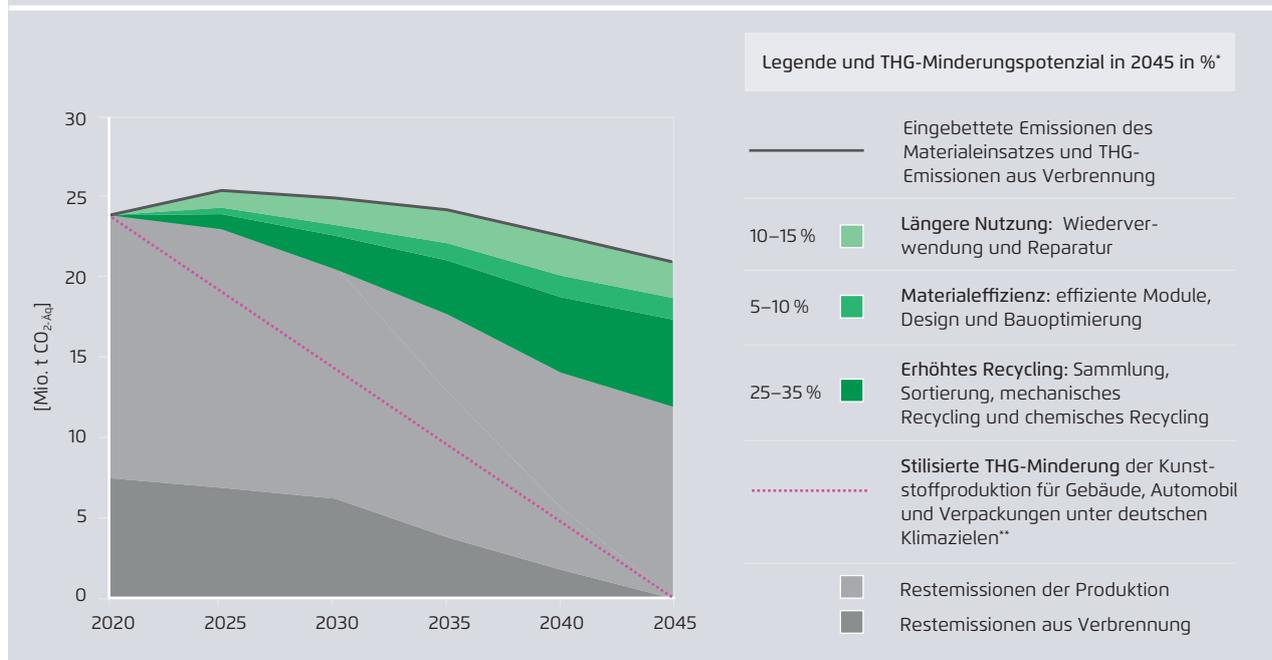
Kunststoffe unterscheiden sich grundlegend von Stahl und Zement, denn ihre wichtigste Komponente ist der Kohlenstoff. Für die Kreislaufwirtschaft hat dies zwei zentrale Implikationen: Erstens beeinflusst es das Muster der Lebenszyklusemissionen von Kunststoffen. Während die Emissionen bei Stahl und Zement während des Produktions- (oder Recycling-) Prozesses entstehen, fällt der Großteil der Lebenszyklusemissionen (circa 55 Prozent) von Kunststoffen am Ende des Lebenszyklus bei der Verbrennung an. Der Großteil des im Kunststoff gebundenen Kohlenstoffs oxidiert und setzt CO₂ frei (siehe Abbildung 20). In Deutschland wird der Großteil (mehr als 60 Pro-

zent) der gesammelten Kunststoffabfälle verbrannt (Agora Industrie; Carbon Minds, 2023).

Zweitens wird Kohlenstoff als Rohstoff für die Kunststoffproduktion benötigt. Heute ist der Großteil des Kohlenstoffs ein fossiler Rohstoff, der aus Rohöl gewonnen wird (Agora Industrie und Carbon Minds 2023). Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Verfügbarkeit erneuerbarer Rohstoffe zu erhöhen und die Verwendung fossiler Rohstoffe zu reduzieren: durch den Einsatz biogenen Kohlenstoffs, dessen nachhaltiges Angebot begrenzt sein wird; durch die Nutzung von aus der Atmosphäre abgeschiedenem CO₂, dessen Verarbeitung zu neuem Kunststoff sehr energieintensiv ist; oder durch den Einsatz recycelten Kunststoffs. Für die Kunststoffindustrie ist kein Klimaneutralitätspfad ohne Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft umsetzbar. Aus Kosten- und Effizienzgründen ist dabei das mechanische Recycling die primäre

THG-Minderungspotenzial des Einsatzes von recyceltem Kunststoff in den Sektoren Verpackungen, Gebäude und Automobil in Deutschland

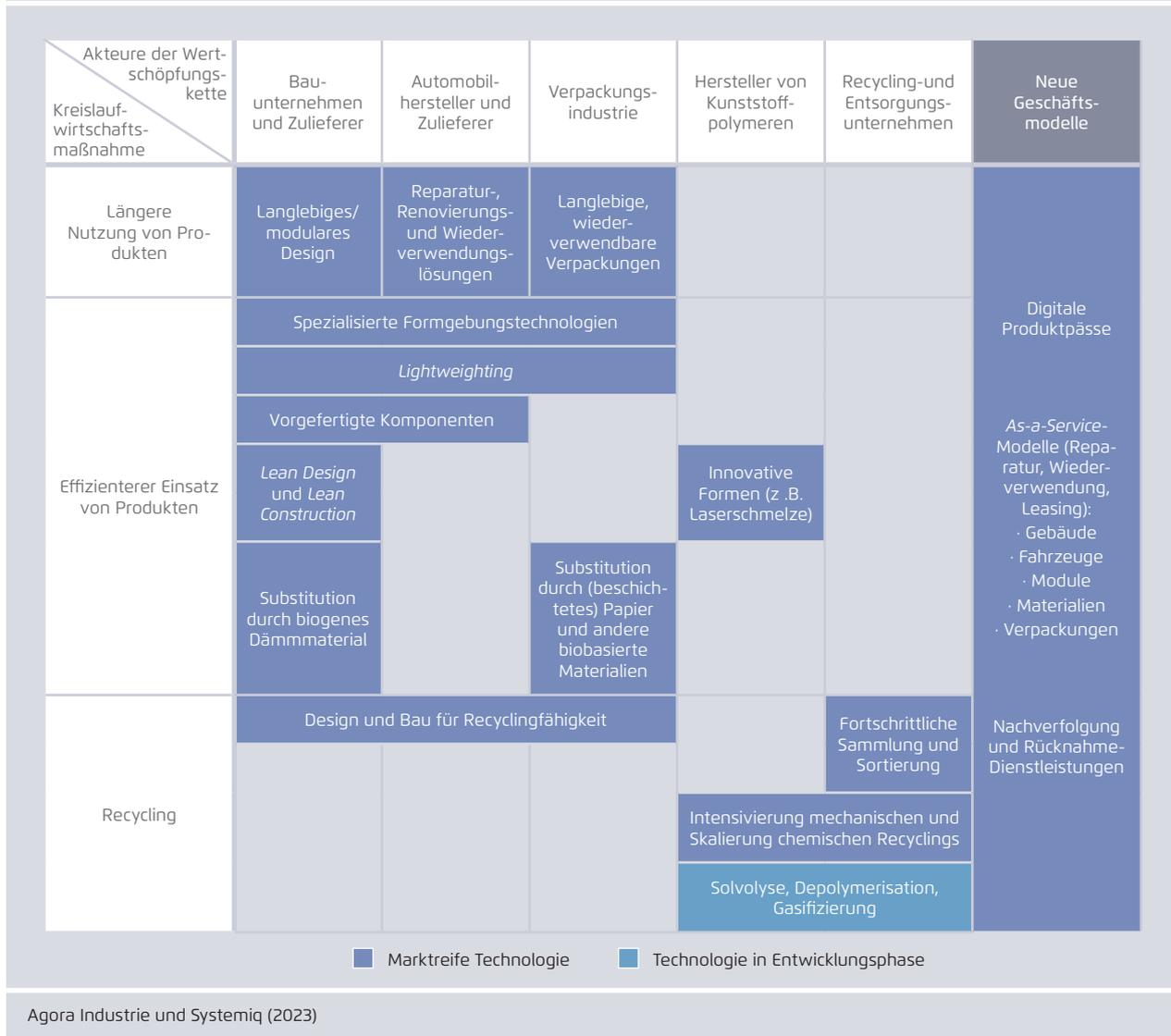
Abbildung 21



Agora Industrie und Systemiq (2023). * Konkreter Beitrag der THG-Minderung durch Kreislaufwirtschaftshebel zum Erreichen der deutschen Klimaziele ist nicht eindeutig bestimmbar, da in der Studie keine Annahmen zur Entwicklung von Exporten/Importen getroffen wurden. ** Eine Modellierung des Dekarbonisierungspfad der Chemieindustrie ist nicht Teil dieser Studie. Gemäß der deutschen Klimaziele muss die Chemieindustrie spätestens 2045 klimaneutral sein. Die EU-ETS-Reform erfordert jedoch eine schnellere Transformation.

Kreislaufwirtschaft in der Wertschöpfungskette von Kunststoffen: Handlungsfelder, Technologien und Geschäftsmodelle

Abbildung 22



Strategie zur Bereitstellung von Kohlenstoffrohstoffen in einem Netto-Null-Pfad.

2.5.1 Überblick: Kreislaufwirtschaft in Kunststoff-Wertschöpfungsketten

Innerhalb der Kunststoff-Wertschöpfungsketten für Gebäude, Fahrzeuge und Verpackungen gibt es eine Reihe von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen. Sie reichen von der Entwicklung haltbarer und wiederverwendbarer Verpackungen durch Verpackungshersteller über den Einsatz innovativer Formtechniken

bei der Herstellung von Kunststoffteilen und -elementen für Gebäude und Fahrzeuge bis hin zur Steigerung des Recyclingvolumens von Kunststoffen durch die Verbesserung der Sammlung und Sortierung und die Erhöhung der mechanischen und chemischen Recyclingkapazitäten (siehe Abbildung 21).

Zusammen haben diese Hebel das Potenzial, neun Millionen Tonnen (was mehr als 45 Prozent entspricht) an Treibhausgasemissionen in 2045 zu reduzieren. Bereits in 2030 ist eine Reduktion der

Treibhausgasemissionen um 19 Prozent möglich. Diese Minderungen treten sowohl bei der Produktion als auch am Ende des Lebenszyklus auf. Wie bereits skizziert entsteht bei Kunststoffen der Großteil der Emissionen am Ende des Lebenszyklus, da Kunststoffabfälle häufig verbrannt werden (siehe Abbildung 20).

Kunststoffe und Polymere werden international in großem Maßstab gehandelt. Tatsächlich importiert Deutschland jährlich etwa 70 Prozent aller genutzten Polymere und exportiert große Mengen seiner Polymerproduktion (VCI, 2023). Daher ist es möglich, dass Effizienzgewinne, die durch eine längere Nutzung von Produkten und einen effizienten Materialeinsatz erzielt werden, sich nicht innerhalb der deutschen Bilanzgrenzen abbilden, sondern zu einem Rückgang der Importe aus globalen Kunststoff- und Polymere Märkten führen.

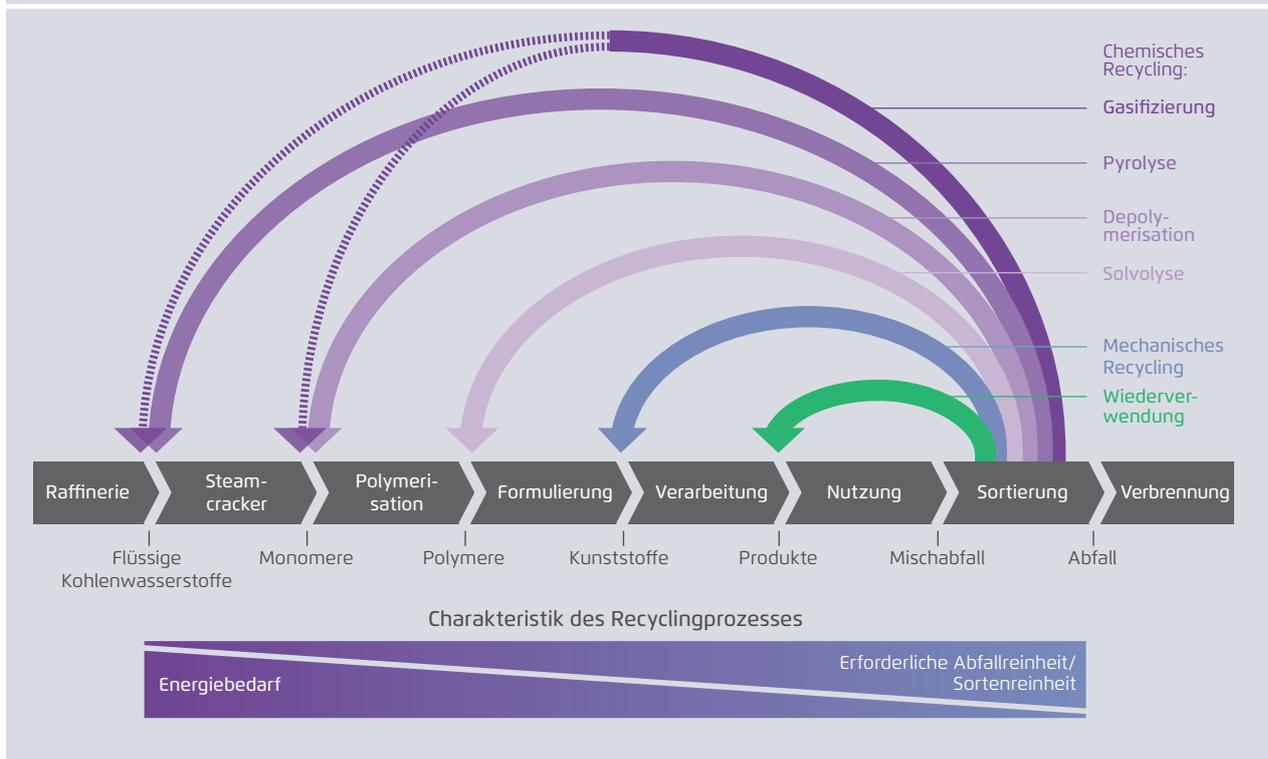
2.5.2 Recycling

Wie eingangs erläutert, ist ein nachhaltiger Umgang mit Kunststoffabfällen am Ende ihrer Lebensdauer nicht nur wichtig, um den Bedarf an neuen Rohstoffen (und die damit verbundenen CO₂-Emissionen) zu verringern, sondern auch, um die CO₂-Emissionen am Ende des Lebenszyklus zu reduzieren. Das Recycling von Kunststoffen ist somit doppelt wirksam und für die Verringerung der Treibhausgasemissionen von Kunststoffen entscheidend (Agora Industrie; Carbon Minds, 2023).

In der Praxis birgt das Kunststoffrecycling mehrere Herausforderungen. Alle Recyclingverfahren erfordern eine gewisse Homogenität der Abfallströme, was schwierig ist, da Kunststoffe in Bezug auf die verwendeten Polymere und Additive sehr heterogen sind. Außerdem können die mechanischen Recyclingverfahren die Qualität der Polymere beeinträch-

Komplementäre Technologien einer energie- und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe

Abbildung 23



Agora Industrie und Carbon Minds (2023)

tigen, während die chemischen Recyclingverfahren einen hohen Energiebedarf und/oder einen Massenverlust aufweisen. Um Energie und Abfallressourcen effizient zu nutzen, sollte die Steigerung des Recyclings von Kunststoffen in einer entsprechenden Reihenfolge erfolgen: Priorisierung und Maximierung des mechanischen Recyclings bei gleichzeitiger Entwicklung und Ausweitung des chemischen Recyclings für die Anwendung bei schwer recycelbaren Kunststoffen.

Erhöhung des mechanischen Recyclings

Das mechanische Recycling ist eine bewährte, kosteneffiziente und nahezu emissionsfreie Technologie zur Behandlung von Kunststoffabfällen am Ende ihres Lebenszyklus. Nach dem Sortieren, Reinigen und Zerkleinern werden die Abfälle geschmolzen und zu Kunststoffgranulat oder -flocken verarbeitet, die ohne weitere Behandlung wieder in den Kunststoffherstellungsprozess bei der Wiederaufbereitung oder sogar bei der Verarbeitung eingesetzt werden können.

Das mechanische Recycling ist die bevorzugte *End-of-Life*-Behandlung von Kunststoffen, da es allen anderen Recyclingtechnologien in Bezug auf Effizienz und Emissionen überlegen ist (Abbildung 23). Das Ziel sollte immer sein, das Potenzial des mechanischen Recyclings so weit wie möglich auszuschöpfen, bevor auf Alternativen zurückgegriffen wird.

Es gibt jedoch zwei wichtige Herausforderungen beim mechanischen Recycling, die seine Anwendbarkeit in der künftigen Kreislaufwirtschaft einschränken. Erstens erfordert das mechanische Recycling mehr als andere Recyclingtechnologien sehr homogene Abfallströme. Für das mechanische Recycling von Kunststoffen werden beispielsweise nicht nur Abfälle eines Polymertyps (zum Beispiel PET) benötigt, sondern auch ähnliche Zusatzstoffe im Produkt (zum Beispiel bei der Farbgebung oder Festigkeit). Daher können in der Praxis häufig nur Kunststoffabfälle desselben Produkts zusammen

verwertet werden (beispielsweise transparente PET-Flaschen oder gelbe PVC-Rohre).

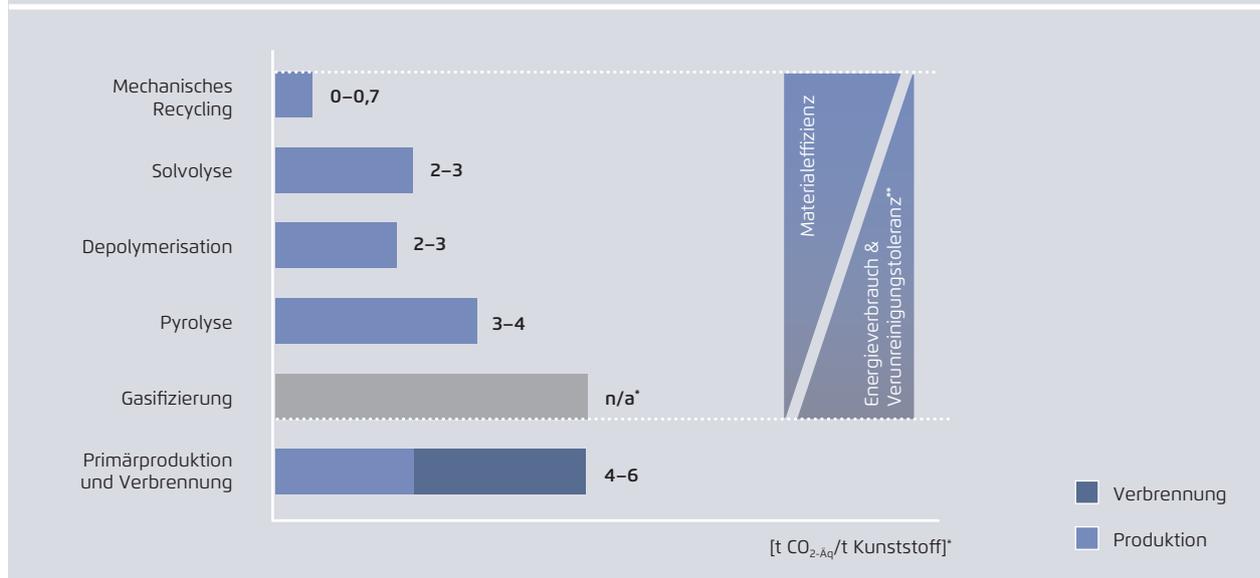
Zweitens werden beim mechanischen Recycling die Polymere beschädigt, was zu einer Verkürzung der Polymere führen kann. Das verändert die Eigenschaften der Polymere und mindert ihre Qualität.¹⁶ Deshalb werden mechanisch recycelte Kunststoffe mit Primärkunststoffen gemischt, um Qualitätsverluste auszugleichen. Zudem können Kunststoffe nur eine bestimmte Anzahl von Zyklen recycelt werden (Uekert et al., 2023). Aus diesem Grund kommen verschiedene Maßnahmen zum Einsatz, mit denen sichergestellt werden kann, dass Kunststoffe so entworfen, hergestellt und gesammelt werden, dass die Homogenität der Abfallströme maximiert wird:

- Minimierung des Einsatzes von Zusatzstoffen: Zusatzstoffe sind wichtige Bestandteile von Kunststoffprodukten. Sie ermöglichen wichtige Produkteigenschaften wie Flexibilität, Sicherheit oder Langlebigkeit. Viele Zusatzstoffe dienen jedoch nur der Ästhetik (zum Beispiel in Armaturenbrettern von Autos), dem Branding (beispielsweise bei Verpackungen) oder der Haptik. Werden die entsprechenden Zusatzstoffe aus der Kunststoffproduktion entfernt, würde sich die Recyclingfähigkeit der Materialien erheblich erhöhen.
- Minimierung der Verbreitung neuer Polymertypen: Vor allem im Bereich der Kunststoffe werden für unterschiedliche Anwendungen regelmäßig neue Kunststoffe in die Anwendung gebracht. Damit mechanisches Recycling wirtschaftlich sinnvoll ist, sind jedoch große Mengen an Abfällen der gleichen Polymertypen erforderlich. Ein gutes Beispiel ist PET, das für Flaschen standardisiert und in großen Mengen entsorgt wird, was zu hohen mechanischen Recyclingquoten für klare PET-Flaschen von über 90 Prozent führt (Systemiq, 2023).

16 Grundsätzlich gilt: Je reiner der Abfallstrom ist, desto weniger Verlust im Recyclingverfahren. PET-Flaschen mit strengen Anforderungen an Zusatz- und Farbstoffe ermöglichen eine Recyclingquote von bis zu 98 Prozent.

THG-Emissionen, Materialeffizienz und Verunreinigungstoleranz verschiedener Kunststoffrecycling-Technologien

Abbildung 24



Agora Industrie und Systemiq (2023). Umfasst alle THG-Emissionen von der Abfallsammlung bis zur Herstellung eines neuen Produkts, ohne Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Primärproduktion oder CCUS. Die angegebenen Bandbreiten hängen von der Art des Kunststoffes und der THG-Intensität des Stroms ab. *Für Kunststoff-zu-Kunststoff-Recycling sind keine zuverlässigen Daten verfügbar. **Bezieht sich auf die erforderliche Sortenreinheit.

