



Mobilisierung der Kreislaufwirtschaft für energieintensive Materialien

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

Zusammenfassung

Die Autoren:

Oliver Sartor
Nelly Azais
Helen Burmeister
Paul Münnich
Camilla Oliveira
Wido Witecka

256/01-ES-2022/DE

März 2022

Liebe Leserin, lieber Leser,

Russlands Krieg gegen die Ukraine hat die Dringlichkeit für Europa dramatisch erhöht, die Nutzung fossiler Brennstoffe zu reduzieren und energieeffizienter zu werden. Für die Rohstoffbasis der heimischen Industrie bedeutet dies den notwendigen Übergang von einer importbasierten, fossilen zu einer lokaleren, erneuerbaren Versorgung. Eisen und Stahl, Aluminium, Zement und Kalk sowie Kunststoffe verursachen bei deren Produktion 70 Prozent der industriellen Emissionen und machen einen wachsenden Anteil des Energieverbrauchs und der Verwendung fossiler Brennstoffe in der EU aus. Bestehende Ansätze konzentrieren sich in der Regel auf die Verringerung der Kohlenstoffintensität der

Primärproduktion. Zum Erreichen der Klimaneutralität braucht es jedoch Energie- und Ressourceneffizienz gleichermaßen. Kreislaufwirtschaft und materialeffiziente Wertschöpfungsketten sind zentrale Elemente, um die Transformationskosten zu senken und das Klimaneutralitätsziel 2050 zu erreichen.

Unterstützend wirken dabei die langfristig angelegten wirtschaftlichen Stärken der EU wie Digitalisierung, zukunftsorientierte Fertigungstechnologien sowie modernste Logistikkonzepte.

Ich wünsche eine anregende Lektüre!

Ihr Frank Peter
Direktor, Agora Industrie

Ergebnisse auf einen Blick:

1	Die aktuelle Energiekrise macht es zwingend erforderlich, die Abhängigkeit der EU von fossilen Brennstoffen und importierten Rohstoffen zu verringern. Allein die industrielle Produktion von Kunststoffen, Stahl, Aluminium und Zement machen 13 Prozent des jährlichen Energieverbrauchs und 581 Mt der jährlichen Emissionen aus. Zudem importiert die EU sehr große Mengen an Gas, Öl und Kohle, um Kunststoffe und andere energieintensive Materialien herzustellen.
2	Verbessertes Recycling und höhere Materialeffizienz bergen sowohl kurz- als auch langfristig ein enormes ungenutztes Potenzial für den Übergang zu einer fossilfreien Produktion von energieintensiven Materialien. Mit ambitionierten Politikmaßnahmen könnten die jährlichen Industrieemissionen in der EU bis 2030 um bis zu 10 Prozent (70 Mt) und bis 2050 um 34 Prozent (239 Mt) gegenüber denen von 2018 reduziert werden. Allein bei der Kunststoffherstellung könnten bis 2030 jährlich fossile Brennstoffe im Umfang von etwa 2,7 Milliarden Kubikmetern Gas und 149 Millionen Barrel Öl eingespart werden.
3	Der Realisierung dieser Vermeidungs- und Einsparpotenziale muss eine Priorität in neuen EU-Rechtsvorschriften zur Kreislaufwirtschaft eingeräumt werden. Um Energiesicherheit und Klimaneutralität in Einklang zu bringen, muss die Gesetzgebung die Nachfrage nach hochwertigem Recycling ankurbeln und gleichzeitig die Sammlung hochwertiger Rezyklate intensivieren und das Angebot steigern. Erforderliche Politikinstrumente sind erweiterte Quoten für recycelte Bestandteile, Investitionshilfen für die rasche Einführung innovativer Recyclingtechnologien sowie Kennzeichnungs- und Best-Practice-Vorgaben für Sammlung, Sortierung, Recycling und Wiederverwendung.
4	Die EU-Mitgliedstaaten können schon heute wichtige Politikmaßnahmen umsetzen, die die Treibhausgasemissionen bereits innerhalb der nächsten ein bis fünf Jahre wirksam reduzieren. Beispiele hierfür sind ein umfassenderes Verbot von Einweg- und nicht wiederverwertbaren Kunststoffen, die Einführung von Pfandsystemen für Kunststoffverpackungen, Investitionen in die Nachsortierung und moderne Recyclingverfahren.

Inhalt

Wichtigste Schlussfolgerungen und Empfehlungen	4
Highlights pro Produkt und Wertschöpfungskette	10
Stahl	10
Aluminium	10
Kunststoffe	11
Zement und Beton	13
Materialeffizienz und Substitution	13

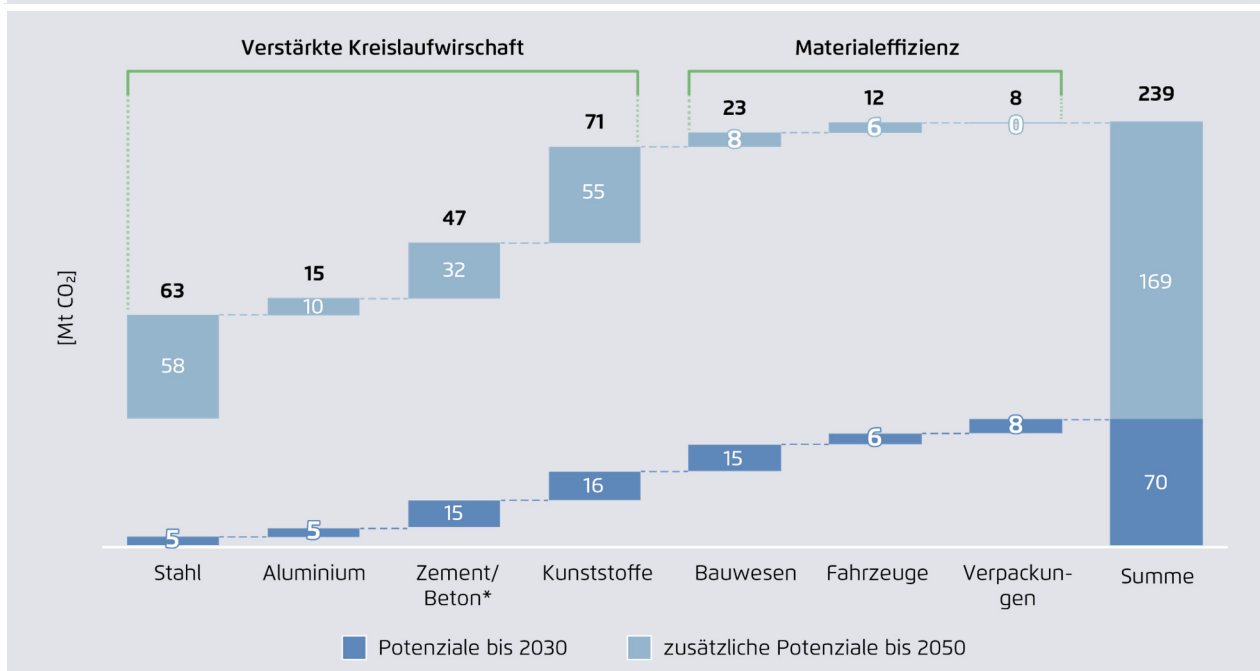
Wichtigste Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Russlands Krieg gegen die Ukraine an der Grenze zur Europäischen Union hat die Bedeutung der europäischen Energie- und Klimapolitik in den Vordergrund gerückt. Während der Klimaschutz nach wie vor dringlich ist, haben die aktuellen Sicherheits- und Energiekrisen deutlich gemacht, wie abhängig Europa von der Einfuhr fossiler Energieträger und anderer wichtiger Rohstoffe ist. Die EU muss ihre Bemühungen nicht nur um eine Verringerung der Importe fossiler Energieträger, sondern auch um eine intelligentere und effizientere Nutzung ihrer begrenzten Energie- und Materialressourcen verstärken.

In diesem Zusammenhang müssen Maßnahmen zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft und der Materialeffizienz ein zentraler Bestandteil der Strategie für den Übergang zu einer klimaneutralen Industrie werden. Dies würde nicht nur den Übergang zu einer fossilfreien Produktion von Grundstoffen beschleunigen, sondern die Industrie auch ressourceneffizienter und strategisch unabhängiger machen.

Politische Entscheidungsträger:innen erkennen zunehmend die Notwendigkeit, den Übergang zu einer klimaneutralen Produktion von CO₂-intensiven Materialien – wie Stahl, Aluminium, Zement und Kunststoffen – zu fördern. In Europa entfallen auf diese Sektoren jährlich etwa 581 Millionen Tonnen

Abbildung ES1: Geschätzte Emissionsminderungspotenziale durch verbesserte Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz nach Material oder Produkt in den Jahren 2030 und 2050



*Die Zahlen für Zement und Beton spiegeln die kombinierten Potenziale aus der Rückführung und Rekarbonisierung von Zement und klinkerarmen Betonrezepturen wider. Quelle: Agora Industrie (2022), basierend auf Modellierungswerkzeugen von Material Economics

Anmerkung: Diese Emissionsminderungspotenziale werden im Vergleich zu einem Referenzszenario auf der Grundlage von *Business-as-usual* geschätzt. Da die Potenziale der Kreislaufwirtschaft und der Materialeffizienz als Ersatz für (und somit zusätzlich zu) anderen Emissionsreduzierungen in diesen Wertschöpfungsketten durch neue, kohlenstoffärmere Produktionstechnologien betrachtet werden, werden in dieser Baseline die heutigen CO₂-Intensitäten der Produktion für die relevanten Materialien und Produkte verwendet.