- Erhöhung der Trennbarkeit der Materialien am Ende des Lebenszyklus: Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, besteht darin, die manuelle Demontage oder Trennung durch ein intelligenteres Produktdesign zu erleichtern. Die manuelle Zerlegung wird jedoch ein zeit- und kostenintensives Unterfangen bleiben, insbesondere in der Automobilindustrie. Daher ist es weder realistisch noch effizient, die manuelle Zerlegung deutlich zu erhöhen. Vielmehr sollten Kunststoffe zusätzlich für eine Trennung nach dem Schreddern ausgelegt werden. Dafür werden in der Regel Schwimm-/Sink-Technologien eingesetzt, bei denen die Materialien je nach Dichte schwimmen oder sinken und entsprechend getrennt werden. Damit das optimal funktioniert, müssen Kunststoffe verschiedener Polymertypen eine unterschiedliche Dichte aufweisen, was beim Design zu berücksichtigen wäre.
- Maximierung der Sammlung und Trennung von Kunststoffabfällen: Eine verbesserte Sammlung und Trennung von Kunststoffen könnte durch eine Reihe von Maßnahmen erreicht werden: Auswei-

tung der erweiterten Herstellerverantwortung, Sensibilisierung der Verbraucherinnen und Verbraucher, Pfand für Kunststoffverpackungen und Anreize für eine getrennte Abfallsammlung. Außerdem müssen KI-basierte, Schwimm-/Sink- und Nahinfrarot-Sortierverfahren skaliert werden, um Kunststoffe nach der Sammlung von gemischten Abfällen zu trennen.

Die Anwendung aller oben genannten Strategien hat das Potenzial, das mechanische *Closed-loop*-Recycling von Kunststoffabfällen in den betrachteten Sektoren auf rund 42 Prozent zu steigern, was bis 2045 zu einer zusätzlichen Verringerung der kumulierten Treibhausgasemissionen um zwölf Prozent führen würde. Der Anteil der chemisch recycelten Kunststoffabfälle läge bei 18 Prozent. Im Jahr 2045 würde die Steigerung des Recyclings eine Reduktion der THG-Emissionen im BAU-Szenario von 31 Prozent bewirken.

Infobox 6: Innovative Technologien: Chemisches Recycling durch Solvolyse, Depolymerisation und Gasifizierung

Während in der vorliegenden Studie nur die Pyrolyse als Technologie für die Zeit vor 2030 modelliert wird, gibt es weitere drei vielversprechende Arten des chemischen Recyclings, die für die Klimaneutralität im Kunststoffsektor bedeutend sein könnten.

Die Solvolyse ist ein lösungsmittelbasierter Reinigungsprozess, bei dem Kunststoffe in Polymere, Zusatzstoffe und Verunreinigungen getrennt werden. Die Solvolyse wird teilweise als „mechanisches Recycling“ und nicht als chemisches Recycling bezeichnet, da die chemische Zusammensetzung des Polymers während des gesamten Prozesses intakt bleibt.

Die Depolymerisation ist ein chemischer Prozess, bei dem verschiedene Kombinationen von Chemikalien, Lösungsmitteln und Wärme eingesetzt werden, um das Polymer in Monomere oder kürzere Fragmente aufzuspalten. Es handelt sich also um den umgekehrten Prozess der Polymerisation unter Anwendung von chemischen Lösungsmitteln. Da diese Technologien noch in der Entwicklung begriffen sind, ist ihre endgültige Toleranz gegenüber gemischten Stoffströmen derzeit noch ungewiss.

Depolymerisation und Solvolyse sind vielversprechende Technologien, da sie potenziell eine höhere Rohstofftoleranz aufweisen als das mechanische Recycling. Zudem sind sie unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz der Pyrolyse vorzuziehen, weil sie Monomere beziehungsweise Polymere hervorbringen. So vermeiden sie die energieintensiveren thermischen Prozesse, die Abfälle in grundlegendere Chemikalien umwandeln, und sie vermeiden eine Reihe von Schritten im Kunststoffherstellungsprozess (siehe Abbildung 23 und 24). Die CO₂-Emissionen des Recyclings von Kunststoffen zu Kunststoffpellets werden auf rund 2,2 Tonnen pro Tonne Kunststoff geschätzt (van der Hulst et al., 2022; Uekert et al., 2023). Obwohl die Emissionen bei der Herstellung von neuem Kunststoff nur geringfügig niedriger sind, hat das Recycling von Kunststoff den zusätzlichen Vorteil, dass Emissionen bei der Verbrennung vermieden werden.

Die Gasifizierung ist ein Verfahren, bei dem gemischte Kunststoffströme unter begrenzter Sauerstoffzufuhr erhitzt werden, um Synthesegas zu erzeugen, das wieder in Polymere umgewandelt werden kann. Im Vergleich zur Abfallverbrennung wird die Verbrennung gestoppt, bevor der Kohlenstoff vollständig zu CO₂ oxidiert wird. Die Gasifizierung hat eine höhere Rohstofftoleranz als die Pyrolyse (insbesondere bei organischen Abfällen), und es wird erwartet, dass sich die Wirtschaftlichkeit und die CO₂-Bilanz der Technologie nach 2030 verbessern werden. Allerdings gibt es derzeit weltweit nur wenige kommerzielle Projekte zur Gasifizierung von Kunststoffen, und die meisten basieren auf Kohle als Kohlenstoff-Input, nicht auf Kunststoffabfällen. Die Gasifizierung ist daher voraussichtlich nur für schwer zu recycelnde gemischte Abfallströme geeignet, die auch Nicht-Kunststoff-Verunreinigungen wie organische Abfälle enthalten. Die Gasifizierung folgt einem anderen, längeren Produktionsweg als die Pyrolyse, nämlich über die Umwandlung von Synthesegas in Methanol und dann möglicherweise in Olefine oder Aromaten (MTX). Dieser Prozess ist teurer als die Pyrolyse, sowohl aus Sicht der Prozesskosten als auch aus Sicht der Investitionskosten, da neuartige Produktionsanlagen benötigt werden.

Chemisches Recycling ausbauen und skalieren

Mit 25 Prozent der europäischen *Steamcracker*-Kapazitäten (Petrochemicals Europe, 2021), einer Vielzahl von Chemieunternehmen mit Hauptsitz in Deutschland, chemischer Infrastruktur und Expertise ist Deutschland führend in der chemischen Industrie. Daher kann Deutschland eine wichtige Rolle dabei spielen, chemisches Recycling voranzubringen: *Steamcracker*-Anlagen könnten künftig für die Herstellung von Kunststoffen aus chemisch recyceltem Material durch Pyrolyse und möglicherweise auch beim Recycling durch Gasifizierung genutzt werden.

In dieser Studie betrachten wir vier chemische Recyclingtechnologien: Solvolyse, Depolymerisation, Pyrolyse und Gasifizierung (siehe Infobox 6). Jede dieser Technologien bringt unterschiedliche Toleranzen für Verunreinigungen und organische Verschmutzungen der Abfallströme mit sich und führt zu Unterschieden hinsichtlich Materialeffizienz, Emissionen, Kosten, technologischer Reifegrade und Prozessoutputs. Hier gibt es noch großen Entwicklungsbedarf, da die meisten Technologien für das chemische *Closed-loop*-Recycling heute noch nicht als ausgereift gelten. Die ersten Initiativen der Industrie im Bereich des chemischen *Closed-loop*-Recyclings konzentrieren sich auf die Pyrolyse. Gründe hierfür sind Wirtschaftlichkeitserwägungen, Rohstofftoleranzen und die relativ einfache Integration in das bestehende fossile Produktionssystem, da das recycelte Pyrolyseöl fossiles Naphtha in Produktionsprozessen mit bestehenden *Steamcrackern* ersetzen könnte. Ein Beispiel für eine Pyrolyse-Demonstrationsanlage, die heute in Betrieb ist, ist eine Altreifenpyrolyseanlage in Dillingen, Deutschland (die jedoch für Altreifen und nicht für Verpackungsabfälle ausgelegt ist).

Pyrolyse ist der thermische Prozess der Erhitzung von Kunststoffen unter Ausschluss von Sauerstoff. Dabei werden Polymere in eine Reihe von einfacheren Kohlenwasserstoffverbindungen in Form von flüssigem Pyrolyseöl umgewandelt (Planet Positive

Chemicals, 2022). Sie weist eine relativ hohe Verunreinigungstoleranz auf und ist tolerant gegenüber Mischungen aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) (Planet Positive Chemicals, 2022). Sie ist daher eine gute Ergänzung zum mechanischen Recycling für komplexe Abfallströme. Mit Blick auf die Treibhausgasbilanz würde diese Technologie beim aktuellen Energiemix jedoch ähnliche Emissionen wie das fossile Steamcracken haben, insbesondere wegen des hohen Energiebedarfs. Es besteht die Aussicht, dass vorhandene *Steamcracker*-Anlagen genutzt werden könnten. Daher besteht das Risiko, dass hierdurch Investitionen in das mechanische Recycling oder in effizientere, klimaschonendere Prozesse des chemischen Recyclings, die eine größere Umstellung bestehender Geschäftsmodelle erfordern, verzögert werden könnten.

2.5.3 Materialeffizienz

Zusammengefasst können durch Materialeffizienz im Kunststoffeinsatz sieben Prozent der THG-Emissionen des BAU-Szenarios in 2045 eingespart werden. Zwischen 2020 und 2045 bedeutet das eine Einsparung der kumulierten THG-Emissionen von drei Prozent. Im Folgenden erörtern wir die entsprechenden Strategien in den jeweiligen Nachfragesektoren.

Gebäude

Im Nachfragesektor Gebäude gibt es zwei Möglichkeiten, die Materialeffizienz von Kunststoffen zu erhöhen: die Substitution von Kunststoffen durch alternative Materialien und die Verringerung des Verschnitts.

Substitution von Kunststoffen durch alternative Materialien

Kunststoffe werden in Gebäuden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt – in Rohren, Fenster- und Türrahmen, Dämm- und Dichtungsmaterial und Innenausstattungsprodukten wie Fußboden- oder Küchenkomponenten. Je nach Anwendung eignet sich eine Vielzahl von Materialien für den Ersatz von Kunststoffen (siehe Infobox 4). Theoretisch können alle Kunststoffkomponenten in einem Gebäude durch

Materialien mit geringeren Emissionen ersetzt werden. Fenster- und Türrahmen aus Kunststoff können beispielsweise durch Holzrahmen ersetzt werden, und alle Kunststoffisolierungen lassen sich durch Flachs oder Kork ersetzen. Unter systemischen Gesichtspunkten kann dies jedoch auch negative Aspekte haben. Der Ersatz von Kunststoff kann sich negativ auf die thermische Effizienz des Gebäudes und in einigen Fällen auf seine Haltbarkeit und Sicherheit auswirken. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass der zusätzliche Bedarf an Biomasse nicht zu einer Intensivierung oder einer indirekten Änderung der Landnutzung mit nachteiligen Auswirkungen auf Ökosysteme und Kohlenstoffkreisläufe führt. Das (nachhaltige) Angebot an alternativen Materialien in großem Maßstab ist ungewiss. In diesem Bericht wird eine zusätzliche Substitution von Kunststoffen in Gebäuden in Höhe von sieben Prozent modelliert, was bis 2045 zu einer Minderung der kumulierten THG-Emissionen von etwa einem Prozent führen würde, die hauptsächlich auf die Substitution von Dämmstoffen zurückzuführen ist.

Reduktion des Verschnitts in der Anwendung

Wie in der Automobilindustrie werden Kunststoffprodukte für den Bausektor in der Regel im Spritzgussverfahren hergestellt, was anfänglich zu sehr wenig Materialverschnitt führt. Im weiteren Verlauf der Wertschöpfungskette werden die Kunststoffteile jedoch oft auf Maß gesägt, was zu Verschnittverlusten führt.

Automobilindustrie

Aufgrund der Vorteile von Kunststoffen in Bezug auf Gewicht und Sicherheit wird eine Substitution von Kunststoffen in der Automobilindustrie nicht als sinnvoll erachtet. Da Fahrzeugteile aus Kunststoff in der Regel im Spritzgussverfahren hergestellt werden, sind die Verluste bei der Herstellung bereits minimiert.

Verpackungen

Bei Verpackungen gibt es zwei Möglichkeiten, die Effizienz des Kunststoffeinsatzes zu erhöhen: die

Gewichtsreduktion von Verpackungen und die Substitution von Kunststoffen durch nachhaltige Materialien.

Gewichtsreduktion von Verpackungen

Weniger Kunststoff für die gleiche Verpackung zu verwenden oder ganz auf Kunststoffverpackungen zu verzichten, ist ein einfacher und wirkungsvoller Weg, Kunststoffe effizienter zu nutzen. Zu den kostengünstigen Maßnahmen gehört der Verzicht auf Umverpackungen, überflüssigen Luftraum, unnötige Folien und Kunststofffenster. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist, dass schnell Wirkung erzielt wird und der Großteil des Verbesserungspotenzials bereits vor 2030 ausgeschöpft werden kann. Im Einzelhandel haben sich viele bereits verpflichtet, den Einsatz von (neu in Verkehr gebrachten) Kunststoffen zu verringern, und prüfen aktiv alternative Verpackungsoptionen. Durch gemeinsame Standards für überflüssige Kunststoffe könnte dieser Fortschritt noch beschleunigt werden. Insgesamt könnte durch Gewichtsreduktion von Verpackungen der Bedarf an Kunststoffen in Verpackungen um acht Prozent gesenkt werden, was bis 2045 zu einer Verringerung der kumulierten Treibhausgasemissionen um etwa zwei Prozent führen würde.

Substitution von Kunststoffen durch nachhaltigere Materialien

Die Substitution von Kunststoffverpackungen kann ein wichtiger Hebel sein, um das Problem der Kunststoffverpackungen in den Griff zu bekommen – sofern dies auch hinsichtlich der technischen Machbarkeit, der Leistung, der Auswirkungen auf das Klima, der Erschwinglichkeit und der Zweckdienlichkeit sinnvoll ist. In der Praxis bedeutet dies, dass die Substitution durch Glas und Metall aufgrund der dann höheren Gesamtemissionen in der Regel nicht empfohlen wird (Systemiq, 2023). Es kann jedoch sinnvoll sein, kompostierbare Materialien zu verwenden, um Kunststoffe zu ersetzen, die häufig in organischen Abfallströmen landen, wie Teebeutel und Fruchtaufkleber. Im Bereich der kompostierbaren Kunststoffe gibt es viele Innovationen, sowohl bei der

Entwicklung natürlicher Polyester als auch bei neuen biobasierten Materialien wie Alginaten und Bananenblättern. Zu den Nachteilen gehören höhere Kosten als bei konventionellen Kunststoffen, eine eingeschränkte funktionelle Leistung aufgrund der Kompostierbarkeit und die potenziellen Risiken einer Beeinträchtigung des Kunststoffrecyclings (Systemiq, 2022).

Auch Papier und beschichtetes Papier können Kunststoffe sinnvoll ersetzen. Auch hier gibt es viele Innovationen, die die Funktionalität verbessern und zu einem besseren Kosten-Gewicht-Verhältnis führen können. Die Substitution durch Papier und beschichtetes Papier erhöht die Recyclingfähigkeit von Verpackungen, da für das Papierrecycling geringere Homogenitätserfordernisse gelten als für Kunststoffe. Die Recyclingraten in Deutschland liegen bei 77 Prozent, allerdings werden die Fasern nach vier bis sechs Zyklen zu kurz für das Papier-zu-Papier-Recycling (WWF und Systemiq, 2021). Verpackungen, bei denen eine Substitution durch (beschichtetes) Papier sinnvoll wäre, sind schwer recycelbare Verpackungen oder solche, bei denen Wiederverwendungs- und Lightweighting-Modelle nicht skaliert oder angewendet werden können. Beispiele hierfür sind Frucht- bzw. Obstverpackungen, Blisterverpackungen oder mehrschichtige Folienverpackungen für trockene Lebensmittel.

2.6 Sektorübergreifend

Längere Nutzungsdauer von Produkten

Die Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten oder Produktbestandteilen wirkt sich auf den Bedarf an neuen Materialien oder Produkten aus und trägt somit zur Verringerung der Emissionen bei.

Um die Nutzungsdauer von Gebäuden (und Gebäudekomponenten) zu verlängern, können zwei Maßnahmen in Betracht gezogen werden. Zum einen können Teile des Gebäudes direkt (oder nach einer Teilsanierung) wiederverwendet werden; zum anderen kann

die Lebensdauer eines gesamten Gebäudes verlängert werden.

Durch eine Wiederverwendung von Stahlteilen aus Gebäuden können Stahlträger länger genutzt werden. Dadurch könnten in 2045 zwei Prozent der THG-Emissionen des BAU-Szenarios eingespart werden, was zwischen 2020 und 2045 einer Reduktion der kumulierten THG-Emissionen von einem Prozent entspricht. Beim Abriss eines Gebäudes kann die Stahlkonstruktion intakt bleiben und als Rahmen für ein neues Gebäude am gleichen Standort verwendet werden. Diese Praxis nimmt stark zu, zum Beispiel bei der Wiederverwendung alter Bürogebäude. In Düsseldorf wurden zum Beispiel 340 Wohnungen im ehemaligen Bürogebäude Thyssen-Trade-Center errichtet, das seit dem Umzug des Stahlherstellers ThyssenKrupp im Jahr 2009 leer stand (Stadtplanungsamt Düsseldorf, 2014). Ähnliche Projekte werden überall in Deutschland realisiert, wo der Leerstand von Bürogebäuden zunimmt und Wohnraum knapp ist (Müller, 2017). Alternativ könnte durch eine Standardisierung von Form und Größe der Stahlträger ein effizienter Sekundärmarkt für Stahlträger entstehen. Vor der Wiederverwendung müssen die Stahlelemente einer Qualitätskontrolle unterzogen und erneut für den Bau zugelassen werden.

Die Wiederverwendung von Beton und Kunststoffen ist anspruchsvoller als die Wiederverwendung von Stahl, da die Elemente oft nicht standardisiert oder modular sind. Eine modulare, vorgefertigte und standardisierte Bauweise sollte daher als Mittel zur Erhöhung des Wiederverwendungspotenzials in der Zukunft verstärkt werden. Ein begrenztes Potenzial besteht zudem durch die Wiederverwendung von Betonplatten und der Beibehaltung von Teilen der Betonstruktur beim Abriss als Fundament oder Rahmen für neue Gebäude. Durch diese Wiederverwendungsstrategien könnten so in 2045 THG-Emissionen in Höhe von vier Prozent für Zement und Beton eingespart werden, was einer Reduktion der kumulierten THG-Emissionen

zwischen 2020 und 2045 von zwei Prozent entspricht.

Digitale Materialpässe können dabei helfen, die auf Lager befindlichen Stahl-, Kunststoff- und Betonelemente und deren Verfügbarkeit für die Wiederverwendung zu erfassen.

Da es sich bei Stahl, Beton und sogar Kunststoffen um sehr langlebige Materialien handelt, überdauern sie oft die tatsächliche Lebensdauer eines Gebäudes. Das bedeutet, dass die Lebensdauer eines Gebäudes durch die Renovierung oder Sanierung nicht dauerhafter Komponenten des Gebäudes verlängert werden kann. Auf diese Weise werden der Abriss und die Notwendigkeit eines Neubaus vermieden.

Automobilindustrie

Fahrzeuge werden in Deutschland in der Regel lange vor ihrem technischen Lebensende ausrangiert beziehungsweise zur Wiederverwendung in andere Länder exportiert. Rund 80 Prozent der Gebrauchtwagen verlassen Deutschland vor ihrem technischen Lebensende, 88 Prozent davon, um in einem weiteren EU-Mitgliedstaat weitergenutzt zu werden (Umweltbundesamt, 2023a). Daher materialisieren sich die Effekte einer längeren Nutzung von Fahrzeugen meist außerhalb der in dieser Studie berücksichtigten Bilanzgrenze. Die Wiederverwendung von Bauteilen in Neuwagen ist ebenfalls schwierig, insbesondere aufgrund bestehender Sicherheitsstandards und weil sich Fahrzeugdesigns regelmäßig ändern, sodass Bauteile von Altfahrzeugen nicht mit denen von Neuwagen übereinstimmen. Daher wird die Wiederverwendung von Fahrzeugteilen in diesem Bericht nicht modelliert. Einige Automobilhersteller planen jedoch, bis Anfang der 2030er-Jahre vollständig modulare Autos zu entwickeln, die sich mit wiederverwendbaren Komponenten einfach demontieren lassen (Campbell, 2022).

Verpackungen

Bei mehr als einem Drittel aller Kunststoffverpackungen ist es technisch möglich und ökologisch

vorteilhaft, die Lebensdauer durch Geschäftsmodelle für die Wiederverwendung zu verlängern. Pfandbasierte Wiederverwendungssysteme wie das Mehrwegsystem gibt es bereits seit Jahrzehnten, und sie könnten auf einen größeren Bereich von Kunststoffverpackungen ausgeweitet werden. Es gibt verschiedene Arten von *Business-to-Consumer*-Wiederverwendungsmodellen für Verpackungen¹⁷ – von kundeneigenen Modellen bis hin zu neuen Liefermodellen und Rücknahmesystemen, bei denen die Verpackungen in der erweiterten Verantwortung von Unternehmen sind. Lösungen für die Wiederauffüllung zu Hause sind kostengünstig und werden bereits in großem Umfang genutzt, während Modelle für die Rückgabe oder Wiederbefüllung unterwegs Anpassungen in der Infrastruktur und den Konsumgewohnheiten erfordern. Für Wiederverwendungsmodelle eignen sich insbesondere Getränkeflaschen, Transportverpackungen und Verpackungen für Haushaltspflegeprodukte und Lebensmittel.

Durch Strategien für eine längere Nutzungsdauer ließen sich in 2045 elf Prozent der THG-Emissionen durch Kunststoff in den betrachteten Sektoren einsparen. Zwischen 2020 und 2045 können Wiederverwendungsstrategien eine Reduktion der kumulierten THG-Emissionen von sieben Prozent bewirken.

17 Die Berichte der Ellen MacArthur Foundation *Upstream Innovation Guide* (2020) und *Reuse: Rethinking packaging* (2019) bieten einen umfassenden Überblick über führende Fallstudien.

3 Politische Rahmenbedingungen für eine zirkuläre Wirtschaft

3.1 Indikatoren als Wegweiser für die Transformation

3.1.1 Was ist eine Kreislaufwirtschaft – und was sollte ihr Ziel sein?

Jede Strategie für Kreislaufwirtschaft braucht eine Definition des Begriffs „Kreislaufwirtschaft“. Der derzeit fehlende Konsens über eine einheitliche Definition der Kreislaufwirtschaft wird oft als Hindernis für ihre breite Einführung und Implementierung angesehen. Grundsätzlich lässt sich Kreislaufwirtschaft als ein System verstehen, in dem Grundbedürfnisse des täglichen Lebens (wie zum Beispiel Wohnen, Mobilität und Ernährung) unter Entkopplung des Ressourcenverbrauchs gedeckt werden. In einer Kreislaufwirtschaft ergeben sich systemische Effizienzen nicht nur durch Veränderungen auf der Materialebene (bspw. Einsatz von Rezyklaten), sondern auch durch grundlegende Veränderungen in Konsum- und Dienstleistungsmodellen. In dieser Studie betrachten wir lediglich die Material- beziehungsweise Produktebene und definieren in diesem Rahmen die Kreislaufwirtschaft als ein *Produktions- und Verbrauchsmodell, das den Rohstoffverbrauch von Produkten entlang des gesamten Lebenszyklus reduziert, den Lebenszyklus von Produkten nach Möglichkeit verlängert und darauf abzielt, Materialien am Ende ihres Lebenszyklus wieder in den Produktionsprozess zu integrieren.*

Was sollte das Ziel einer solchen Kreislaufwirtschaft sein? In der Vergangenheit wurde die Kreislaufwirtschaft vor allem als Strategie zur Abfallvermeidung betrachtet, wobei der Schwerpunkt auf dem Recycling am Ende des Lebenszyklus lag. Neuerdings interpretieren politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger die Kreislaufwirtschaft jedoch zunehmend neu, hin zu einer breiteren Strategie für den Klimaschutz, die gleichzeitig auch

die Resilienz von Lieferketten erhöht und auf langfristige Wettbewerbsfähigkeit einspeisen soll. Mit ihrem neuen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft hat die EU-Kommission den Übergang zu einer vollständigen Kreislaufwirtschaft in den Mittelpunkt ihrer Strategie zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2050 im Rahmen des europäischen Green Deal gestellt (Europäische Kommission, 2020a). Die Bundesregierung hat sich in ihrem Koalitionsvertrag verpflichtet, „die Kreislaufwirtschaft als wirksamen Klima- und Ressourcenschutz zu stärken“ (SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP, 2021). Während der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft über ihren Beitrag zur Klimastabilität hinaus mehrere Vorteile hat (Schutz der Biodiversität und anderer planetarer Grenzen sowie positive sozioökonomische Effekte), konzentriert sich diese Studie auf den Beitrag einer Kreislaufwirtschaftsstrategie zum Klimaschutz und bewertet die betrachteten Kreislaufwirtschaftshebel im Hinblick auf ihren Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Die Erarbeitung der deutschen Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) sollte genutzt werden, um einen ehrgeizigen Pfad für den Aufbau einer zirkulären Wirtschaft zu entwerfen. Dies sollte dazu beitragen, dass erforderliche Emissionsreduktionen schneller erreicht und eine resiliente Wertschöpfung mit geringerem Verbrauch von (Primär-)Rohstoffen entlang der Wertschöpfungsketten energieintensiver Materialien ermöglicht wird.

3.1.2 Theory of Change: das Wirkungsmodell

Die Kreislaufwirtschaft kann durch sogenannte „R-Strategien“ operationalisiert werden, durch die sich Produktion und Verbrauch in Richtung einer Kreislaufwirtschaft bewegen. Die Strategien sollten in Übereinstimmung mit der in der EU-Abfallrahmenrichtlinie festgelegten Abfallhierarchie verfolgt werden, in der Strategien für die Vermeidung von

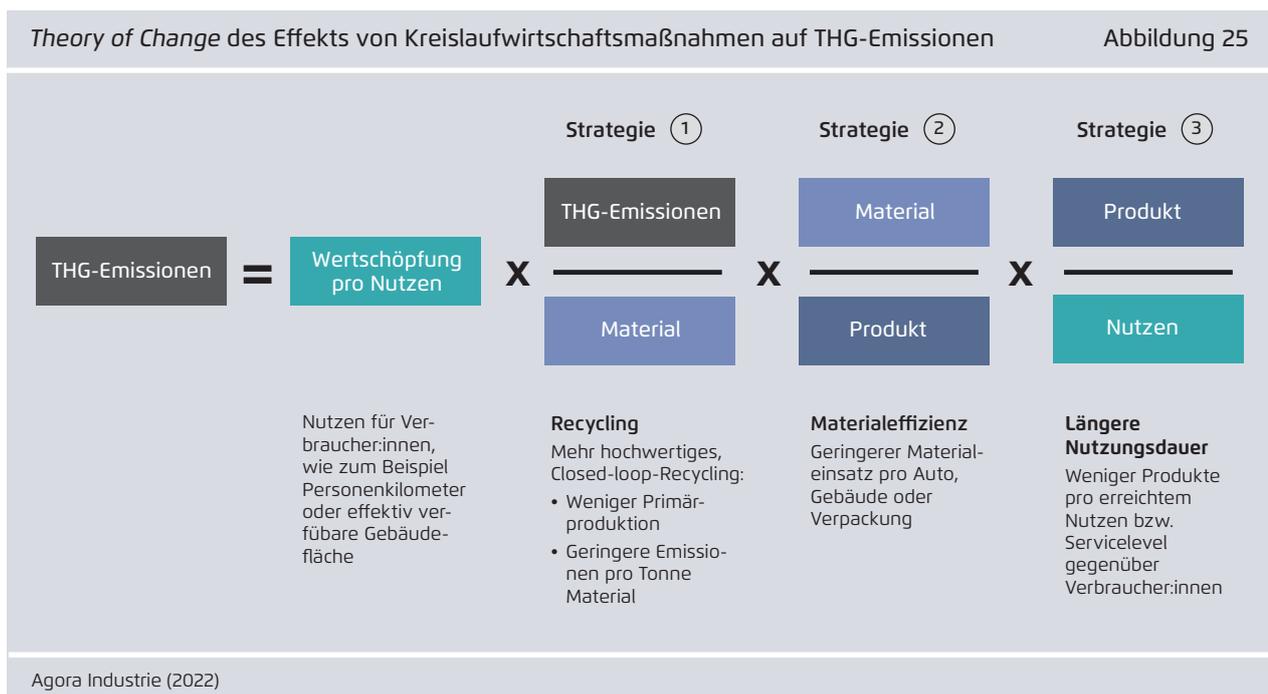
Materialverschwendung, die Wiederverwendung von Materialien, das Recycling und die Verwertung von Materialien in entsprechender Reihenfolge priorisiert werden (Europäische Kommission, 2008). Der Schwerpunkt dieser Studie liegt auf den Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen Materialeffizienz, der längeren Nutzung von Produkten und dem erhöhten Recycling – Strategien, die im Einfluss der industriellen Akteure liegen und keine Verhaltensänderung auf Seiten der Verbraucher erfordern.¹⁸ Abbildung 25 veranschaulicht diese „Theory of Change“, die den Zusammenhang zwischen diesen Strategien und der Verringerung der Treibhausgasemissionen aus der Primärproduktion erklärt. Es ist zu beachten, dass dies keine Aussage über das regionale Auftreten der Emissionsreduktion impliziert, da beispielsweise ein effizienterer Materialeinsatz auch mit geringeren Importen einhergehen kann und somit zu Emissionsminderungen im Ausland statt im Inland führt.

18 Eine umfassende Kreislaufwirtschaftsstrategie würde jedoch auch verhaltensbasierte Maßnahmen beinhalten, diese sollten in der NKWS berücksichtigt werden.

3.1.3 Einrichtung eines Monitoring-Systems

Da nur das gesteuert werden kann, was auch gemessen wird, muss der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft von einem geeigneten Monitoring-System begleitet werden, das Schlüsselindikatoren der Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft erfasst. Ziel sollte eine genaue Bestandsaufnahme der Stoffströme und Emissionen entlang der Wertschöpfungsketten der wichtigsten Materialien und deren Entwicklung im Laufe der Zeit sein. Eine Kenntnis dieser Stoffströme und der jeweiligen Effizienzpotenziale von R-Strategien ist entscheidend für eine sinnvolle Regulierung und Zielsetzung und um zu vermeiden, dass der regulatorische Rahmen nicht zweckmäßig ist oder schlimmstenfalls falsche Anreize setzt.

Die Notwendigkeit einer besseren Prüfung und Datenerhebung im Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft hat zu einer Initiative des italienischen Instituts für Umweltschutz und der EU-Umweltagentur geführt, woraus die *Bellagio*-Erklärung hervorgegangen ist. Die Erklärung legt Grundsätze für das Monitoring der Transformation zu einer



Kreislaufwirtschaft fest und soll die nationalen und europäischen Bemühungen bei der Entwicklung von Monitoring-Systemen anleiten. Die *Bellagio*-Erklärung wurde von der Bundesregierung bereits im Dezember 2020 formell unterzeichnet. Die Grundsätze legen wesentliche Elemente eines Monitoring-Systems dar, um „das volle Ausmaß der Veränderungen von Material- und Abfallströmen, Produkten über ihren Lebenszyklus, Geschäftsmodellen und Verbraucherverhalten, einschließlich der wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Dimensionen dieser Veränderungen, ganzheitlich zu erfassen“ (European Environmental Agency, 2022).

Da der Schwerpunkt dieser Studie auf den THG-Emissionen der Materialströme Stahl, Zement und Kunststoffe in den nachgelagerten Sektoren Gebäude, Fahrzeuge und Verpackungen liegt, konzentriert sich dieses Kapitel auf die wichtigsten Aspekte innerhalb dieser Sektoren. Als Teil der NKWS sollte die Bundesregierung jedoch ein Monitoringsystem einrichten, welches die Fortschritte der Kreislaufwirtschaft für eine größere Anzahl von Materialien und Strategien erfasst und deren Auswirkungen auf Zielgrößen jenseits der Emissionsreduktion evaluiert.

3.1.4 Status quo des Kreislaufwirtschaft-Monitorings

Auf europäischer Ebene wurde 2018 das erste Monitoring-System für eine Kreislaufwirtschaft lanciert, das auf dem *Resource Efficiency Scoreboard* und dem *Raw Materials Scoreboard* aufbaut. Das Monitoring-System umfasst zehn Indikatoren, die in Gruppen zu 1) Produktion und Konsum, 2) Abfallwirtschaft, 3) Sekundärrohstoffe und 4) Wettbewerbsfähigkeit und Innovation gruppiert sind. Dabei spiegelt es die Schwerpunkte des Aktionsplan Kreislaufwirtschaft (CEAP) wider (Europäische Kommission, 2018). Im Mai 2023 wurde dieses Monitoring-Rahmenwerk um die Dimensionen globale Nachhaltigkeit und Resilienz erweitert sowie um Indikatoren zum Ressourcenfußabdruck, zur Ressourcenproduktivität, zum Fußabdruck des Konsums, der THG-Emissionen

der Produktion und zur materiellen Abhängigkeit erweitert.

In Deutschland gibt es bislang kein kohärentes Monitoring-System für die Kreislaufwirtschaft. Aktuelle Monitoring-Aktivitäten finden vor allem im Rahmen des Programms für Ressourceneffizienz (ProgRes) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS) statt. ProgRes zielt darauf ab, das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln, und überwacht Indikatoren wie die Gesamtrohstoffproduktivität, den Rohstoffverbrauch und neu entwickelte Indikatoren wie den Anteil der direkten Effekte der Verwertung (DERec) und den Anteil der direkten und indirekten Effekte der Verwertung (DIERec), die den Vermeidungseffekt der Ersetzung von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe erfassen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2020).

Im Rahmen der DNS werden die Fortschritte bei der Erreichung der *Sustainable Development Goals* (SDG) in halbjährlichen Indikatorenberichten erfasst, unter anderem durch Indikatoren wie die Gesamtrohstoffproduktivität (SDG 8), den Anteil von Waren mit staatlichem Umweltzeichen, dem Rohstoff- und CO₂-Fußabdruck des Konsums (SDG 12) und dem Anteil von Recyclingpapier in der öffentlichen Beschaffung (SDG 12). Die Bundesregierung strebt an, diese privaten Konsumfußabdrücke kontinuierlich zu reduzieren und gleichzeitig die Gesamtrohstoffproduktivität bis 2030 zu steigern – jedoch ohne klare Zielwerte zu formulieren (Statistisches Bundesamt, 2022).

Die Indikatoren, die im Rahmen von ProgRes und der DNS überwacht werden, decken bereits wichtige primäre Zielgrößen einer Kreislaufwirtschaft ab und sollten in jedes zukünftige Monitoring-System aufgenommen werden. So sind etwa die Rohstoffproduktivität und der Rohstoffverbrauch des Konsums wichtige Indikatoren, um ein Gesamtbild für Fortschritte bei der Ressourceneffizienz zu zeichnen.

Ebenso können Indikatoren wie DERec und DIERec Effekte von Bemühungen, den Kreislauf durch verbessertes Recycling von Materialien zu schließen – und die damit verbundenen Vorteile von Energie- und Primärrohstoffeinsparungen –, direkt abbilden. Für sich genommen und vor dem Hintergrund, dass für die verschiedenen Stoffströme zum Teil verschiedene Teile der Wertschöpfungskette betrachtet werden müssen, liefern diese Messgrößen jedoch keine ausreichend detaillierten Informationen, die es politischen Entscheidungsträgern ermöglichen würden, den Übergang wirksam zu steuern.

3.1.5 Bausteine eines Monitoring-Systems

Zur Operationalisierung zentraler Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen wie zum Beispiel Steigerung der Materialeffizienz, längere Nutzung von Produkten und erhöhtes Recycling müssen im Monitoring-System Indikatoren enthalten sein, die den Fortschritt innerhalb dieser Maßnahmen erfassen.

Dabei bedarf es einerseits Indikatoren, die das Volumen und die Zusammensetzung von Materialströmen erfassen und somit die Effekte von politischen Instrumenten, Investitionen und Geschäftsmodellen abbilden. Andererseits bedarf es sogenannter „Enabler“-Indikatoren – also Wegbereiter- oder Voraussetzungsindikatoren. Diese bilden ab, inwieweit die nötigen Grundsteine und Rahmenbedingungen gelegt sind, die für die Transformation nötig sind. Beispielweise sollten sie Fortschritte bei den Rahmenbedingungen wie die Beseitigung rechtlicher Hindernisse oder die Zahl der Patente für innovative Kreislauftechnologien erfassen. Auch wenn Fortschritte auf der Stoffstrom-Ebene erst nach einigen Jahren sichtbar werden, sind diese „Enabler“ wichtige Indikatoren für den Fortschritt im Übergangsprozess und wichtig für die Steuerung und Bewertung von politischen Maßnahmen.

Die Studie „Making the Circular Economy Count“ schlägt eine Liste von Ergebnisindikatoren und „Enabler“-Indikatoren für wichtige R-Strategien und deren ökologische und sozioökonomische Auswir-

kungen für den deutschen Kontext vor (Acatech und Systemiq, 2021). Für viele dieser Indikatoren gibt es noch keine Daten und Berechnungsmethoden. Daher sollte die NKWS einen größeren Prozess initiieren, der nicht nur die vorhandenen Messgrößen in einem kohärenten Rahmen zusammenfasst, sondern auch erforderliche neue Indikatoren entwickelt. Dabei ist auch sicherzustellen, dass die entsprechenden Daten und die für die Berichterstattung erforderliche Infrastruktur und Regulierung vorhanden sind.

Erfassung der sektoralen Fortschritte

Die Analyse in den vorangegangenen Kapiteln hat gezeigt, dass sich die untersuchten Maßnahmen für Stahl, Zement und Kunststoffe in ihrer jeweiligen Bedeutung unterscheiden: Während in einem Sektor das größte Potenzial im *End-of-Life*-Recycling liegt (wie bei Kunststoffen), können in anderen Sektoren (Stahl, Zement) Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz das größte Potenzial aufweisen. Aggregierte Indikatoren wie DERec/DIERec, die die Einsparungen durch die Verwendung von Sekundärmaterial auf gesamtwirtschaftlicher Ebene erfassen, können beispielsweise nur den Fortschritt beim Recycling erfassen – was für den Kunststoffbereich sinnvoll ist, während das Recycling-Potenzial bei Stahl weitestgehend gesättigt und bei Zement und Beton zumindest aus Klimaperspektive nachrangig ist. Andere aggregierte Indikatoren wie zum Beispiel die Gesamtrohstoffproduktivität sind aufschlussreich, liefern aber keine detaillierteren Informationen, die den politischen Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern helfen könnten, den Effekt konkreter Maßnahmen auf Sektorebene zu evaluieren. Aufbauend auf der Analyse in den vorangegangenen Kapiteln werden im Folgenden die Schlüsselindikatoren für die Materialströme von Stahl, Zement und Kunststoffen beleuchtet.

3.1.6 Stahl

Gebäude

Um Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft in Gebäuden zu erfassen, sind die eingebetteten Emissionen

(*embodied carbon*) pro m³ neuer Gebäude ein zentraler Indikator, der in Deutschland erhoben werden sollte. Eingebettete Emissionen sind die produktionsbezogenen Emissionen eines Produkts. Dies würde einen Anreiz setzen zur effizienteren Nutzung energieintensiver Materialien durch effizientere, schlankere Gebäudedesigns oder den Einsatz von Sekundärmodulen. Darüber hinaus könnten über diesen Indikator Anreize zur dekarbonisierten Primärproduktion von Stahl sowie, wo möglich, zur Materialsubstitution durch Holz oder andere Baustoffe gesetzt werden. Dadurch schafft ein solcher technologieneutraler Monitoring-Ansatz Raum für Innovationen.

Die Einführung digitaler Produktpässe für Gebäude wäre dabei ein zentraler Baustein, um politischen Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern Einblicke in die wichtigsten Materialströme zu gewähren. Gleichzeitig könnten sie Urban-Mining-Aktivitäten zur Wiederverwendung und zum Recycling von Komponenten am Ende der Lebensdauer eines Gebäudes ermöglichen. Ein solcher Produktpass sollte zentrale Stoffstrom-Informationen wie etwa die Verwendung von Sekundärrohstoffen oder wiederverwendeten Bauteilen enthalten.¹⁹ Diese Informationen sollten dann für das bundesweite Monitoring-System aggregiert werden.

Automobilindustrie

Im Automobilsektor sind die Produktionsprozesse in der Regel bereits weitgehend optimiert. Trotzdem besteht zusätzliches Potenzial bei der Verringerung des Fabrikationsschrotts und der Leichtbauweise von Fahrzeugen sowie bei der Steigerung des Recyclings durch verbesserte Konstruktion, Sammlung und Trennung. Daten über die Verwertungsmengen von Altfahrzeugen werden in Deutschland bereits im Rahmen der Altfahrzeugverordnung gemäß dem Umweltstatistikgesetz erhoben. Diese Daten sollten in das Monitoring-System aufgenommen werden, um die Entwicklung und Verfügbarkeit von Sekundärstahl aus Altfahrzeugen zu erfassen.

Darüber hinaus ist die Verunreinigung von gebrauchten Stahlprodukten ein wesentlicher Engpass für eine noch stärkere stoffliche Rückführung von Stahl. In den kommenden Jahren werden Innovationen zur Entfernung von Verunreinigungen oder für eine bessere Sortierung von Legierungen entscheidend sein, um den Kreislauf für Stahl zu schließen und die Wiederverwendung bei gleicher Qualitätsanforderung zu ermöglichen. Daher sollten im Rahmen des Monitoring-Systems „Enabler“-Indikatoren erfasst werden, die auf die Überwindung dieser Engpässe einzahlen. Hierfür eignet sich eine Erfassung der Forschungs- und Entwicklungs-Ausgaben und Patente zur Überwindung von beispielsweise Kupfer-Kontaminierung oder der Verbreitung von Geschäftsmodellen, die der Kontaminierung entgegenwirken.

3.1.7 Zement und Beton

Gebäude

Bei Zement liegt das größte THG-Minderungspotenzial in Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz. Dies beginnt bei der stofflich effizienten Nutzung von Klinker bei der Zementherstellung und der stofflich effizienten Nutzung von Zement beim Mischen von Beton. Darüber hinaus liegt ein erhebliches Potenzial im effizienteren baulichen Einsatz von Beton in Gebäuden oder in der Substitution von Beton durch andere, weniger energieintensive Materialien.

Die Erfassung der eingebetteten Emissionen pro m³ in neuen Gebäuden, wie oben vorgeschlagen, schafft Anreize für eine effiziente Kombination der verschiedenen Effizienzstrategien. Der bereits erwähnte digitale Produktpass sollte außerdem Angaben über das im Gebäude verwendete Verhältnis von Klinker zu Zement und von Zement zu Beton sowie die Nutzung wiederverwendeter Komponenten beim Bau eines Gebäudes umfassen.

Solche Daten sollten im Rahmen eines Monitoring-Systems aggregiert werden. Insbesondere im Gebäudesektor haben Interviews mit Stakeholdern

¹⁹ Für Anwendungsfälle siehe Wuppertal Institut (2022).

darauf hingedeutet, dass der Status quo der Bau- regulierung das Haupthemmnis für eine größere Materialeffizienz und die Wiederverwendung von Baukomponenten darstellt. Wiederverwendung von modularen Komponenten, Sekundärmaterialien oder schlankem Baudesign ist meist nicht oder nur eingeschränkt möglich. Im Rahmen der NKWS sollten solche Hindernisse auf sektoraler Ebene durch gezielte Stakeholder-Dialoge erfasst und die Fortschritte bei der Überarbeitung der Vorschriften, wo möglich, im Rahmen des Monitoring-Systems überprüft und festgehalten werden. Darüber hinaus könnte auf gesamtwirtschaftlicher Ebene die Verbreitung von Geschäftsmodellen für schlankes Gebäudedesign, Wiederverwendung und Recycling von Baumaterialien erfasst und nachverfolgt werden.