CO₂-Äquivalente – das sind rund 70 Prozent der jährlichen Industrieemissionen in der EU.

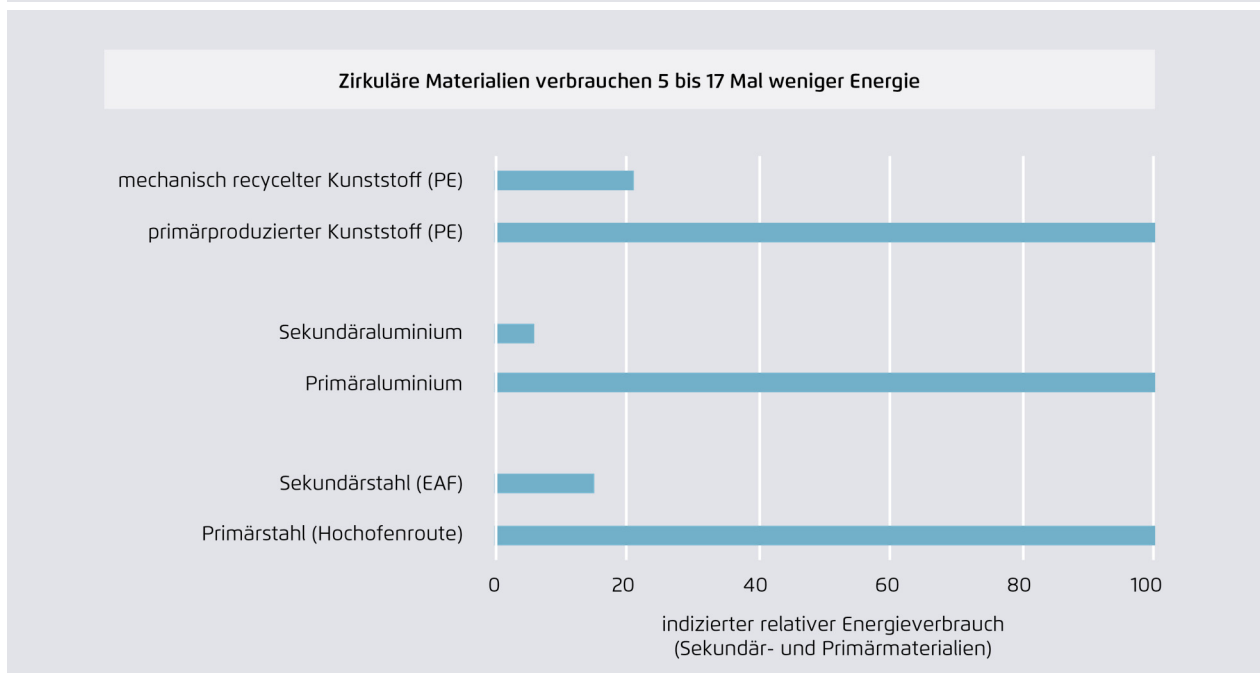
Allerdings sind diese Sektoren auch sehr energie- und ressourcenintensiv. Im Jahr 2020 entfielen 26 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs in der EU auf die Industrie, wovon allein auf diese vier Sektoren etwa 50 Prozent – oder 13 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs – entfielen. Sie verbrauchten Erdgas in Höhe von 41 Millionen Tonnen Öläquivalent (Mtoe), Erdölprodukte in Höhe von 14 Mtoe und feste fossile Brennstoffe wie Kokskohle im Wert von 9 Mtoe.

Bislang konzentrierten sich die sich abzeichnenden politischen Bemühungen zur Dekarbonisierung dieser Industriezweige vor allem auf die Verringerung der Emissionen aus der Produktion von Primärmaterialien (zum Beispiel durch die Verwendung von

grünem Wasserstoff). Dies ist notwendig, aber die Herausforderung dabei sind, dass neue Verfahren zur Primärproduktion von Rohstoffen ohne fossile Brennstoffe zwar die CO₂-Emissionen verringern, aber auch den Bedarf an Erneuerbaren Energien erhöhen.