3.1.8 Kunststoffe

Sektorübergreifend

Bei Kunststoffen liegt das größte Potenzial der Kreislaufwirtschaft im sektorübergreifenden Recycling am Ende des Lebenszyklus. Ermöglicht wird dieses hohe Potenzial durch verbessertes Produktdesign, Sammlung und Trennung sowie durch mechanisches und chemisches Recycling. In Deutschland stammen nur 13 Prozent des Kohlenstoffs in der Kunststoffproduktion aus recycelten Kunststoffen.

Um die Fortschritte beim Recycling zu überwachen, müssen verschiedene Schlüsselkennzahlen erfasst werden, damit ein vollständiges Bild des Status quo gezeichnet werden kann. Zuallererst bedarf es jedoch einer genauen Erfassung der Kunststoffabfallmengen. Die Studie „Europe's Missing Plastics“ hat gezeigt, dass das Volumen der Kunststoffabfälle stark unterschätzt wird, was auf einen erheblichen Anteil von Kunststoffen hindeutet, der deponiert oder zur Erzeugung von Wärme und Strom verbrannt wird (Material Economics, 2021). Auf EU-Ebene ist die Menge an Kunststoffabfall etwa 50 Prozent höher als angenommen, für den deutschen Kontext muss dieser „unerfasste“ Abfall noch quantifiziert werden. Ohne eine genaue Schätzung des tatsächlichen Kunststoff-

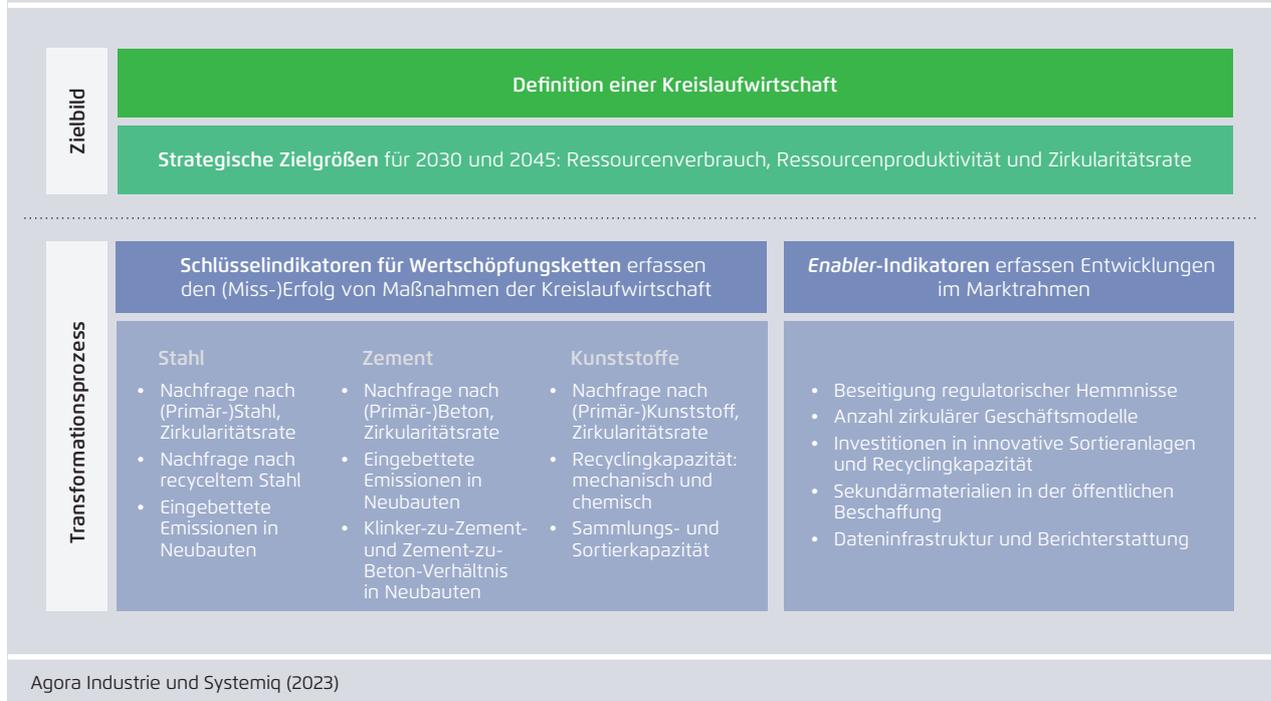
volumens sind Indikatoren zum Recycling zwangsläufig ungenau und bieten keine verlässliche Basis für politische Maßnahmen.

Zusätzlich zur Erstellung einer Datenbasis müssen verschiedene Ebenen adressiert werden, um den Fortschritt im Recycling zu erfassen. Derzeit wird das Recycling in erster Linie über Recyclingquoten gemessen, die (je nach Berechnungsmethode) lediglich den Input bzw. den Output von Verwertungsanlagen messen. Die Recyclingquote ist dabei ein wichtiger Indikator, der in das Monitoring-System aufgenommen werden sollte, damit die Qualität der Sammel- und Recyclinginfrastruktur abgebildet werden kann. Ihre Aussagekraft hat allerdings Grenzen: Beispielsweise trifft die Recyclingquote keine Aussage über die Menge an Sekundärrohstoffen, die wieder in den Produktionsprozess einfließt und dadurch Primärrohstoffe ersetzt (Umweltbundesamt, 2019). Daher muss das Monitoring-System um einen weiteren Indikator ergänzt werden, der die Material- bzw. Rohstoffmenge misst, die in den Produktionsprozess zurückgeführt wird und dort den Einsatz von Primärrohstoffen reduziert. Das Umweltbundesamt schlägt hierfür eine Substitutionsquote vor, die das Verhältnis zwischen eingesetzten Sekundärrohstoffen zum gesamten Materialeinsatz abbildet. Auf europäischer Ebene wurde hier der Indikator „Verwendungsrate von recyceltem Altmaterial“ vorgeschlagen, der in etwa der Substitutionsquote entspricht. Die im Rahmen von ProgRes entwickelten Indikatoren wie DERec/DIERec erfassen den Effekt des Einsatzes von Sekundärrohstoffen als Ersatz von Primärrohstoffen und korrelieren somit direkt mit der Substitutionsquote.

Ein Schlüsselfaktor für den Erfolg der Kreislaufwirtschaft ist, gerade im Kunststoffbereich, die Skalierung innovativer Sortierverfahren und des Recyclings. Innovative Sortierverfahren sorgen dafür, dass homogenere Stoffströme für das mechanische Recycling zur Verfügung stehen, um Produktkreisläufe zu schließen. Der Ausbau des chemischen Recyclings hingegen wird entscheidend für das

Zielsetzung und Monitoring – System einer Kreislaufwirtschaft für Grundstoffe

Abbildung 26



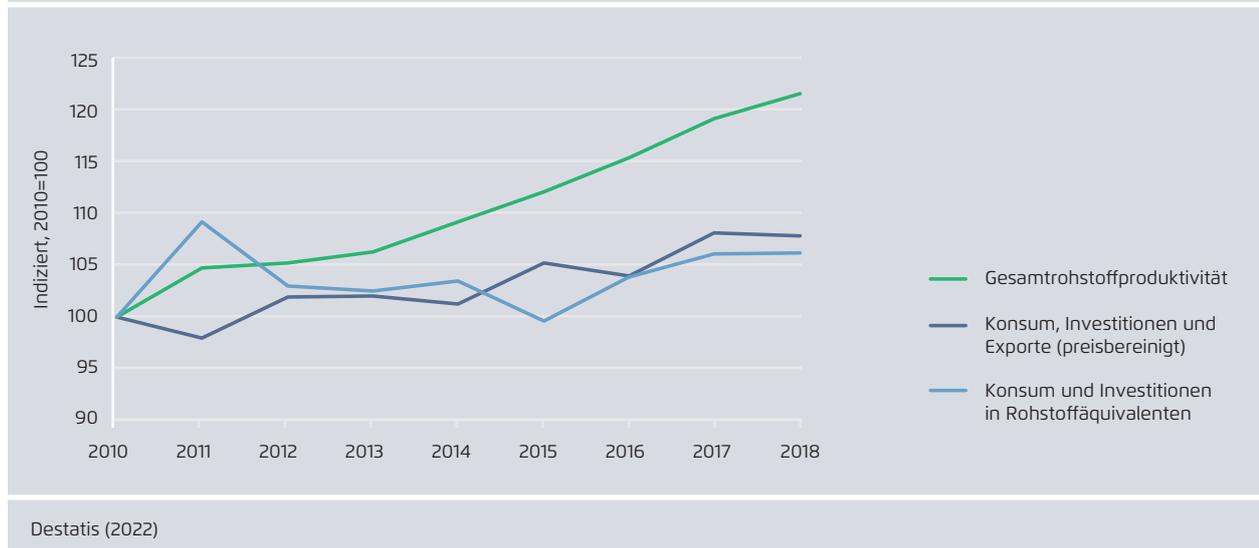
Recycling von Abfallströmen sein, die für das mechanische Recycling ungeeignet sind, da sie beispielsweise nicht ausreichend homogen sind. Im Rahmen der NKWS sollten in Deutschland sowohl die Kapazitäten für das mechanische und chemische Recycling im Inland als auch die Sortierkapazität erfasst werden. In einem ersten Schritt und als „Enabling“-Indikator sollten hierfür auch Forschung und Entwicklung-Ausgaben, Patente und Investitionen festgehalten werden. Die Skalierung der Recyclingkapazität allein führt allerdings nicht automatisch zu verstärktem Einsatz von Sekundärrohstoffen im Kunststoffbereich. Vielmehr muss diese Skalierung einhergehen mit einer Verbesserung der Marktbedingungen durch entsprechende Politikinstrumente. Vorschläge hierzu werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

3.2 Eine Frage der Governance: von Indikatoren zur Zielsetzung

Ein Monitoring-System ermöglicht den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft, indem es den politischen Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen, die den erforderlichen Rahmen schaffen wollen, wichtige Informationen liefert. Monitoring alleine reicht jedoch nicht, um die Transformation voranzutreiben, und bedarf einer kohärenten Vorstellung über das zu erreichende Zielbild. Außerdem führt es nicht automatisch zu einer Beschleunigung des transformativen Prozesses. Ähnlich wie bei der Steuerung von Klimaschutzmaßnahmen, wo Emissionen nicht nur gemessen, sondern auch konkrete Reduktionsziele formuliert werden, müssen auch für die Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft Ziele festgelegt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die angestrebten Ergebnisse im Voraus festgelegt werden und allgemein verständlich sind, wodurch die regulatorische Unsicherheit im Zusammenhang mit Investitionsentscheidungen, zum Beispiel in Bezug

Gesamtrohstoffproduktivität, BIP und Fußabdruck des Rohstoffverbrauchs in Deutschland

Abbildung 27



auf Recyclingkapazitäten oder Produktdesign, verringert wird.

Der Circular Economy Action Plan der EU sieht beispielsweise vor, dass die EU ihre Zirkularitätsrate (CMUR) zwischen 2020 und 2030 verdoppelt. Dieses Ziel kann über zwei Wege erreicht werden: einerseits durch eine Erhöhung des *Closed-loop*-Recyclings, andererseits über Materialeffizienz – also einen Rückgang im Materialverbrauch bei gleichbleibender Recyclingaktivität. Eine Erhöhung der CMUR würde zudem die strategische Autonomie stärken, da es die Fähigkeit erhöhen würde, die eigenen Materialbedarfe zu decken. Von der Erreichung dieser Ziele ist die EU allerdings noch weit entfernt: Zwischen 2010 und 2021 hat sich die CMUR von 10,8 Prozent auf 11,7 Prozent erhöht (Eurostat, 2022).

Erste Mitgliedstaaten der EU haben sich strengere Ziele für den Ressourcenverbrauch gesetzt: Im Rahmen ihres Programms für eine niederländische Kreislaufwirtschaft bis 2050 haben sich die Niederlande das Ziel gesetzt, bis 2030 50 Prozent weniger Primärressourcen (Mineralien, Metalle und fossile Brennstoffe) zu verbrauchen als 2016 (Ministry of Infrastructure and the Environment und Ministry of Economic Affairs, 2016). Die französische Regierung

wiederum strebt eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs im Verhältnis zum BIP um 30 Prozent bis 2030 im Vergleich zu 2010 an (Ministry for an Ecologic and Solidary Transition, 2018). In Österreich hat die Regierung ein absolutes Ziel für den inländischen Materialverbrauch bis 2030 in Höhe von 14 Tonnen pro Kopf und Jahr formuliert und strebt darüber hinaus eine Reduktion des Materialverbrauchs auf sieben Tonnen pro Kopf und Jahr bis 2050 an. Bis 2030 will sie außerdem die Ressourcenproduktivität um 50 Prozent erhöhen, die Zirkularitätsrate auf 18 Prozent steigern und eine Reduktion des Konsums privater Haushalte um zehn Prozent erreichen (Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022).

In Deutschland fehlen solche richtungsweisenden Ziele für die Kreislaufwirtschaft. Derzeit hat sich Deutschland im Rahmen der DNS das Ziel gesetzt, den Trend bei der Gesamtrohstoffproduktivität fortzusetzen und den Rohstoff- und CO₂-Fußabdruck des Verbrauchs bis 2030 weiter zu reduzieren (Bundesregierung, 2021). Der Mangel an konkreter Zielsetzung spiegelt sich in der Entwicklung dieser Indikatoren seit 2010 wider (siehe Abbildung 27). Trotz einiger Fortschritte bei der Entkopplung des Wirt-

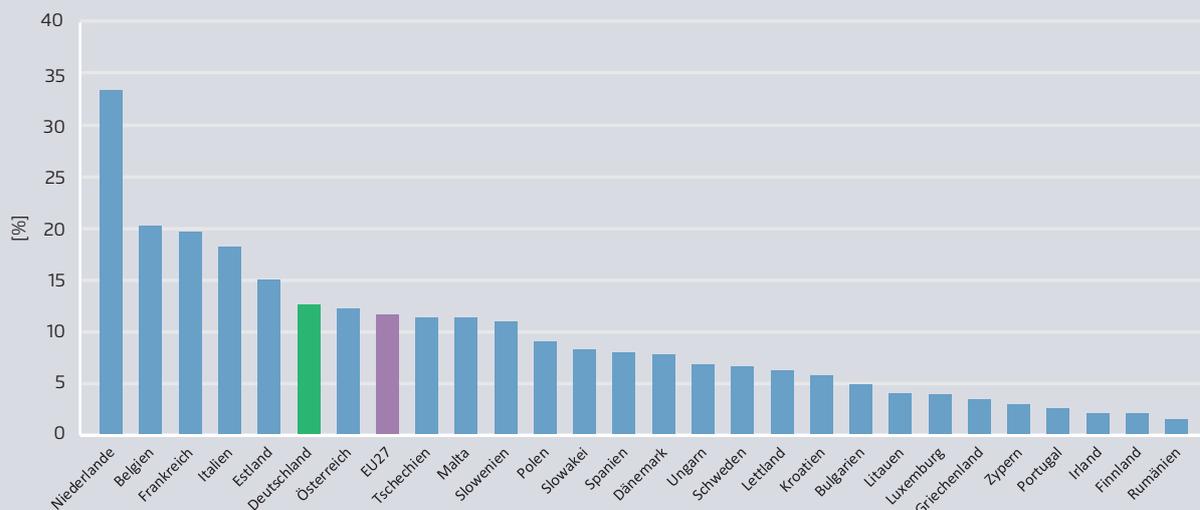
schaftswachstums vom Ressourcen-Fußabdruck wurden beim absoluten Ressourcenverbrauch kaum Fortschritte erzielt. Bezogen auf den Pro-Kopf-Verbrauch liegt der Rohstoffverbrauch in Deutschland mit derzeit etwa 16,4 t Rohstoffäquivalenten deutlich über dem weltweiten Durchschnitt von 12,0 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2020). In einer Kreislaufwirtschaft, die durch eine Reduktion des Rohstoffeinsatzes zur Erreichung der Klimaziele beitragen möchte, sollte ein Monitoring-System in klare politische Ziele eingebettet werden. Daraus ergibt sich, welche Strategien verfolgt werden sollen, was wiederum das anzustrebende Ambitionsniveau auf der Indikator-Ebene bestimmt.

Dabei sollte sich die Bundesregierung im Rahmen der NKWS drei übergeordneten Zielen verpflichten: Reduktion des Ressourcenverbrauchs, Steigerung der Ressourcenproduktivität und Steigerung der Zirkularitätsrate.

Die Formulierung eines klaren Reduktionsziels für den Ressourcenverbrauch ist nötig, um Richtung und Ambitionsniveau der Kreislaufwirtschaft festzulegen. Deutschland konsumiert derzeit Ressourcen, die seinen Anteil an den Ressourcen, die die Erde innerhalb eines Jahres zur Verfügung stellen kann, um das Dreifache übersteigen: in 2023 lag der Earth Overshoot Day, der anzeigt wann ein Land seinen Anteil an den regenerativen Ressourcen der Erde aufgebraucht hat, am 4. Mai. Über den in Abbildung 25 dargestellten Wirkungsmechanismus übersetzt sich dieser Ressourcenverbrauch in THG-Emissionen. Ein klares Reduktionsziel für den Ressourcenverbrauch parallel zu den Klimaschutzzielen für 2030 und 2045 reizt dabei sowohl Strategien der Materialeffizienz als auch Wiederverwendungs- und (*closed loop*) Recyclinglösungen an. Im Rahmen des Modell Deutschland Circular Economy wird beispielsweise ein Ziel für den Ressourcenverbrauch pro Kopf von 7 Tonnen pro Jahr in 2045 formuliert (Prakash S. et al., 2023).

Zirkularitätsrate (CMUR) europäischer Mitgliedsstaaten

Abbildung 28



Agora Industrie und Systemiq (2023) basierend auf Eurostat

Auch die Steigerung der Ressourcenproduktivität ist ein wichtiges Ziel, da sie direkt die Innovationskraft der deutschen Volkswirtschaft widerspiegelt und den Fortschritt in der Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch misst. Für sich allein genommen ist sie allerdings nicht ausreichend, um eine Reduktion des absoluten Ressourcenverbrauchs herbeizuführen, wenn eine Ausweitung der Produktion die Effizienzgewinne übersteigt.

Eine Kreislaufwirtschaft zeichnet sich zudem dadurch aus, dass nicht nur der Rohstoffbedarf reduziert wird, sondern der verbleibende Rohstoffbedarf weitgehend aus biogenen Rohstoffen oder qualitativ hochwertigen Sekundärrohstoffen bedient wird – also Stoffkreisläufe geschlossen werden. In Deutschland ist die CMUR seit 2010 kaum gestiegen: von 11,4 Prozent auf 12,9 Prozent in 2020. Dass es hier im innereuropäischen Vergleich noch Potenzial nach oben gibt, zeigt Abbildung 28. Eine weitgehende Deckung des Rohstoffbedarfs durch Sekundärrohstoffe würde eine grundlegende Änderung bestehender linearer Strukturen, Geschäftsmodelle und Materialflüsse bedeuten und entsprechende Investitionen erfordern. Um hierfür Planungs- und Investitionssicherheit zu geben, sollte die Bundesregierung im Rahmen der NKWS ein klares politisches Ziel zur Anhebung der Zirkularitätsrate definieren.²⁰

Außerdem sind politische Zielsetzungen nur so effektiv, wie ihre Umsetzung auf sektoraler Ebene gelingt. Für die relevanten Stoffströme müssen also jeweils die Potenziale und Strategien für die Reduktion des Ressourcenverbrauchs, die Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie die Steigerung der Zirkularitätsrate identifiziert werden. Einige der entsprechenden Indikatoren werden kurzfristig nur aggregiert zur Verfügung stehen. Das Zielbild des Monitoring-Systems sollte allerdings sein, relevante

Indikatoren auf Stoffstrom und gegebenenfalls sogar Produktgruppenbasis abzubilden. Daher sollte im Rahmen der NKWS eine Roadmap entwickelt werden, um die nötige Granularität zu erreichen.

Um diese Potenziale zu heben, wird ein Instrumentenmix benötigt, der sowohl die Skalierung und das Angebot von Kreislaufwirtschaftstechnologien anreizt als auch Märkte und Nachfrage schafft, die die Kreislaufwirtschaft als wettbewerbsfähiges und nachhaltiges Wirtschaftsmodell etablieren. Ein entsprechender Instrumentenmix wird im nächsten Abschnitt vorgeschlagen.

3.3 Politische Handlungsempfehlungen: Anreize schaffen für einen Markt für zirkuläre Technologien und Materialien

Politische Zielsetzungen und Indikatoren können den Rahmen für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaftsstrategie schaffen. Damit auch Investitionen in kreislauffähige Technologien und Sekundärmaterialien erfolgen, muss der regulatorische Rahmen die entsprechenden Anreize setzen.

Direkte regulatorische Hemmnisse sollten identifiziert und beseitigt werden. Darüber hinaus sind die richtigen Leitplanken und Anreize zu entwickeln, die sowohl Produzenten als auch Verbraucherinnen und Verbraucher unterstützen und die Nachfrage nach kreislauffähigen Technologien und Sekundärmaterialien steigern. Hierdurch können auch neue Geschäftsmodelle entstehen, die die gesamte Wertschöpfungskette in den Blick nehmen, stärker auf die Qualität und Leistung eines Produktes statt auf die bloße Menge abzielen oder die fortschrittliche Sortier- und Recyclingtechnologien für eine möglichst umfassende Rohstofferhaltung skalieren.

Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene sind die Vorteile einer Kreislaufwirtschaft längst erkannt, und es gibt verschiedene Rechts-

²⁰ Wie oben diskutiert, gibt es hier noch Entwicklungsbedarf hinsichtlich der genauen Definition des Indikators – sei es die Substitutionsquote, eine End-of-life Recyclingrate oder Indikatoren wie DERec/DIERec.

grundlagen, die sich mit der Kreislaufwirtschaft befassen. Wie bereits dargestellt haben die Bemühungen um eine Kreislaufwirtschaft auf nationaler Ebene jedoch nicht zu den gewünschten Ergebnissen geführt. Stattdessen überwiegt nach wie vor das lineare Verbrauchsmodell, das bisher nur wenig zur Rohstoffhaltung beiträgt, die Ökosysteme belastet und THG-Emissionen verursacht, die durch eine umfassendere Kreislaufwirtschaft vermieden werden könnten.

3.3.1 Europäischer Rahmen

Auf europäischer Ebene gibt es einen zunehmend umfassenderen Rechtsrahmen zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft hin zu einer verbesserten Rohstoffnutzung, Wiederverwendung und Verwertung. Die EU-Kommission hat in jüngster Zeit eine Reihe neuer Rechtsakte und Novellen auf den Weg gebracht, die in der Zukunft ambitioniert und praktikabel ausgestaltet werden sollten. Allerdings gibt es insbesondere im Bereich der energieintensiven Grundstoffe noch einige Lücken.

Im Jahr 2015 verabschiedete die EU ihren ersten **Aktionsplan** für die **Kreislaufwirtschaft**, um mehr Kreislaufwirtschaft anzureizen, die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum zu unterstützen und neue Arbeitsplätze zu schaffen. Ziel des Plans war es, „den größtmöglichen Wert und Nutzen aus allen Rohstoffen, Produkten und Abfällen zu ziehen, Energieeinsparungen zu fördern und Treibhausgasemissionen zu reduzieren“ (Europäische Kommission, 2019).

Der EU-Rechtsrahmen zur Abfallregulierung regelt die Reduzierung und Sammlung, das Recycling und die Behandlung von Abfällen. So sieht die **EU-Abfallrahmenrichtlinie** aus dem Jahr 2008 vor, dass bis 2035 mindestens 65 Prozent der Siedlungsabfälle in den Mitgliedstaaten wiederverwendet oder recycelt werden sollen. Ebenso gibt es eine Reihe anderer Zielvorgaben für bestimmte Materialströme. So hatte die Abfallrahmenrichtlinie außerdem das Ziel gesetzt, die Wiederverwendung, das Recycling und die

Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen zu erhöhen (mindestens 70 Prozent bis 2020).

Die **Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle** und die **Richtlinie über Einwegkunststoffe** von 2018 haben eine Reihe von sektoralen Zielen für das Recycling von Kunststoffen und die Verringerung von übermäßigen Kunststoffen festgelegt, insbesondere von Einwegkunststoffen, die für eine wachsende Zahl von Anwendungen verboten wurden. So müssen beispielsweise PET-Flaschen bis 2030 eine Recyclingquote von mindestens 30 Prozent erreichen. Die EU-Mitgliedstaaten müssen Recyclingziele für Kunststoffe und andere Formen von Materialabfällen erreichen. Für den Fahrzeugbereich wird derzeit die **Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG** überarbeitet, um die Abfälle aus Altfahrzeugen und ihren Bauteilen zu reduzieren und die Kreislaufwirtschaft zu verbessern.

Im Rahmen des EU Green Deal hat die Europäische Kommission im März 2020 einen neuen **Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (CEAP 2.0)** verabschiedet (Europäische Kommission, 2020a). Er zielt darauf ab, einen kohärenten Regulierungsrahmen für Produkte zu schaffen, um vor allem deren Langlebigkeit und Reparierbarkeit zu ermöglichen, Abfälle zu reduzieren und Anreize für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft zu bieten. Voraussetzungen für das Recycling von Rohstoffen sollen ermöglicht und ein gut funktionierender Binnenmarkt für hochwertige Sekundärrohstoffe geschaffen werden. Zu diesem Zweck wurden alte Richtlinien überarbeitet sowie eine Reihe von Initiativen eingeleitet. Im Fokus stehen zu Beginn Elektronik und IT, Batterien und Fahrzeuge, Verpackungen, Textilien, Bauwirtschaft, Lebensmittel und Dünger.

Einer der zentralen Rechtsakte ist die Novelle der **Ökodesign-Verordnung** (Europäische Kommission, 2022c). Sie zielt darauf ab, die bestehende, auf Energieeffizienz abzielende Ökodesign-Richtlinie auszuweiten. Sie legt für Produkte den Grundsatz der Nachhaltigkeit und andere Kriterien unter anderem

zur Verbesserung der Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Aufrüstbarkeit und Reparierbarkeit sowie der Energie- und Ressourceneffizienz fest. Dadurch sollen der Recyclinganteil in Produkten erhöht, die Wiederverwertung und ein hochwertiges Recycling ermöglicht und so der CO₂- und der ökologische Fußabdruck verringert werden. Die Verordnung soll ein breites Spektrum von Produkten abdecken, einschließlich Zwischenprodukten, also auch energieintensive Materialien wie Eisen- und Stahlprodukte.

Parallel dazu hat die Kommission eine Überarbeitung der **Bauprodukteverordnung** (Europäische Kommission, 2022b) vorgeschlagen, die Nachhaltigkeitskriterien für Baustoffe wie Zement und Beton und Stahlprodukte festlegt.

Für Kunststoffprodukte hat die EU-Kommission einen Vorschlag zur Überarbeitung der **EU-Verpackungsverordnung** (Europäische Kommission, 2022a) vorgelegt. Dieser sieht vor, dass alle Verpackungen auf dem europäischen Markt bis 2030 recycelbar sein sollen. Er enthält verbindliche Zielvorgaben für die Menge an recycelten Materialien, die in Kunststoffverpackungen verwendet werden, und verpflichtet Cafés, Geschäfte und Hotels dazu, auf wiederverwendbare Verpackungen umzusteigen, statt bei Einwegverpackungen zu bleiben.

Ab Mai 2023 wird die neue europäische **Batterieverordnung** von Dezember 2022 schrittweise die Richtlinie 2006/66/EG ersetzen und gleichzeitig in allen EU-Ländern mit dem gemeinsamen Ziel umgesetzt, die schädlichen Auswirkungen von Batterien auf die Umwelt zu minimieren. Sie enthält zudem Vorgaben für den verpflichtenden Einsatz von Kunststoffzyklen (Europäische Kommission, 2020c).

Zuletzt ist die Kreislaufwirtschaft im Kontext der Diskussionen über die Stärkung der europäischen Souveränität, die Verringerung der Importabhängigkeit von kritischen Rohstoffen und die Entwicklung

einer EU-Industriestrategie in den Vordergrund gerückt. Der von der EU-Kommission im März 2023 vorgeschlagene **Critical Raw Materials Act** zielt zu deren Gewährleistung auf eine sichere und nachhaltige Versorgung mit kritischen Rohstoffen ab (Europäische Kommission, 2023c). Die einheimische Versorgung mit kritischen Rohstoffen soll unter anderem durch die Erhöhung der Recyclingraten von kritischen Rohstoffen diversifiziert und gesichert werden. Der Vorschlag der EU-Kommission für einen **Net Zero Industry Act** (Europäische Kommission, 2023b) befasst sich mit dem Potenzial einer umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung zur Stärkung von Nachhaltigkeit und Resilienz.

Unternehmerische Nachhaltigkeit erfordert von Unternehmen eine ganzheitliche Strategie und eine Verankerung in der Unternehmenskultur. Die im Januar 2023 hierzu in Kraft getretene Richtlinie **Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)** erweitert die Nachhaltigkeitsberichterstattung neben den börsennotierten Unternehmen nun auch auf kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) (ab einer definierten Größe), sodass diese nun verpflichtet sind, auch ESG-Kennzahlen²¹ zu veröffentlichen. Hierzu zählen bei den Umweltkennzahlen neben dem Corporate Carbon Footprint (CCF) unter anderem auch Kennzahlen beziehungsweise Maßnahmen zur Ressourcenschonung und -effizienz.

Letztlich gibt die **Reform des Europäischen Emissionshandels (EU-ETS)** einen wichtigen Impuls zur Stärkung von Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft und vor allem des Recyclings, da die Abfallverbrennung hierin in Zukunft enthalten sein soll. Müllverbrennungsanlagen können demnach ab dem Jahr 2028 in den europäischen Emissionshandel einbezogen werden.

Neben diesen Initiativen auf EU-Ebene haben mehrere EU-Mitgliedstaaten ehrgeizige nationale

21 ESG-Kennzahlen: Kennzahlen für die Bereiche „Environmental, Social, Governance“

Strategien zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft entwickelt. Besonders erwähnenswert sind die Niederlande, Österreich und Frankreich (siehe obiger Abschnitt zu Indikatoren 3.2).

3.3.2 Rechtsrahmen in Deutschland

Historisch zielte die **nationale Kreislaufwirtschaftspolitik** stark auf das Abfallwirtschaftsrecht und das Abfallmanagement und weniger auf ein zirkuläres Wirtschaften in den gesamten Produktlebenszyklen ab. Insbesondere die Vorschriften und Praktiken für eine Kreislaufwirtschaft am Ende der Produktlebensdauer müssen noch verbessert werden, um ein hochwertiges Recycling mit dem Ziel einer weitgehenden Rohstoffhaltung zu erreichen.

Die **EU-Abfallrahmenrichtlinie** wird in verschiedenen Gesetzen und Rechtsakten in deutsches Recht umgesetzt, so unter anderem in der Elektro- und Elektronikgeräterichtlinie, der Verpackungsrichtlinie, der Batterierichtlinie und der Altfahrzeugrichtlinie sowie der Deponierichtlinie. Dies erfolgt entweder bereits in Artikeln des „Gesetzes zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der EU“ oder in gesonderten deutschen Gesetzgebungs- und Ordnungsverfahren.

Eine besondere Bedeutung hat das **Kreislaufwirtschaftsgesetz** (KrWG) vom 1. Juni 2012, das die Anforderungen der EU-Abfallrahmenrichtlinie in nationales Recht umsetzt. Hierdurch wird die Kreislaufwirtschaft noch stärker auf den Ressourcen-, Klima- und Umweltschutz ausgerichtet. Als Kernelement verankert das KrWG folgende Rangfolge unter den Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen:

- Vermeidung,
- Vorbereitung zur Wiederverwendung,
- Recycling,
- sonstige Verwertung,
- Beseitigung.

Das **Deutsche Ressourceneffizienzprogramm** (ProgRes) wurde ebenfalls 2012 verabschiedet um Ziele, Leitideen und Handlungsansätze für den Schutz

der natürlichen Ressourcen festzulegen.²² Das aktuelle Programm ProgRes III beschreibt Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungskette, also von der Rohstoffgewinnung über Produktgestaltung, Produktion und Konsum bis hin zur Kreislaufwirtschaft. Neu aufgenommen wurde im Jahr 2020 unter anderem der Beitrag der Ressourceneffizienz zur Erreichung der Klimaschutzziele.

Ein kohärenter Ansatz für eine echte Kreislaufwirtschaft, der etwa die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Kreislaufstrategien umfasst, fehlt jedoch noch. Im Koalitionsvertrag 2021 haben sich die Koalitionsparteien darauf verständigt, eine nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie zu erarbeiten, die bestehende Rohstoffstrategien mit dem Ziel der Reduzierung des Primärrohstoffeinsatzes bündelt.

Aufbauend auf der Analyse in den vorangegangenen Kapiteln wird vorgeschlagen, dass die Bundesregierung die Kreislaufwirtschaft als einen wichtigen Hebel für die Wirtschaft versteht, die Ressourcen- und Klimaschutzziele auf eine resiliente Weise zu erreichen. Sie sollte einen ehrgeizigen Weg für eine Kreislaufwirtschaft aufzeigen, der das Innovationspotenzial von zirkulären Geschäftsmodellen für die Wirtschaft hervorhebt. Insbesondere durch Technologien, die auf einen effizienteren Materialverbrauch und die Verringerung der damit verbundenen Emissionen abzielen, können neue Wirtschafts- und Geschäftsmodelle entstehen. Ziel sollte es sein, das Wirtschaftswachstum von der Nachfrage nach Rohstoffen zu entkoppeln. Der energieintensiven Industrie kann die Kreislaufwirtschaft beim Umgang mit hohen Energiekosten helfen. Während Investitionen in neue, zirkuläre Technologien im Vorfeld mit potenziell höheren Investitionskosten verbunden sein können, können sie durch einen geringeren Rohstoff- und Energieverbrauch zu niedrigeren

22 ProgRes wird alle vier Jahre fortgeschrieben; letztmalig wurde ProgRes III am 17. Juni 2020 vom Bundeskabinett verabschiedet.

Betriebskosten (OPEX-Kosten) führen. Eine belastbare Übergangsstrategie sollte daher die Kreislaufwirtschaft als eine gleichwertige Dekarbonisierungsstrategie für energieintensive Materialien neben der Dekarbonisierung der Primärproduktion etablieren. Hierzu sollten Anreizsysteme wie die Festlegung rechtlich verbindlicher, übergreifender Ziele, zum Beispiel für einen Pro-Kopf-Rohstoffverbrauch oder für materialspezifische Kreislaufwirtschaftsquoten, geschaffen werden (siehe obige Abschnitte 3.1 und 3.2).

Um einen Markt für den sekundären Produktionsweg zu schaffen, sind Maßnahmen erforderlich, die sowohl das Angebot an Technologien und Strategien der Kreislaufwirtschaft als auch die Nachfrage nach

Kreislaufprodukten erhöhen und somit deren Wettbewerbsfähigkeit sicherstellen (siehe Abbildung 29).

Im Kontext des **CEAP 2.0** der EU und der entsprechend novellierten EU-Rechtsakte muss die Bundesregierung ihre nationale Politik überarbeiten. Diese sollten ambitioniert und im Einklang mit den Klimaschutzzielen der EU umgesetzt werden. Da der Schwerpunkt der umzusetzenden EU-Verordnungen hauptsächlich auf Haushaltsprodukten und Endverbrauchssektoren wie Kunststoffen, Textilien oder elektronischen Geräten liegt, wird hier vorgeschlagen, dass die nationale Politik einen zusätzlichen Schwerpunkt auf den Bausektor legt, um Anreize für weitere Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen für unter anderem Stahl, Zement und Beton zu schaffen.



Eine nationale Strategie für **zirkuläre Technologien und Produkte** muss bestehende und neue Maßnahmen in einem kohärenten Rahmen zusammenfassen. Wichtig ist zudem, dass sie mit verwandten Strategien, die die Bundesregierung derzeit entwickelt, abgestimmt ist, wie zum Beispiel der Industriestrategie, der Rohstoffstrategie, der Strategie für Grüne Leitmärkte, der Holzbaustrategie, der Leichtbaustrategie und der Carbon-Management-Strategie.

3.4 Angebotsseitige Maßnahmen

3.4.1 Förderung von Schlüsseltechnologien und Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette sowie von Forschung und Entwicklung

Die Markteinführung neuer Technologien und Produktionsverfahren ist häufig mit höheren Investitionskosten verbunden. Die Bundesregierung sollte daher – neben der Unterstützung von Investitionen in klimaneutrale Technologien zur Primärproduktion energieintensiver Grundstoffe – die finanzielle Unterstützung für zirkuläre Technologien ausbauen. Zum einen sollten Investitionshilfen für Schlüsseltechnologien der Kreislaufwirtschaft erhöht werden. Unternehmen, die beispielsweise in größere, hochmoderne Recyclinganlagen mit den fortschrittlichsten Technologien zur Sekundärrohstoffgewinnung investieren wollen, sollten unterstützt werden. Zum anderen sollten dabei explizit auch Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette in den Blick genommen werden. Oftmals sind Wertschöpfungsketten und Logistik betroffen, wenn von der heutigen linearen Praxis auf zirkuläre Prozesse umgestellt wird. Dazu gehört, dass Kunststoffe besser sortiert und nachverfolgt werden oder dass die Ex-post-Sortierung von Kunststoffabfällen digitalisiert wird, um alle bisher „verlorenen“ Kunststoffabfälle unter Kriterien der Hochwertigkeit wieder in den Rohstoffkreislauf zurückzuführen. Eine wirksame Umsetzung erfordert daher, bei der Förderung die gesamte Wertschöpfungskette in den Blick zu nehmen. Letztlich sind für neue, bahnbrechende Technologien,

zum Beispiel für fortschrittliche, digitalisierte und KI-basierte werkstoffliche Sortiertechnologien oder hochwertiges und energieeffizientes chemisches Recycling, F&E-Mittel erforderlich.

- Die von der Bundesregierung angekündigte Investitionsprämie für Klimaschutz-Investitionen sollte explizit auch energie- und ressourceneffiziente zirkuläre Technologien und Prozesse fördern und mit ausreichenden Mitteln ausgestattet sein. Flankierend hierzu sollte die Möglichkeit einer beschleunigten Abschreibung als längerfristig angelegtes Instrument umgesetzt werden. Um zirkuläre Produktionsprozesse anzureizen, sollten bestehende **Investitionsförderprogramme** wie die „Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft“ (EEW) (Modul 4: Senkung des Energie- und Ressourcenverbrauchs) aufgestockt und die Fördermittel insbesondere für KMU leichter zugänglich gemacht werden.
- Leicht zugängliche **Netzwerke von Beratungs- und Informationsplattformen** für KMU wie das Kompetenzzentrum für Ressourceneffizienz (VDI ZRE) und der Kompetenzpool für Ressourceneffizienz sollten bundesweit gestärkt werden.
- Die **F&E-Förderung** für Technologien der Kreislaufwirtschaft, etwa im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms (UIP), des Technologietransferprogramms Leichtbau (TTP LB) und der Forschung für Nachhaltigkeit (FONA), sollte gestärkt werden. Um eine effektive Umsetzung der geförderten Technologien zu erhöhen, sollte die Förderung auch Projekte mit Partnern entlang der gesamten Wertschöpfungskette umfassen.
- Die **Bundesagentur für Sprunginnovationen** (SPRIN-D) will eine Brücke zwischen Forschergeist und Unternehmertum bauen, damit neue Sprunginnovationen geschaffen werden. Sie könnte auch in die Förderung innovativer Kreislaufwirtschaftsstrategien von Institutionen und Unternehmen eingebunden werden.

3.4.2 Verbessertes Design für Recycling und Eindämmung ineffizienter Designs und Praktiken

Eine Reihe ineffizienter Praktiken erhöht die Schwierigkeit, geschlossene Materialwertschöpfungsketten zu entwickeln. Dazu gehört das Inverkehrbringen von nicht oder nur schwer recycelbaren Materialien (zum Beispiel die Verwendung von Kunststoffen, die nicht mechanisch recycelt werden können, obwohl es Alternativen gibt) oder die Herstellung kurzlebiger, materialintensiver Produkte (wie Elektronik, Haushaltsgeräte, Kunststoffprodukte und so weiter). Auch die zunehmende Verwendung von Papierverbundstoffen kann zu neuen Problemen für die Kreislaufwirtschaft führen, da diese Verbundwerkstoffe kaum wiederverwertbar sind. Produkte sollten so konzipiert sein, dass sie am Ende des Lebenszyklus getrennt werden können, und es sollten fortschrittliche Technologien für die Sortierung von gemischten Abfällen sowie KI-basierte, Schwimm-/Sink- und Nahinfrarot-Sortiertechnologien eingesetzt werden.

In diesem Zusammenhang sind Normen für ein **rohstoffschonenderes** Design erforderlich:

- Im Rahmen der aktuellen Reform der **EU-Ökodesign-Verordnung** für nachhaltige Produkte (ESPR) sollte die Bundesregierung Maßnahmen unterstützen, die sicherstellen, dass eine hochwertige Recyclingmöglichkeit eines Produktes bereits beim Produktdesign berücksichtigt wird.
- Auf europäischer Ebene sollte die Entwicklung einer Richtlinie **Design for Recycling** oder von Handlungsempfehlungen für Design, Konstruktion und Verarbeitung für Kunststoffprodukte aller Branchen, die von vornherein aus Rezyklaten oder mit möglichst hohen Rezyklatanteilen gefertigt werden sollen, erwogen werden.
- Darüber hinaus könnten **ineffiziente Materialverwendungen** gezielt durch gesetzliche Vorgaben eingedämmt werden. So hat die EU bereits Schritte unternommen, eine Reihe von Einwegkunststoffen

im Verpackungsbereich zu verbieten, wenn es Alternativen gibt. Die Richtlinie über Einwegkunststoffe hat bereits gezeigt, dass ein Verbot ineffizienter Praktiken in bestimmten Fällen ein sehr direkter und wirksamer Weg sein kann, erhebliche Umweltvorteile zu erzielen, ohne dass die Verbraucherinnen und Verbraucher oder Hersteller ihre Produktauswahl einschränken müssen.

3.4.3 Verbesserung von Statistiken und Berichterstattung

Zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft sind zuverlässigere Statistiken insbesondere über Kunststoffabfälle (vor allem Art, Aufkommen, Entsorgungswege) und Recyclingquoten unerlässlich (Agora Industrie, 2022). Eine der wichtigsten Prioritäten der Bundesregierung sollte die Schaffung einer Berichtsinfrastruktur sein, mit der die Kunststoffströme in der Wirtschaft besser verfolgt werden können. Hierzu ist es wichtig, dass das Verhältnis von recyceltem Post-Verbraucher-Material zu Primärmaterial auf den relevanten Produktmärkten verfolgt wird und hierfür geeignete Indikatoren zu deren Messung entwickelt werden.

- Wie in ProgRess III angekündigt, sollte eine offene **Datenplattform für den Ressourcenschutz** implementiert werden. Durch den Ausbau der öffentlichen Datenbasis für einzelne Stoffströme und deren Umweltrelevanz könnten Fortschritte, Fehlentwicklungen und Handlungsbedarf in der Ressourcenpolitik besser erkannt werden.
- Für Kunststoffe sollte eine **Berichtsinfrastruktur** geschaffen werden, die die Verfolgung der Kunststoffströme in der Wirtschaft verbessert. Die Recyclingraten sollten künftig sowohl die Sammel- und Sortierverluste als auch die Verluste im Recyclingprozess umfassen. Ziel wäre es, durch mehr Transparenz Anreize für eine möglichst hohe Kohlenstoffnutzung zu generieren.

3.5 Nachfrageseitige Maßnahmen

3.5.1 Messen und Festlegen von Grenzwerten für eingebettete Emissionen in Materialien und Produkten

Grenzwerte für die eingebetteten THG-Emissionen (*embodied carbon*) in Endprodukten können ein technologieoffenes Instrument sein, das Märkte für kreislauffähige und ressourceneffiziente Produkte und Materialien schafft. Produkthersteller werden angereizt, in ihren Zwischen- und Endprodukten Grundstoffe mit niedrigen Emissionen zu verwenden. Dies wiederum schafft technologie neutrale Anreize für die jeweils wirtschaftlich effizientesten Maßnahmen, da niedrige Emissionen in einem Produkt auf verschiedene Weise erzielt werden können:

- durch einen hohen Anteil an Rezyklaten,
- durch Materialeffizienz beim Design und der Herstellung von Produkten oder
- durch die Substitution durch neue emissionsarme Grundstoffe.

Die alternativen Vermeidungslösungen konkurrieren dann entlang der Wertschöpfungskette um die effizientesten Lösungen zur Dekarbonisierung des Endprodukts. Im Rahmen der CSRD können Hersteller ab 2024/2025 zudem über die besonderen Aspekte ihrer Produktnachhaltigkeit, so unter anderem niedrige THG-Emissionen in den Produkten, digital berichten.

Insbesondere im Baubereich gibt es sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene mehrere Initiativen, die Grenzwerte für die eingebetteten Emissionen in den verwendeten Materialien in den Blick nehmen. In Deutschland sehen bestehende Normen für Bauprodukte (DIN EN 15804) bereits die Angabe der eingebetteten Emissionen als zusätzliche Information in den Umweltproduktdeklarationen vor. Das Qualitätssiegel Nachhaltiges Bauen (QNG) macht Vorgaben für das Treibhauspotenzial eines Gebäudes. Im Kontext der Überarbeitung der Europäischen Gebäude richtlinie (EPBD) wird die Einbeziehung des

CO₂-Fußabdrucks über den gesamten Lebenszyklus (Whole Life Carbon, WLC) als zusätzliche Kennzahl für die Berichterstattung und die Festlegung von Standards diskutiert.²³ Dabei ist entscheidend, dass Vorgaben für die eingebetteten Emissionen von Gebäudematerialien nicht mit Vorgaben zur Energieeffizienz, also den THG-Emissionen im Betrieb eines Gebäudes, zusammengefasst werden, da hierdurch Energieeffizienz anreize verwässert werden könnten (siehe auch BPIE, 2021).

- Die Bundesregierung sollte für ihren Gebäudebestand zunächst anfangen, für die **eingebetteten Emissionen** in Materialien, die in Endprodukten verwendet werden – wie Stahl, Zement und Beton –, einheitliche Maßstäbe zu **definieren und die eingebetteten Emissionen auszuweisen**. Eine Definition und Kennzeichnung des Produktanteils, der als emissionsarm gilt, kann als Grundlage für die öffentliche Beschaffung emissionsarmer Materialien dienen.
- Um Grenzwerte für die eingebetteten Emissionen in Gebäudematerialien zu setzen, sollte sich die Bundesregierung zum einen auf EU-Ebene für die Aufnahme entsprechender Vorschriften in die Novelle der **Europäischen Gebäuderichtlinie** einsetzen. Ergänzend und um Anreize für die Verwendung umweltfreundlicher Baumaterialien in Deutschland zu schaffen, sollte die Bundesregierung eine Verordnung über die eingebetteten Emissionen in Baumaterialien erarbeiten. Diese sollte die Anforderungen an die Gebäudeeffizienz und den Betrieb von Gebäuden, die durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG) festgelegt werden, ergänzen. Da dies (vorübergehend) zu Kostensteigerungen beim Bau führen kann, ist in jedem Fall parallel der soziale Wohnungsbau weitreichend zu fördern.
- Auf EU-Ebene sollte sich die Bundesregierung dafür einsetzen, dass im Rahmen einer zukünftigen Überarbeitung des Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft und der entsprechenden Rechtsvor-

²³ Für einen konkreten Vorschlag siehe BPIE (2022b).

schriften, etwa der Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle, eine Regelung zu den eingebetteten Emissionen in **Verpackungen** aufgenommen wird. In Deutschland ist das durch entsprechende Änderungen im Regelungsbereich für Verpackungen (VerpackG, VerpackV) umsetzbar.

→ Grenzwerte für eingebettete THG-Emissionen sollten auch in die Definition von emissionsarmen Grundstoffen eingehen. Hier sollte sich die Bundesregierung für eine ehrgeizige und **international harmonisierte Umsetzung** von Kennzeichnungen für emissionsarme Grundstoffe (insbesondere Stahl, Zement und Beton) in relevanten Foren, einschließlich der Industrial Deep Decarbonisation Initiative (IDDI), einsetzen.

3.5.2 Zirkuläre Materialien und Produkte durch eine nachhaltige öffentliche Beschaffung anreizen

Durch die öffentliche Beschaffung verfügt die öffentliche Hand über einen wichtigen Hebel, um die Nachfrage nach zirkulären Produkten und Materialien zu steigern. Die öffentliche Hand in Deutschland beschafft Waren und Dienstleistungen im Wert von rund 500 Milliarden Euro (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2020), was etwa 15 Prozent des BIP entspricht (OECD, 2019). Neben der Kosteneffizienz können öffentliche Ausschreibungen die Offenlegung der eingebetteten Emissionen in Grundstoffen wie Stahl und Zement als nachhaltiges Auswahlkriterium nutzen.

Gerade der Gebäude- und Bausektor, auf den zwischen 2009 und 2015 fast 40 Prozent der öffentlichen Großaufträge in Deutschland entfielen, könnte so einen besonderen Beitrag zum materialeffizienten Rohstoffeinsatz leisten. Auf der Grundlage von Vorschriften, die die eingebetteten Emissionen durch die Produktion messen und definieren (siehe oben), kann die Regierung spezifische Standards festlegen, um die Beschaffung von emissionsarmen Materialien zu erhöhen. Das Ziel sollte sein, technische Mindestanforderungen festzulegen (zum Beispiel kg CO₂eq/m² Nutzfläche). Mehrere europäische

Staaten haben bereits eine öffentliche Beschaffungspolitik eingeführt, die die Kreislaufwirtschaft fördert und die CO₂-Intensität über den gesamten Lebenszyklus reguliert, zum Beispiel Dänemark, die Niederlande oder Frankreich (siehe BPiE 2022a).²⁴ In Deutschland gibt es für die öffentliche Hand ein ganzheitliches Verfahren, das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), das den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden berücksichtigt.

- Im Rahmen der Reform des Vergaberechts sollte die Bundesregierung mit gutem Beispiel vorangehen, indem die Maßnahmen zur Kreislaufwirtschaft im **Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)** zur Förderung zirkulärer Grundstoffe und Produkte verstärkt werden.
- Für öffentliche Bauvorhaben und Bauprojekte sollten **Mindestquoten** für den Einsatz von recycelten oder wiederverwendeten Baustoffen pro Tonne Material und Projekt definiert werden. Zudem sollte die Bundesregierung ehrgeizige **Ziele für die eingebetteten Emissionen** von Baustoffen im Gebäudesektor verbindlich machen. Dies hätte zum Ziel, die Verwendung von recycelten und wiederverwendeten Materialien stärker in den Markt zu bringen.
- Die Vorgaben für die zirkuläre Beschaffung sollten nicht nur auf Bundesebene, sondern auch für **Länder und Kommunen** verbindlich sein.
- Ebenso sollte die Bundesregierung bei der aktuellen Überarbeitung der **EU-Bauproduktverordnung** Maßnahmen unterstützen, die auf eine verstärkte Wiederverwendung von Baumaterialien abzielen.

3.5.3 Finanzielle Anreize für zirkuläre Materialien und Produkte schaffen

Vorübergehend können zirkuläre Materialien und Produkte teurer sein als konventionell hergestellte Produkte auf Basis von Primärrohstoffen. Zum einen

²⁴ Zu erwähnen ist, dass Gebäude, die wie in anderen europäischen Ländern etwa zu 20 Prozent aus Recyclingbeton hergestellt sind, dennoch die höchsten Anforderungen an die Tragfähigkeit erfüllen.

ist die Markteinführung neuer Technologien und Produktionsverfahren häufig mit höheren Investitionskosten sowie dem Aufbau neuer Infrastrukturen verbunden. Zum anderen spiegeln die aktuellen CO₂-Preise im Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) und im EU-ETS die tatsächlichen Umweltkosten fossiler Rohstoffe noch nicht vollständig wider. Hersteller können mögliche Mehrkosten in der Produktion nicht am Markt geltend machen, wenn die Produkteigenschaften zirkulärer und konventioneller Produkte sehr ähnlich sind und es keine entsprechende Marktnachfrage gibt. Durch finanzielle Anreize auf der Verbrauchsseite für zirkuläre Materialien und Produkte kann die Nachfrage hierfür angereizt werden, sodass die Produkte künftig wettbewerbsfähig werden.

- Ein Instrument für **Gutschriften** oder „Credits“ für den Abfallrezyklateinsatz könnte zum Beispiel in der Verpackungsindustrie als Anreizsystem eingesetzt werden, um den Einsatz von recyceltem Material zu fördern und die Kreislaufwirtschaft zu unterstützen. Hier könnten Unternehmen, die einen hohen Anteil an recyceltem Material in ihren Verpackungen verwenden, Credits erhalten. Diese Credits können ihnen Vorteile wie verbesserte Marktzugangsmöglichkeiten, höhere Kundenakzeptanz oder finanzielle Anreize bieten.
- Finanziert werden könnten finanzielle Anreize durch eine **Fondslösung**. Dabei könnte neben dem diskutierten Verpackungsfonds (Umweltbundesamt, 2022b) auch ein breiter gefasster Rohstofffonds erwogen werden. Das Fondsvolumen könnte beispielsweise dadurch erbracht werden, dass Inverkehrbringer schlecht recycelbarer Produkte in den Fonds einzahlen. Zur Finanzierung ökonomischer Anreize könnte auch die Einführung alternativer Bepreisungsinstrumente wie einer Ressourcenabgabe oder -steuer erwogen werden.

3.5.4 Digitale Produktpässe als Wegbereiter für eine innovative Kreislaufwirtschaft

Auf europäischer Ebene sind spezifische Regelungen zu **Digitalen Produktpässen** (DPP) in den Jahren 2023

und 2024 geplant. Auch in der Novelle der **Öko-design-Richtlinie** (ESPR) kommt dem digitalen Produktpass eine Schlüsselrolle zu. Digitale Produktpässe sollten genutzt werden, um im B2B- und B2C-Bereich mehr Informationen über die Produkteigenschaften bereitzustellen, um ein höheres Recyclingniveau zu ermöglichen und die Lebensdauer von Produkten zu verlängern. Verbraucherinnen und Verbraucher und die Akteure der Wirtschaft können sich so digital über die Nachhaltigkeitseigenschaften von Produkten und deren Materialien informieren. Digitale Produktpässe können so die Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Konsistenz für jeden Akteur in jedem Teil der Wertschöpfungskette erhöhen. Sie liefern vor allem Informationen über die Herkunft, die Zusammensetzung und die Reparatur- und Demontagemöglichkeiten eines Produkts, einschließlich der Frage, wie die verschiedenen Komponenten am Ende des Lebenszyklus recycelt sowie wiedereingesetzt oder entsorgt werden können. Dies sollte für die Bundesregierung gemeinsam mit den Wirtschafts-, Handels- und Verbraucherverbänden in einem besonderen Fokus stehen und unterstützt werden.

Im Gebäudebereich kann durch digitale Materialpässe ein höheres Recyclingniveau ermöglicht und die Lebensdauer von Gebäuden und deren Teile verlängert werden. Die Reform der **EU-Bauprodukteverordnung** (CPR) beinhaltet den Vorschlag einer EU-Bauprodukt Datenbank, die auf dem digitalen Materialpass aufbauen könnte. Viele Fragen der Gestaltung und Umsetzung müssen hierbei noch geklärt werden. Die Bundesregierung hat in ihrem Koalitionsvertrag 2021 die Absicht geäußert, einen „digitalen Gebäuderessourcenpass“ zu entwickeln, um das Recycling von Bauprodukten voranzutreiben. Dieser Ankündigung folgend hat die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) Anfang 2023 einen Entwurf für einen Gebäuderessourcenpass vorgelegt, der in den Erarbeitungsprozess einfließen soll (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2023). Der Grundgedanke des Gebäuderessourcenpasses ist die Sammlung und Bündelung

aller relevanten Informationen über das Gebäude und seine Komponenten. Diese Informationen können zu einem späteren Zeitpunkt, beispielsweise zum Ende des Lebenszyklus, genutzt werden, um einzelne Materialien, Komponenten oder Bauteile bzw. das Gebäude als solches weiterzuverwenden und zu verwerten und somit im Kreislauf zu behalten (DIN, DKE, VDI, 2023).

- **Digitale Produktpässe** müssen sowohl praxisorientiert als auch für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) – auch im Rahmen der CSRD – handhabbar sein. Hierzu sollte die Bundesregierung geeignete Förderinstrumente konzipieren, vor allem für solche KMU, die Unternehmen dabei unterstützen, digitale Produktpässe besonders innovativ einzusetzen.
- Die Bundesregierung sollte sich auf EU-Ebene dafür einsetzen, dass die **ESPR-Novelle** klare Leitlinien für die Nutzung **digitaler Produktpässe** festlegt und durch gemeinsame Normen ein günstiges Marktumfeld schafft. Die EU sollte mit

einer begrenzten Anzahl klar definierter Produkte und Sektoren als Pilotprojekt beginnen, um den allgemeinen Ansatz zu testen und Gemeinsamkeiten zwischen verschiedenen Produktgruppen zu identifizieren.

- Ein auf nationaler Ebene entwickelter **digitaler Gebäudematerialpass** sollte eng mit der Entwicklung des digitalen Produktpasses auf EU-Ebene abgestimmt sein, um die Kompatibilität zwischen den verschiedenen Instrumenten sicherzustellen.
- Für die wichtigsten Baumaterialien im Gebäudesektor (Stahl, Aluminium, Beton, Keramik und Ziegel, Kunststoffe und Glas) könnten für verschiedene Klassifizierungen „typischer Projekte“ **Berichtspflichten** festgelegt und einige Pilotprojekte mit öffentlicher Förderung und Unterstützung eines digitalen Gebäudematerialpasses während der Einführungsphase durchgeführt werden.
- Für den Bausektor könnte zudem die Einrichtung eines umfassenden **Materialkatasters** für Bauelemente und Baumaterialien als „Rohstofflager der Zukunft“ sinnvoll sein.

Infobox 7: Sektorspezifische Maßnahmen für den Bereich Verpackungen

Umsetzen des CO₂-Preissignals für die Abfallverbrennung

Um die Wirtschaftlichkeit von Recyclingmaterialien zu verbessern und Anreize für Materialeffizienz und Substitution zu schaffen, sollte die Wirksamkeit der bestehenden CO₂-Bepreisung gestärkt werden. Derzeit fallen die Treibhausgasemissionen aus der Abfallverbrennung weder unter das EU-Emissionshandelssystem noch unter das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG), sodass kein CO₂-Preis gezahlt wird. Auf nationaler Ebene wird die Abfallverbrennung ab dem 1. Januar 2024 in das BEHG einbezogen werden. Auf EU-Ebene ist vorgesehen, dass die Abfallverbrennung in das EU-ETS aufgenommen wird: EU-Mitgliedstaaten müssen ab 2024 die Emissionen von Abfallverbrennungsanlagen messen, berichten und prüfen. Bis 2026 soll die EU-Kommission einen Bericht vorlegen, der darauf abzielt, solche Anlagen ab 2028 in das EU-ETS einzubeziehen, mit einer möglichen Ausnahmeregelung bis spätestens 2030.

- Um gleiche Wettbewerbsbedingungen zwischen den EU-Mitgliedstaaten zu schaffen, sollte die Bundesregierung darauf hinwirken, dass die CO₂-Bepreisung der Abfallverbrennung im BEHG ab 2028 in das EU-Emissionshandelssystem integriert wird.
- Es muss sichergestellt werden, dass die derzeit verbrannten Abfälle nicht in Länder mit niedrigeren Umweltstandards exportiert werden. Parallel dazu sind politische Maßnahmen erforderlich, um eine Nachfrage nach hochwertigem Recycling, vor allem der Kunststoffabfälle zu schaffen und weitere Vorschriften, um das Risiko eines erneuten Anstiegs der Exporte zu vermeiden.

Ausbau der Infrastruktur für Einweg-/Mehrwegverpackungen aus Kunststoffen

Auch Einweg- und Mehrwegverpackungen müssen den Bedingungen von Rückgabe, Rücktransport und gegebenenfalls Reinigung oder Wiederbefüllung standhalten. Das bedeutet auch, dass eine übergreifende Infrastruktur für Rücknahmesysteme geschaffen werden sollte. Rücknahmesysteme sollten mit den verschiedenen Produktformaten kompatibel sein und die Lagerung leerer Verpackungen und ihr Rücktransport möglichst effizient gestaltet werden. Zukünftig ist davon auszugehen, dass die Rücknahme gebündelt und vermehrt über Automaten erfolgen kann.

- Die Bundesregierung sollte sich für Standards einsetzen, bei denen Rückgabeautomaten (zum Beispiel für Drogerieartikel) im Sinne einer übergreifenden Infrastruktur in der Lage sind, eine Vielzahl von Verpackungsformen, -größen und -materialien zurückzunehmen (zum Beispiel minimaler Durchmesser der Rückgabeöffnung, zugelassene Formen, an denen sich die Entwickler der Mehrwegverpackungen orientieren können).
- Für eine übergreifende Infrastruktur bedarf es zudem einer standardisierten Codierung auf Verpackungen, die von Automaten ausgelesen, erkannt und eindeutig zugeordnet werden kann.

Regulatorische Anerkennung des chemischen Recyclings als Ergänzung zur Maximierung von mechanischem Recycling

Besonders hohe Recyclingraten lassen sich durch die komplementäre Anwendung von mechanischem und chemischem Recycling erzielen. Mechanisches Recycling ist eine bewährte und besonders energie- und materialeffiziente Technologie, der Priorität eingeräumt werden sollte. Damit das Potenzial des mechanischen Recyclings ausgeschöpft werden kann, sollten weitere Anreize für die getrennte Sammlung und die

hochwertige Verwertung von Kunststoffen am Ende ihrer Lebensdauer geschaffen werden (zum Beispiel Optimierung des Produktdesigns und Fördermaß nahmen für Sortierinfrastruktur).

- Das chemische Recycling sollte vollumfänglich als gültiges Recyclingverfahren anerkannt werden, das ergänzend zum mechanischen Recycling eingesetzt werden kann.
- Dabei ist sicherzustellen, dass das chemische Recycling so energieeffizient wie möglich ist und mit Erneuerbaren Energien betrieben wird und nicht mit dem mechanischen Recycling um hochwertige Abfälle als Rohstoff konkurriert.

Infobox 8: Sektorspezifische Maßnahmen für den Bereich Gebäude

Abbau regulatorischer Hemmnisse (Normen, Bauvorschriften) für mehr Ressourcenschonung

Eine der größten Herausforderungen für die Markteinführung recycelter und innovativer emissionsarmer Grundstoffe im Gebäudesektor besteht darin, dass bestehende Produktnormen neue emissionsarme oder recycelte Materialien nicht anerkennen. Die Änderung bestehender Normen ist jedoch oft sehr kompliziert, politisch aufgeladen und zeitaufwendig. Daher hat die Bundesregierung im letzten Jahr bereits eine „**Normungsroadmap Circular Economy**“ gefördert (DIN, DKE, VDI, 2023), die als einen Bereich von Experten vorgeschlagene neue Normen im Gebäudesektor thematisiert.

Auf EU-Ebene werden derzeit Normen und Verordnungen überarbeitet, die den Klinkeranteil verschiedener Zemente nach dem aktuellen Stand der technischen Entwicklung festlegen. Auf nationaler Ebene sollte sich die Bundesregierung auf die Überarbeitung der Betonnormen konzentrieren. Derzeit sind die bautechnischen Grundlagen für den Einsatz von Recyclingbaustoffen in Beton in den beiden Normenwerken DIN 10945/EN 206-1 und DIN 4226-100/EN 12610 geregelt. Das bedeutet, dass Recycling-Baustoffe die gleichen bautechnischen Anforderungen erfüllen müssen wie die für den gleichen Zweck verwendeten Primärbaustoffe. Neben einer Überarbeitung dieser Normen sollten die deutschen Bundesländer ihre Bauordnungen aktualisieren, um eine effiziente und sichere Bauweise zu ermöglichen.

- Die Bundesregierung sollte eine Reform der **DIN-Normen** für Beton vorantreiben. Um innovativen Beton mit geringerer Emissionsintensität zu ermöglichen, sollte der Regelungsansatz von den derzeitigen präskriptiven zu stärker leistungsorientierten Normen übergehen. Anstatt das Verhältnis von Zement zu Beton und damit das „Rezept“ für den Beton festzulegen, sollten die Normen die gewünschte Leistung und Qualität wie die Betonfestigkeit oder die Dauerhaftigkeit vorgeben.
- Neben der Reform der DIN-Normen sollte die Bundesregierung die Einführung von **Experimentierklauseln** in den Bauordnungen unterstützen, um innovatives Bauen jenseits des strengen Regelkorsetts zu ermöglichen. Konkreter kann hierzu der Vorschlag der Bundesarchitektenkammer für einen „Gebäudetyp E“, im Sinne von „Einfach Bauen“ oder „Experimentelles Bauen“ (Dilg, 2022) erwogen werden. Damit klimaschutzrelevante Vorteile gegenüber konventionellen Bauweisen gesichert sind, könnte sich eine neue Regulierung an der Innovationsklausel § 103 im GEG orientieren, in der technologische Konzepte anerkannt werden, wenn sie die vorgegebenen Werte erfüllen oder übererfüllen.
- Alternativ und zur Erhöhung der Sortenreinheit von Sekundärmaterialien sollte der **selektive Rückbau** von Gebäuden als Grundvoraussetzung bei der Beantragung einer Neu- und Umbaugenehmigung durch den Bauherrn und als Konzept zur Nutzungsflexibilität eingeführt werden.

Anpassung der Baunormen und Vorschriften (unter anderem DIN, ISO) zur Ressourcenschonung

Das Schließen von Materialkreisläufen im Gebäudesektor erfordert: 1) Produktnormen für den Markteintritt, die Auskunft über Dauerhaftigkeit, Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit, Umweltverträglichkeit und Rezyklateinsatz geben, 2) Prüfnormen, die eine Einstufung/Qualifizierung für die Wiederverwendung von Bauteilen oder Bauteilkomponenten ermöglichen, und 3) Materialspezifische Rezyklatnormen, die den verfahrenstechnischen Aufbereitungsprozess vorgeben und den Aufbereitungserfolg prüfbar machen. Die Akzeptanz von Recyclingbaustoffen (Beton, Zement) erfordert zudem produktspezifische Bewertungsstandards, welche die Regeln der Marktfähigkeit dieser Sekundärmaterialien auf dem europäischen Binnenmarkt berücksichtigen.

- Eine Benachteiligung der Recyclingbaustoffe könnte auf der Basis des KrWG (§ 45) in Verbindung mit den europäischen Produktnormen abgeschafft werden, wenn standardisierte und verbindliche Erklärungen über deren Produkteigenschaften vorliegen würden.
- Zudem sind Vorgaben für eine standardisierte Bewertung von Zirkularität/Kreislauffähigkeit auf Gebäudeebene für Bauteile, Bauprodukte und Materialien auch für die Gebäuderessourcenpässe zu erarbeiten.
- Da für die Errichtung von Gebäuden viele Ressourcen benötigt werden, ist es umso wichtiger, die Gebäude so lange wie möglich in der Nutzungsphase zu halten. Bei der weiteren Betrachtung des Themas sollte die ISO 20887:2020 [ISO, 2020] berücksichtigt und insbesondere Hilfestellungen zur Umsetzung der darin genannten Entwurfsprinzipien erarbeitet werden.

Infobox 9: Sektorspezifische Maßnahmen für den Bereich Fahrzeuge

Wie in den vorhergehenden Kapiteln ausgeführt, sind im Bereich des Fahrzeugbaus die Effizienzpotenziale der hier betrachteten Kreislaufwirtschaftsstrategien weitgehend gehoben. Hinzu kommt, dass das Heben zusätzlicher Potenziale im hier betrachteten Bilanzkreis herausfordernd ist. Dies bezieht sich auf die Langlebigkeit der Fahrzeuge und die Tatsache, dass sowohl ein Großteil der Fahrzeugproduktion als auch der Altfahrzeuge ins Ausland exportiert wird. Ein nationaler Regulierungsrahmen kann Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Fahrzeugen daher nur schwerlich adressieren. Über Quoten für Sekundärmaterialien könnte jedoch eine Nachfrage für zirkuläre Materialien gestärkt werden. Darüberhinausgehende Potenziale würden sich zudem insbesondere bei Maßnahmen ergeben, die sich auf eine effizientere Produktnutzung beziehen, etwa durch die Nutzung kleinerer Fahrzeuge oder alternativer Mobilitätsformen (Prakash et al., 2023).

Stärkung ambitionierter Rezyklatquoten

Die in Verkehr gebrachten Fahrzeuge haben sich hinsichtlich der Materialzusammensetzung in den letzten Jahren stark verändert. Da das Gewicht eines Fahrzeugs ein wichtiger Faktor für die Kraftstoffeffizienz und die Fahrleistung ist, setzen Automobilhersteller in großem Umfang Leichtbautechniken und -materialien ein. Infolgedessen ist der Anteil der Eisenmetalle zurückgegangen; stattdessen nehmen Anteile neuer Legierungen, Verbundmaterialien oder Kunststoffe zu. Insbesondere für den Bereich der Kunststoffe könnten spezifische Quoten für den Einsatz von Sekundärmaterialien die Nachfrage nach Recyclingkunststoff stärken.

- Auf EU-Ebene sollte die Einführung einer Rezyklateinsatzquote für Kunststoffe erwogen werden, etwa im Zuge der Überarbeitung der **Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG**.
- Um Fehlanreize für zusätzlichen Fertigungsverschnitt und der Produktion sogenannter Post-Industrial-Rezyklate zu vermeiden, sollte der Fokus auf Rezyklate aus Endverbraucherabfällen (private und gewerbliche Abfälle, so genannte Post-Consumer-Rezyklate) gelegt werden.

Technischer Anhang

Annahmen

Die folgende Tabelle T 1 gibt einen Überblick über die modellierten Annahmen zu den Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen. Diese Annahmen und ihre Quantifizierungen basieren auf den folgenden Hauptquellen: *Making Net-Zero Steel Possible* von Mission Possible Partnership (2022), *Material efficiency and its contribution to climate change mitigation in Germany* von Pauliuk und Heeren (2020), *Industrial Transformation 2050* von Material Economics (2019), *Potenziale von Bauen mit Holz* von Wolf et al. (2020), *RESCUE* von Umweltbundesamt (2020), *ReShaping Plastics* von Systemiq (2022) und *Burning Questions – Pathways to a circular plastic packaging system in Germany* von WWF und Systemiq (2021). Diese Studien wurden in Abstimmung mit Vertreterinnen und Vertretern aus der Industrie verfasst und/oder von Fachleuten geprüft. Zusätzlich wurden Interviews mit Expertinnen und Experten aus Industrie und Wissenschaft geführt.

Die folgenden Tabellen zeigen eine Auswahl der wichtigsten Annahmen, die für die Modellierung verwendet wurden. Speziell für die Stoffströme gibt es eine größere Anzahl von Annahmen, die hier nicht aufgeführt sind. So werden beispielsweise die Recyclingströme nach Sammel- und Recyclingquoten zusammengefasst, wobei Annahmen über Import- und Exportströme sowie bestimmte Arten von Behandlungsanlagen (zum Beispiel Schredder) nicht berücksichtigt werden.

Methodologie

Das quantitative Modell dieser Studie schätzt und quantifiziert die Auswirkungen mehrerer technischer Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen. Es wurde ein pragmatischer Modellierungsansatz gewählt, indem vier Modelle für jede der in Abbildung A 1 dargestell-

ten Kombinationen von Materialien und Nachfragesektoren erstellt wurden. Zunächst wurden Modelle zur Schätzung des (1) erforderlichen Bestands für die Automobilindustrie, Gebäude und Verpackungen entwickelt. Anschließend wurden der Bestand und der Fluss (Zu- und Abfluss) von Materialien aus diesen Sektoren modelliert (2) und auf die Menge der Abfallströme, auf die Recyclingquoten und -beschränkungen angewandt werden, bezogen (3) und die Menge der Nachfrage bestimmt. Daraus ergibt sich die erforderliche Produktion von neuen und rezyklierten Materialien (4).

Im nächsten Schritt wurden auf diese Modelle Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen für jedes Material angewendet (siehe Tabelle T 1).

Deutschland ist Teil des europäischen Binnenmarkts und globaler Märkte; seine Materialverwendung und -produktion ist kein geschlossenes System. Das bedeutet, dass Produkte und Materialien, die in Deutschland verwendet werden, nicht unbedingt aus Deutschland stammen. Daher können die Treibhausgasemissionen, die mit der Herstellung der in Deutschland verwendeten Produkte und Materialien verbunden sind, auch außerhalb Deutschlands verursacht worden sein. In diesem Modell sind die Emissionen berücksichtigt, die mit der Nachfrage nach Gebäuden, Fahrzeugen und Verpackungen in Deutschland verbunden sind, unabhängig von deren Produktionsort. Die gleiche Logik gilt für das Potenzial der Kreislaufwirtschaft: Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen wird auf der Grundlage der Auswirkungen der deutschen Kreislaufwirtschaft auf den deutschen Verbrauch berechnet. Da die derzeit gängige Emissionsbilanzierung produktionsbasiert ist, würden nicht alle Emissionsminderungen aus der Kreislaufwirtschaft in den deutschen Emissionskonten auftauchen – aber diese Emissionsminderungen würden in den Konten der jeweiligen Handelspartner Deutschlands auftauchen. Deutschland ist nicht nur

Annahmen zu den im Modell betrachteten Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft					Tabelle T 1
Maßnahme	Nachfragesektor	2020	2030	2045	Techn. max.
Stahl					
Sammelquote	Automobilindustrie	95 %	99 %	99 %	
	Gebäude	89 %	93 %	93 %	
Recyclingquote		95 %	97 %	98 %	
Fabrikationsverluste	Automobilindustrie	15 %	10 %	7 %	
	Gebäude	4 %	2 %	1 %	
Materialeffizienz durch verbessertes Design	Gebäude		+7 %	+16 %	
Zusätzliche Substitution durch Holz	Gebäude		+5 %	+2,5 %	+33 %
Wiederverwendung von Stahlträgern	Gebäude	2 %	11 %	19 %	
Lebensdauer	Gebäude	85 Jahre	90 Jahre	90 Jahre	100–120 Jahre
Zement					
Klinker-Zement-Verhältnis	Gebäude	0,71	0,65	0,56	0,53
Zement-Beton-Verhältnis	Gebäude	12 kg/m ³ MPa (Durchschnitt)	10 kg/m ³ MPa	7kg/m ³ MPa	5kg/m ³ MPa
Lebensdauer	Gebäude	85 Jahre	90 Jahre	90 Jahre	100–120 Jahre
Zement-Recycling	Gebäude	0	fließt in den Klinkerfaktor und den Zementanteil ein		
Zusätzliche Substitution durch Holz	Gebäude		+10 %	+5 %	+65 %
Materialeffizienz durch schlankes Design und effiziente Konstruktion	Gebäude		+7 %	+16 %	bis zu +25 %
Kunststoffe					
Sortierung von Abfall	Automobilindustrie	15 %	43 %	84 %	
	Gebäude	100 %	100 %	100 %	
	Verpackung	76 %	82 %	87 %	
Chemisches Recycling von sortiertem Kunststoff	Automobilindustrie	4 %	16 %	34 %	
	Gebäude	0 %	8 %	21 %	
	Verpackung	1 %	16 %	30 %	
Mechanisches Recycling von sortiertem Kunststoff (closed loop, open loop)	Automobilindustrie	1 %, 12 %	6 %, 13 %	14 %, 14 %	
	Gebäude	0 %, 74 %	17 %, 55 %	42 %, 26 %	
	Verpackung	32 %, 18 %	39 %, 17 %	46 %, 15 %	
Verringerung der Recyclingverluste	Automobilindustrie	27 %	26 %	19 %	
	Gebäude	22 %	22 %	20 %	
Reduzierter Abfall	Gebäude	26 %	20 %	11 %	
Substitution von Kunststoff	Gebäude		+2 %	+7 %	
	Verpackung		+5 %	+9 %	
Wiederverwendung	Verpackung		+5 %	+9 %	
Gewichtsreduktion	Verpackung		-4 %	-8 %	

Agora Industrie und Systemiq (2023)

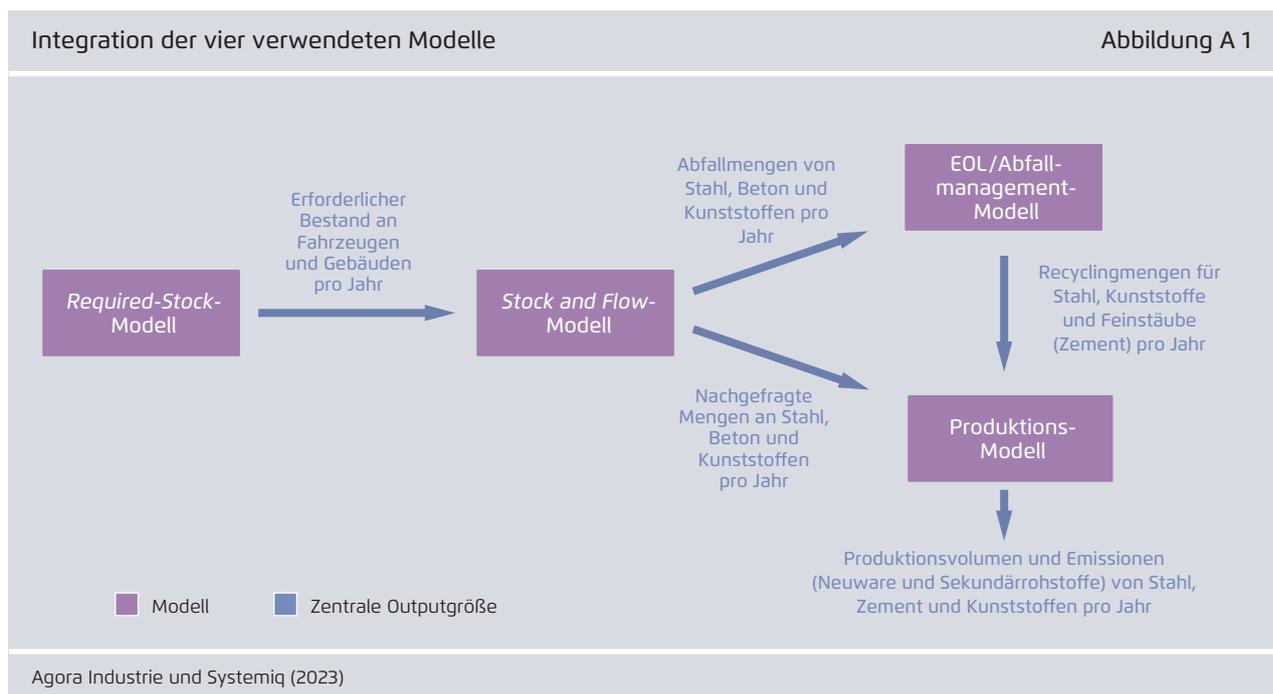
in der EU, sondern auch weltweit führend in der Technologieentwicklung und bei der Festlegung von Standards. Daher sollten deutsche Kreislaufwirtschaftspraktiken letztlich das Potenzial haben, sich zu verbreiten und somit auch die deutschen Importe und Exporte zu beeinflussen.

Das Required-Stock-Modell

Das Modell für den erforderlichen Bestand berechnet den nachgefragten Fahrzeugbestand, die Quadratmeter an bebauter Wohn- und Nichtwohnfläche und die benötigte Verpackungsmenge für jedes Jahr innerhalb unseres Zeithorizonts auf der Grundlage des Shared Socioeconomic Pathway 2 (SSP2), angepasst an Deutschland (aus Pauliuk und Heeren, 2020). Dabei handelt es sich nicht um eine Vorhersage, sondern um eine Extrapolation vergangener Trends unter Berücksichtigung der jüngsten moderaten Veränderungen in Richtung Effizienz. Diese Nachfragetrends könnten sich durch systemische Maßnahmen wie Verkehrsverlagerungen, Stadtplanung und Gebäudesanierung ändern und müssten sich gegebenenfalls auch ändern, wenn ein Emissionspfad eingehalten werden soll, der mit dem Pariser Klimaabkommen vereinbar

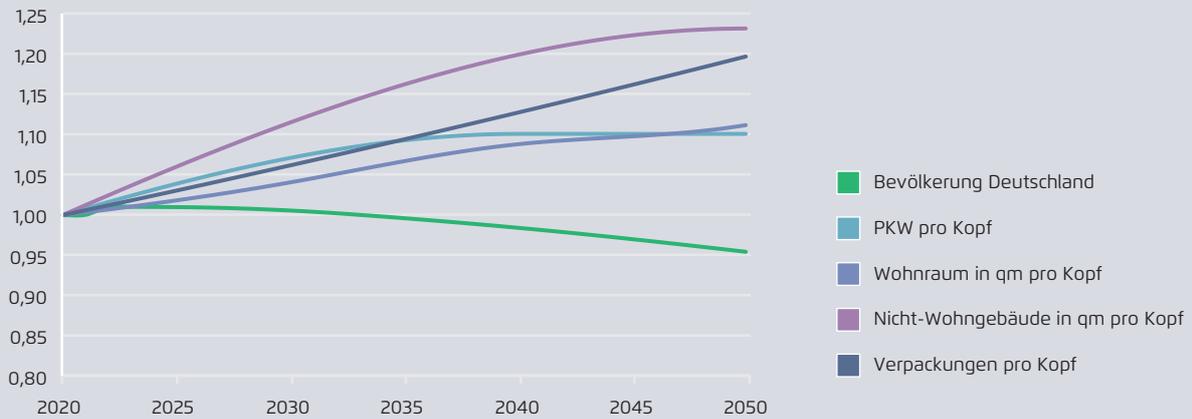
ist. Solche systemischen Veränderungen in den Nachfragesektoren liegen jedoch außerhalb des Rahmens dieses Modells, das das Potenzial technischer Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen untersucht. In zukünftigen Modellen könnten diese Potenziale jedoch mit systemischen Veränderungen kombiniert werden.

Abbildung A 2 zeigt die normalisierten oder indexierten Größen für die Eingangsdaten der Modelle, während Tabelle T 2 die absoluten Zahlen der Bevölkerungs- und Nachfragedynamik angibt. Während für die Pro-Kopf-Nachfrage nach Personenkraftwagen (PKW), Verpackungen und bebauten Quadratmetern ein Anstieg prognostiziert wird, wird erwartet, dass die Bevölkerungszahl in Deutschland bis 2045 und darüber hinaus kontinuierlich abnimmt.



Indexierte Entwicklung von Bevölkerung, Flächennachfrage, PKW und Verpackungen pro Kopf in Deutschland (2020 bis 2050)

Abbildung A 2



Agora Industrie und Systemiq (2023) auf Basis von Pauliuk, S. und Heeren, N. (2020)

Absolute Entwicklung der Bevölkerung, der Flächennachfrage (Wohnen und Nichtwohnen), der Pkw und der Verpackungen pro Kopf in Deutschland in den Jahren 2020, 2030 und 2045

Tabelle T 2

	2020	2030	2045	Quelle
Bevölkerung	83.160.000	83.643.500	80.420.100	Destatis (2023)
Personenkilometer (km/Kopf)	10.900	11.675	12.000	Pauliuk und Heeren (2020)
PKW pro Kopf (Anzahl/Kopf)	0,57	0,61	0,62	Pauliuk und Heeren (2020)
Wohnfläche pro Kopf (m²/Kopf)	47,7	49,6	53,3	Umweltbundesamt (2023b); Pauliuk und Heeren (2020)
Nichtwohnfläche pro Kopf (m²/Kopf)	22,7	25,3	27,8	Pauliuk und Heeren (2020)
Verpackungen pro Kopf (kg/Kopf)	38	40,3	44,1	WWF und Systemiq (2021)

Agora Industrie und Systemiq (2023)

Das Bestands- und Flussmodell – Stock-and-Flow-Modell

Das Bestands- und Flussmodell berechnet den Bedarf und die Abfallmengen für jede Kombination von Material und Produkt (Autos, Quadratmeter von Wohn- und Nichtwohngebäuden). Die Inputdaten umfassen die stofflichen Zusammensetzungen der Produkte, historische jährliche Zuflussdaten, die erforderlichen Bestandsdaten aus dem oben beschriebenen Modell sowie die durchschnittlichen Lebensdauern der Produkte. Für die Berechnung der Abfallmenge, die jedes Jahr den Bestand verlässt, wird eine Normalverteilung um die durchschnittliche Lebensdauer des Produkts angenommen. Die Nachfrage wird dann so berechnet, dass sie den Bedarf in der erforderlichen Menge befriedigt. Das tatsächliche jährliche Angebot (zum Beispiel an Gebäuden) hängt praktisch nicht nur von der Bestandsnachfrage ab, sondern auch von anderen Bedingungen wie Wirtschaftszyklen. In Übereinstimmung mit der wissenschaftlichen Praxis wird jedoch davon ausgegangen, dass eine lineare Extrapolation einen aussagekräftigen Näherungswert in Form von Durchschnittswerten über die 25 Jahre des modellierten Zeitraums darstellt.

Das einzige Produkt, für das das Bestands- und Flussmodell nicht durchlaufen werden muss, sind Verpackungen, bei denen der für jedes Jahr angenommene Lagerbedarf sowohl dem Bedarf als auch dem Abfall in dem betreffenden Jahr entspricht, da die durchschnittliche Lebensdauer von Verpackungen unter einem Jahr liegt.

Das End-of-Life- und Abfallmanagement-Modell

Das *End-of-Life*-Modell ist ein Prozessflussmodell, das die recycelten, verbrannten und wiederverwendeten Mengen für jedes Material berechnet. Die Eingaben bestehen aus den Abfallmengen aus dem Bestands- und Flussmodell sowie aus Daten über Wiederverwendung, Sammlung, Recycling und andere EOL-Managementraten.

In einem ersten Schritt werden die recycelten Materialien für jede Branche abgezogen. In die

Recyclingquote fließen nur die Materialien ein, deren Recycling die Produktion von Rohstoffen vermeidet. Daher werden die recycelten Mengen auch von der in das Produktionsmodell einfließenden Nachfrage abgezogen.

Die nicht recycelten Materialien fließen dann in ein Sammel- und Sortiermodell, in dem die jeweiligen Sammel-, Sortier- und Recyclingquoten angewendet werden.

Bei Kunststoffen sind Sammlung und Recycling oft komplexer, daher werden die Materialströme auf der Grundlage branchenspezifischer Systemmodelle modelliert, die WWF (2021) und Systemiq (2022) entnommen wurden. Das Modell berechnet auch die Emissionen im Zusammenhang mit der EOL-Behandlung von Kunststoffen.

Das Produktionsmodell

Die Produktionsmodelle quantifizieren die Verwendung der verschiedenen Materialien und berechnen die damit verbundenen durchschnittlichen Produktionsemissionen.

Das Stahlproduktionsmodell berechnet, wie viel Stahl aus Sekundärmaterial im Vergleich zur Produktion von Primärstahl verwendet wird, wobei Technologie und Schrottverfügbarkeit sowie der maximale Anteil von recyceltem Material an der Produktion aufgrund von Verunreinigungen (Legierung und Kupfer) berücksichtigt werden.

Das Zementproduktionsmodell berechnet die Klinkermenge, die zur Deckung des Betonbedarfs benötigt wird, sowie die mit der jeweiligen Klinkerproduktion verbundenen Emissionen und andere Prozessemissionen.

Das Kunststoffproduktionsmodell berechnet, wie viel Material bei den Produktionswegen auf der Grundlage von chemischem Recycling oder mechanischem Recycling verwendet wird, wobei die jeweils damit verbundenen Emissionen berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

Acatech; Systemiq (2021): *Making the circular economy count. An analysis of available circular economy metrics to develop a practical, implementable set for national progress monitoring.* Abrufbar unter <https://en.acatech.de/publication/making-the-circular-economy-count/>.

Agora Energiewende (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.* Abrufbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf

Agora Energiewende (2023): *Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023.* Abrufbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/die-energiewende-in-deutschland-stand-der-dinge-2022/>.

Agora Energiewende; Wuppertal Institut (2021): *Breakthrough Strategies for Climate-Neutral Industry in Europe: Policy and Technology Pathways for Raising EU Climate Ambition.* Abrufbar unter <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/breakthrough-strategies-for-climate-neutral-industry-in-europe-summary/>.

Agora Industrie (2022): *Mobilising the circular economy for energy-intensive materials: How Europe can accelerate its transition to fossil-free, energy-efficient and independent industrial production.* Abrufbar unter <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/mobilising-the-circular-economy-for-energy-intensive-materials-study/>.

Agora Industrie; Carbon Minds (2023): *Chemie im Wandel. Die drei Grundpfeiler für die Transformation chemischer Wertschöpfungsketten.* Abrufbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/chemie-im-wandel/>.

Agora Industrie; Future Camp (2022): *Power-2-Heat: Gaseinsparung und Emissionsminderung in der Industrie.* Abrufbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021-05_IND_DE-P4Heat/A-EW_277_Power-2-Heat_EN_WEB.pdf.

Agora Industrie; FutureCamp; Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2022): *Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Analyse zur Zementbranche.* Abrufbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_10_DE_KIT/A-EW_259_Klimaschutzvertraege-Industrietransformation-Zement_WEB.pdf.

Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions (2021): *Signed and sealed: Green Deal Timber Construction.* Abrufbar unter <https://www.ams-institute.org/news/signed-and-sealed-green-deal-timber-construction/>.

ARUP (2019): *Circular Business Models for the Built Environment.* Abrufbar unter <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/circular-business-models-for-the-built-environment>.

Barragan et al. (2021): *Topology optimization and additive manufacturing in the building and construction industry.* Abrufbar unter <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1154/1/012029/pdf>.

BDE – Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e. V. (2020): *Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020.* Abrufbar unter <https://www.bde.de/themen/statusbericht-kreislaufwirtschaft/#:-:text=Die%20Branche%20in%20Zahlen,-310K&text=Mehr%20als%20310.000%20qualifizierte%20und,Euro>.

Beck, G. (2020): *Stark wie Stahl.* Abrufbar unter <https://www.sueddeutsche.de/geld/innovatives-bauen-stark-wie-stahl-1.4877903>.

BPIE (Buildings Performance Institute Europe)

(2021): *Introducing whole-life carbon metrics: recommendations for highly efficient and climate-neutral buildings.* Abrufbar unter <https://www.bpie.eu/publication/introducing-whole-life-carbon-metrics-recommendations-for-highly-efficient-and-climate-neutral-buildings/>.

BPIE (Buildings Performance Institute Europe)

(2022a): *A life-cycle perspective on the building sector – Good practice in Europe.* Abrufbar unter <https://www.bpie.eu/publication/a-life-cycle-perspective-on-the-building-sector-good-practice-in-euro>.

BPIE (Buildings Performance Institute Europe)

(2022b): *Reducing carbon emissions over the life of a building: opportunities in the 2022 EPBD recast.* Abrufbar unter <https://www.bpie.eu/publication/reducing-carbon-emissions-over-the-life-of-a-building-opportunities-in-the-2022-epbd-recast/>.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2021):

Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen. Charta für Holz 2.0. Abrufbar unter https://www.charta-fuer-holz.de/fileadmin/charta-fuer-holz/dateien/service/mediathek/Web_Broschuere_Charta-fuer-Holz_4._Ausgabe_2021_bf.pdf.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020):

Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Abrufbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/ressourceneffizienz_programm_2020_2023.pdf.

Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022):

Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. Abrufbar unter https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:9377ecf9-7de5-49cb-a5cf-7dc3d9849e90/Kreislaufwirtschaftsstrategie_2022_230215.pdf.

Bundesregierung (2021): *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021 – Kurzfassung.*

Abrufbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1919202/b84e1a8f-091845c8880ffb397d1fe6cb/2021-05-28-kurzfasung-nachhaltigkeit-data.pdf?download=1>.

Bureau of International Recycling (2021): *Weltweites Stahlrecycling in Zahlen 2017–2021.*

Abrufbar unter https://www.bir.org/images/BIR-pdf/Ferrous_report_2017-2021_lr.pdf.

Campbell, P. (2022): *Automobilhersteller schalten einen Gang höher bei der Verwendung von Recycling-Materialien.*

Financial Times. Abrufbar unter <https://www.ft.com/content/78008f55-b1b0-4e1a-aa9d-645b0cc90c9d>.

Daehn, K. E.; Cabrera Serrenho, A.; Allwood, J. M.

(2017): *Wie wird die Kupferkontamination das zukünftige globale Stahlrecycling einschränken?* *Environmental Science & Technology*, 51(11), 6599–6606. Abrufbar unter <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.7b00997>.

Damineli, B. L.; Kemeid, F. M.; Aguiar, P. S.; John, V. M.

(2010): *Messung der Ökoeffizienz der Zementverwendung.* *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 555–62. Abrufbar unter <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>.

Dejtiar, F. (2019): *Was ist autoklavierter Porenbeton (AAC)?*

Abrufbar unter <https://www.archdaily.com/921856/what-is-autoclaved-aerated-concrete-aac>.

Destatis (2023): *Vorausberechneter Bevölkerungsstand: Deutschland, Stichtag, Varianten der Bevölkerungsvorausberechnung.* Abrufbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=table&code=12421-0001&bypass=true&levelindex=0&levelid=1674730429548#abreadcrumb>.

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2023): *Gebäuderessourcenpass.* Abrufbar unter <https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/themen/gebaeuderessourcenpass/dgnb-gebaeuderessourcenpass-vollstaendige-vorlage.pdf>.

DIN, DKE, VDI (2023): *Deutsche Normungsroadmap Circular Economy.* Abrufbar unter <https://www.dke.de/resource/blob/2229314/e51b2fd920cc239ad-1ca0bc1b3a87395/deutsche-normungsroadmap-circular-economy-data.pdf>.

Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2020): *Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2018. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente.* Abrufbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/heizenmitholz/HH_2018_Teilbericht.pdf.

Ellen MacArthur Foundation (2019): *Reuse: Rethinking packaging.* Abrufbar unter https://emf.thirdlight.com/file/24/_A-BkCs_aXeXO2_Am1z_J7vzLt/Reuse%20%E2%80%93%20rethinking%20packaging.pdf.

Ellen MacArthur Foundation (2020): *Upstream Innovation: A guide to packaging solutions.* Abrufbar unter https://emf.thirdlight.com/file/24/h_Pf1Maht-tEqT6h_OwchCrKU2/Upstream%20Innovation.pdf.

Ellis, G. (2023): *Die besten nachhaltigen Baumaterialien für eine bessere Zukunft.* Abrufbar unter <https://constructionblog.autodesk.com/top-sustainable-construction-materials/>.

EY (2022): *Warum Industrieunternehmen bei der Innovation von Geschäftsmodellen führend sein müssen.* Abrufbar unter https://www.ey.com/en_mz/advanced-manufacturing/why-industrial-companies-need-to-lead-business-model-innovation.

Europäische Kommission (2008): *EU-Abfallrichtlinie.* Abrufbar unter <https://eur-lex.europa.eu/DE/legal-content/summary/eu-waste-management-law.html#>.

Europäische Kommission (2018): *A monitoring framework for the circular economy.* Abrufbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2018%3A29%3AFIN>.

Europäische Kommission (2019): *Press release: Closing the loop: Commission delivers on Circular Economy Action Plan.* Abrufbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_1480.

Europäische Kommission (2020a): *A new Circular Economy Action Plan.* Abrufbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>.

Europäische Kommission (2020b): *Categorization System for the Circular Economy.* Abrufbar unter https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/categorisation_system_for_the_ce.pdf.

Europäische Kommission (2020c): *Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020.* Abrufbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0798>.

Europäische Kommission (2022a): *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Verpackungen und Verpackungsabfälle, zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 und der Richtlinie (EU) 2019/904 sowie zur Aufhebung der Richtlinie 94/62/EG.* Abrufbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:de4f236d-7164-11ed-9887-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF.

Europäische Kommission (2022b): *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.* Abrufbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:071ecada-b0cf-11ec-83e1-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF.

Europäische Kommission (2022c): *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.* Abrufbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:bb8539b7-b1b5-11ec-9d96-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF.

Europäische Kommission (2022d): *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.* Abrufbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:bb8539b7-b1b5-11ec-9d96-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF.

Europäische Kommission (2023a): *Supply Chain Analysis and Material Demand Forecast in Strategic Technologies and Sectors in the EU – A Foresight Study.* Abrufbar unter https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC132889/JRC132889_01.pdf.

Europäische Kommission (2023b): *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für Maßnahmen zur Stärkung des europäischen Ökosystems der Fertigung von Netto-Null-Technologieprodukten (Netto-Null-Industrie-Verordnung).* Abrufbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:6448c360-c4dd-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF.

Europäische Kommission (2023c): *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020.* Abrufbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:903d35cc-c4a2-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF.

European Environmental Agency (2022): *Bellagio Declaration.* Abrufbar unter <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/measuring-europes-circular-economy/BellagioDeclaration.pdf/view>.

Eurostat (2022): *Circular Material Use Rate.* Abrufbar unter <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20221213-1>.

Favier, A.; De Wolf, C.; Scrivener, K. L.; Habert, G. (2018): *Eine nachhaltige Zukunft für die europäische Zement- und Betonindustrie.* Abrufbar unter https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2018/10/AB_SP_Decarbonisation_report.pdf.

Florea, M. V. A.; Ning, Z.; Brouwers, H. J. H. (2014): *Aktivierung von freigesetztem Betonfeinkorn und seine Anwendung in Mörteln.* *Construction and Building Materials*, 50, pp.1-12. Abrufbar unter <https://josbrouwers.bwk.tue.nl/publications/Journal102.pdf>.

Franco, J.V.; Picchi, F.A. (2016): *Lean design in building projects: guiding principles and exploratory collection of good practices*. In: Proc. 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction, Boston, MA, USA, sect.4 pp. 113-122. Abrufbar unter <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-5d954305-e6f3-4c5b-9ee7-4a03eafd2d70.pdf>.

Global Energy Monitor (2023): *Global Steel Plant Tracker*. Abrufbar unter <https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/>.

Heidelberg Materials (2021): *Ein neuer CCU-Ansatz – CO₂-Mineralisierung von abgerissenen Betonabfällen zu einem ergänzenden zementartigen Material*. Abrufbar unter <https://blog.heidelbergcement.com/en/ccu-brevik-norcem-recycled-concrete>.

Horton, P.; Allwood J. (2018): *Möglichkeiten zur Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung von Blechteilen für die Automobilindustrie*. Abrufbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401361730211X>.

International Resource Panel (2020): *Ressourceneffizienz und Klimawandel*. Abrufbar unter <https://www.resourcepanel.org/file/1966/download?token=dNgP-qfZE>.

Islam, A.; Bhat G. (2019): *Umweltfreundliche Wärme- und Schalldämmstoffe aus recycelten Textilien*. Abrufbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971931254X>.

IVL Schwedisches Umweltforschungsinstitut (2021): *CO₂ concrete uptake*. Abrufbar unter [https://www.ivl.se/projektwebbar/CO₂-concrete-uptake/about-the-website.html](https://www.ivl.se/projektwebbar/CO2-concrete-uptake/about-the-website.html).

Jackson, C. (2021): *Liste der Baumaterialien für grünes Bauen*. Abrufbar unter <https://www.construction21.org/articles/h/list-of-building-material-for-green-construction.html>.

Kulisch, D.; Katz, A.; Zhutovsky, S. (2023): *Quantifizierung des Restgehalts an nicht getrocknetem Zement in Zementpasten als Potenzial für die Rückgewinnung*. *Nachhaltigkeit*, 15 (1), S. 263. Abrufbar unter <https://www.mdpi.com/article/10.3390/su15010263>.

OECD (2019): *Öffentliche Vergabe in Deutschland. Strategische Ansatzpunkte zum Wohl der Menschen und für wirtschaftliches Wachstum*. Abrufbar unter <https://doi.org/10.1787/48df1474-de>.

Öko-Institut e. V. (2022): *Klimawirkung der Pyrolyse von Kunststoffverpackungsabfällen im Vergleich zu Wiederverwendung und werkstofflicher Verwertung*. Abrufbar unter https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2022/09/zwe_2022_report_climat_impact__pyrolysis_plastic_packaging.pdf.

Material Economics (2019): *Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*. Abrufbar unter https://materialeconomics.com/material-economics-industrial-transformation-2050.pdf?cms_fileid=303ee49891120acc9ea3d13bbd498d13.

Material Economics (2021): *Europe's Missing Plastics. Taking stock of EU plastics circularity*. Abrufbar unter https://materialeconomics.com/material-economics-europe-s-missing-plastics.pdf?cms_fileid=7fb5e3b37319ddc439ea43d70948eb18.

McKinsey&Company (2020): *Grundsteinlegung für kohlenstofffreien Zement*. Abrufbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/laying-the-foundation-for-zero-carbon-cement>.

Ministry of Infrastructure and the Environment; Ministry of Economic Affairs (2016): *A circular economy in the Netherlands by 2050. Government-wide Programme for a circular economy.* Abrufbar unter https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/17037circulairereconomie_en.pdf.

Ministry for an Ecologic and Solidary Transition (2018): *50 measures for a 100% circular economy.* Abrufbar unter <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/FREC%20anglais.pdf>.

Mission Possible Partnership (2022): *Making Net-Zero Steel Possible. Eine von der Industrie unterstützte, auf 1,5 ausgerichtete Übergangsstrategie.* Abrufbar unter <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf>.

Mission Possible Partnership (2023): *Sector Transition Strategy for Cement and Concrete*, wird im Laufe des Jahres 2023 veröffentlicht.

Moynihan, M.; Allwood, J. (2014): *Utilization of structural steel in buildings*, Proc R Soc A. 470. Abrufbar unter <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rspa.2014.0170>.

Müller, C. (2012): *Verwendung von Zement in Beton nach der europäischen Norm EN 206-1.* Abrufbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404812000028>.

Müller, R. (2017): *Sofa statt Schreibtisch.* Süddeutsche Zeitung. Abrufbar unter <https://www.sueddeutsche.de/geld/umnutzung-sofa-statt-schreibtisch-1.3695381>.

NABU (2021): *Kreislaufwirtschaft in Deutschland.* Abrufbar unter <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/kreislaufwirtschaft/29818.html#:~:text=In%20Deutschland%20>

werden%20jährlich%20rund,3%20Milliarden%20Tonnen%20Rohstoffe%20verbraucht.

Pauliuk, S.; Heeren, N. (2020): *Materialeffizienz und ihr Beitrag zum Klimaschutz in Deutschland: A deep decarbonization scenario analysis until 2060.* Journal of Industrial Ecology, 25 (2), 479–493. Abrufbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.13091>.

Petrochemicals Europe (2021): *Cracker Capacity.* Abrufbar unter <https://www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/petrochemicals-facts-and-figures/cracker-capacity/>.

Prakash, S.; Löw, C.; Dehoust, G.; Gascón Castellero, L.; Katharina, H.; Manhart, A.; Jacob, K.; Fiala, V.; Helleckes, H. (2023): *Modell Deutschland Circular Economy – Politik Blueprint.* Studie des Öko-Institut und der FU Berlin im Auftrag von WWF Deutschland. Abrufbar unter <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Modell-Deutschland-Circular-Economy-Politik-Blueprint.pdf>.

Scrivener, K.; Martirena, F.; Bishnoi, S.; Maity, S. (2018): *Calcinierte Tonkalksteinelemente (LC3). Cement and Concrete Research.* Abrufbar unter [https://www.deval.org/Pdf/L2_SixThemePdfs/Calcined_clay_limestone_cements_\(LC3\).pdf](https://www.deval.org/Pdf/L2_SixThemePdfs/Calcined_clay_limestone_cements_(LC3).pdf).

Souza, E. (2020): *Betonplatten mit Blasen? Wie biaxial entlüftete Platten funktionieren.* Abrufbar unter <https://www.archdaily.com/946153/concrete-slabs-with-bubbles-how-biaxial-voided-slabs-work>.

SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP (2021): *Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit.* Abrufbar unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/1f422c60505b6a88f8f3b3b5b8720bd4/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>.

Stadtplanungsamt Düsseldorf (2014): *Thyssen-Trade-Center*. Abrufbar unter <https://www.duesseldorf.de/stadtplanungsamt/projektuebersicht/bauungsplaene/thyssen-trade-center.html>.

Störmer Murphy and Partners (2022): *Roots Hamburg – Deutschlands höchstes Holzhochhaus*. Abrufbar unter <https://www.stoermer-partner.de/en/roots/>.

Systemiq (2022): *ReShaping Plastics – Pathways to a Circular, Climate Neutral Plastics System in Europe*. Abrufbar unter <https://www.systemiq.earth/reshaping-plastics/>.

Systemiq (2023): *Kreislauffähigkeit von PET/Polyester-Verpackungen und Textilien in Europa – Synthese veröffentlichter Forschungsergebnisse*. Abrufbar unter <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2023/02/Systemiq-PET-Circularity-Europe-Synthesis-Report-High-Res.pdf>.

U.S. Department of Transportation (2016): *Zusätzliche zementhaltige Materialien. Best Practices for Concrete Pavements*. Tech Brief. Abrufbar unter <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif16001.pdf>.

Uekert, T.; Singh, A.; DesVeaux, J. S.; Ghosh, T.; Bhatt, A.; Yadav, G.; Afzal, S.; Walzberg, J.; Knauer, K. M.; Nicholson, S. R.; Beckham, G. T. (2023): *Technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Vergleich von Closed-loop-Recyclingtechnologien für gängige Kunststoffe*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. Abrufbar unter <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acssuschemeng.2c05497>.

Umweltbundesamt (2019): *Substitutionsquote. Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft!*. Abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/190722_uba_kommp_substitutionsquote_bf.pdf.

Umweltbundesamt (2020): *RESCUE – Ressourcen-effiziente Wege zur Treibhausgas-Neutralität*. Abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/climate-energy/climate-protection-energy-policy-in-germany/rescue-resource-efficient-pathways-to-greenhouse#background>.

Umweltbundesamt (2022a): *Indikator: Treibhausgasemissionen*. Abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/en/data/environmental-indicators/indicator-greenhouse-gas-emissions>.

Umweltbundesamt (2022b): *Überprüfung der Wirksamkeit des § 21 VerpackG und Entwicklung von Vorschlägen zur rechtlichen Weiterentwicklung*. Abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_118-2022_ueberpruefung_der_wirksamkeit_des_ss_21_verpackg_und_entwicklung_von_vorschlaegen_zur_rechtlichen_weiterentwicklung.pdf.

Umweltbundesamt (2023a): *Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib*. Abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib>.

Umweltbundesamt (2023b): *Wohnfläche*. Abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#:~:text=Die%20Wohnfl%C3%A4che%20pro%20Kopf%20nahm,Pro%2DKopf%2DWohnfl%C3%A4che%20f%C3%BChrte>.

University of Cambridge (2019): *Steel Arising: Opportunities for the UK in a transforming global steel industry*. Abrufbar unter <https://www.repository.cam.ac.uk/bitstream/handle/1810/294350/STEEL-ARISING%202019.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

van der Hulst, M. K.; Ottenbros, A. B.; van der Drift, B.; Ferjan, Š.; van Harmelen, T.; Schwarz, A. E. u. a. (2022): *Treibhausgasvorteile durch direktes chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen*. Resources, Conservation and Recycling, 186, 106582. Abrufbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922004165>.

VCI – Verband der Chemischen Industrie (2023): *Chemiewirtschaft in Zahlen 2022*. Abrufbar unter <https://www.vci.de/vci-online/die-branchen-zahlen-berichte/chemical-industry-in-figures-online.jsp>.

VDZ – Verein Deutscher Zementwerke (2022a): *Zementindustrie im Überblick 2022/2023*. Abrufbar unter https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ_Zementindustrie_im_Ueberblick_2022-2023.pdf.

VDZ – Verein Deutscher Zementwerke (2022b): *Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien*. Abrufbar unter <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/ressourcen-der-zukunft-fuer-zement-und-beton-potenziale-und-handlungsstrategien>.

Winter, C; Schröter, B; Fidaschek, S. (2022): *Die deutsche Zementindustrie als CO₂-Quelle für andere Industrien*. Fuels. 2022; 3(2): 342-352. Abrufbar unter <https://doi.org/10.3390/fuels3020021>.

Wolf, T.; Untergutsch, A.; Wensing, C; Mittelbach, H.; Lu-Pagenkopf, F.; Kellenberger, D.; Kubowitz, P. (2020): *Potenziale von Bauen mit Holz*. Umweltbundesamt. Abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_10_29_texte_192_2020_potenziale_von_bauen_mit_holz_aktualisiert.pdf.

World Steel Association (2022): *Sustainability Indicators Report 2022*. Abrufbar unter <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-2022-report-1.pdf>.

WWF; Systemiq (2021): *Brennende Fragen – Wege zu einem Kreislaufsystem für Kunststoffverpackungen in Deutschland*. Abrufbar unter https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2021/08/210816_WWF_Verpackungsstudie_EN_sr.pdf.

Yap, C. Y.; Chua, C. K.; Dong, Z. L.; Liu, Z. H.; Zhang, D. Q.; Loh, L. E.; Sing, S. L. (2015): *Review of selective laser melting: Materials and applications*. Applied Physics Reviews, 2(4). Abrufbar unter <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4935926>.

Publikationen von Agora Industrie

AUF DEUTSCH

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

Publikationen von Agora Industrie

AUF ENGLISCH

Ensuring resilience in Europe's energy transition

The role of EU clean-tech manufacturing

Levelised cost of hydrogen

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

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

Argentina as a hub for green ammonia

A forward-looking development strategy for addressing the global energy and climate crises

Transforming industry through carbon contracts (Steel)

Analysis of the German steel sector

Power-2-Heat

Gas savings and emissions reduction in industry

International climate cooperation for energy-intensive industry

A (realistic) proposal

12 Insights on Hydrogen

Mobilising the circular economy for energy-intensive materials (Executive Summary)

How Europe can accelerate its transition to fossil-free, energy-efficient and independent industrial production

Mobilising the circular economy for energy-intensive materials (Study)

How Europe can accelerate its transition to fossil-free, energy-efficient and independent industrial production

Getting the Transition to CBAM Right

Finding pragmatic solutions to key implementation questions

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

Über Agora Industrie

Agora Industrie erarbeitet unter dem Dach von Agora Energiewende Strategien und Politikinstrumente für eine Transformation der Industrie zur Klimaneutralität – in Deutschland, Europa und international. Agora Industrie agiert unabhängig von wirtschaftlichen und parteipolitischen Interessen und ist ausschließlich dem Klimaschutz verpflichtet.



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

Agora Industrie

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-industrie.de

info@agora-industrie.de