Die verbesserte Kreislaufführung von Materialien sowie Materialeffizienz bieten ein ebenso großes Potenzial zur Verringerung der Emissionen wie auch zur Minderung des Energieverbrauchs von CO₂-intensiven Grundstoffmaterialien. Auf der Emissionsseite könnte allein die verbesserte zirkuläre und effiziente Nutzung von Werkstoffen bis 2030 bis zu 70 Millionen Tonnen und bis 2050 bis zu 239 Millionen Tonnen CO₂ einsparen, was 10 Prozent beziehungsweise 34 Prozent der gesamten erforderlichen industriellen Emissionsminderungsmaßnahmen in der EU bis 2030 beziehungsweise 2050 entspricht

Abbildung ES2: Relative Energieeinsparungen durch verbesserte Kreislauffähigkeit von Materialien (aktuelle Technologien)



Quelle: Agora Industrie (2022)

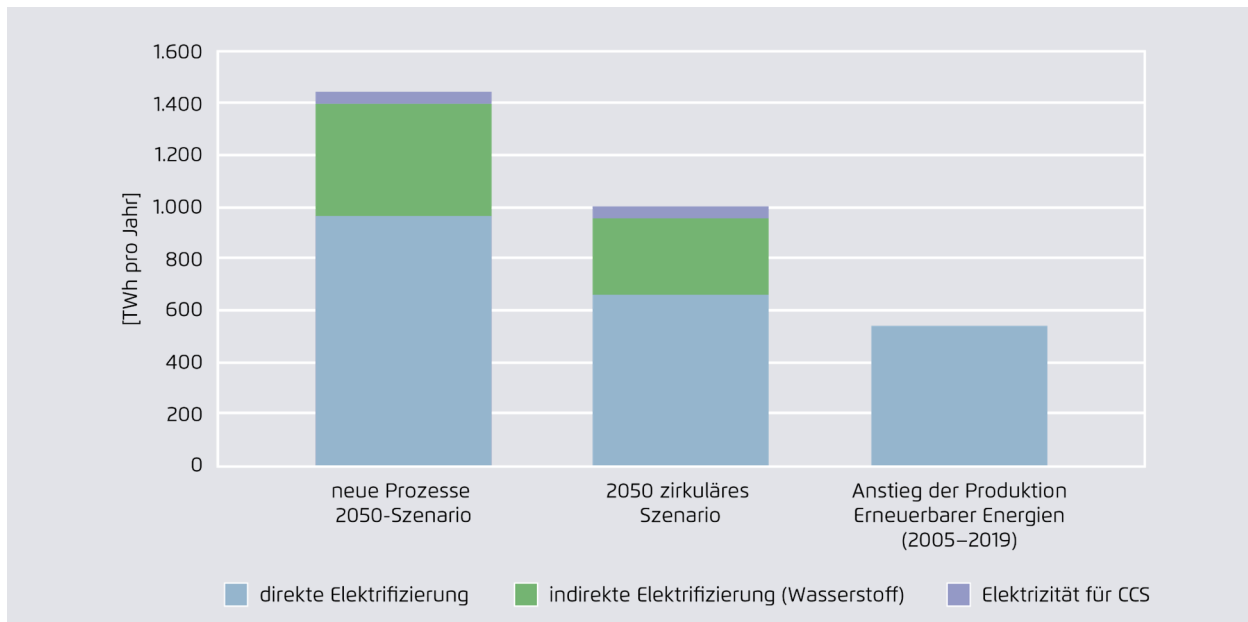
(Abbildung ES1 und Tabelle ES1). Diese Reduktionen wären somit zusätzlich und ergänzend zu anderen Maßnahmen zur Minderung der Emissionen aus der Primärproduktion unter Einsatz neuer, sauberer Technologien.¹ Abbildung ES1 zeigt, dass das CO₂-Vermeidungspotenzial bereits 2030 beträchtlich, aber mit mehr Zeit für Anpassungen bis 2050 sogar noch größer ist.

Auf der Energie- und Grundstoffnachfrageseite würde ein stärker an der Kreislaufwirtschaft und der Materialeffizienz orientierter Grundstoffsektor die Energie- und Ressourceneffizienz ebenfalls erheblich verbessern. Wie in Abbildung ES2 hervorgehoben wird, kann der Energieverbrauch durch rezyklierte Stahl-, Aluminium- oder Polyethylen-(PE-)

Produkte im Vergleich zu den heutigen primären Produktionsprozessen je nach Verfahren um einen Faktor zwischen 5 und 17 gesenkt werden. Dies trägt also dazu bei, den Verbrauch fossiler Brennstoffe zu senken.

Vorläufige Schätzungen von Agora Industry deuten darauf hin, dass durch die Ausschöpfung des gesamten Potenzials für verbesserte Kunststoffeinsparungen und -recycling, wie es in dem Bericht dargelegt wird, bis zum Jahr 2030 (im Vergleich zu den derzeitigen politischen Rahmenbedingungen) rund 149 Barrel Öl bei der Verwendung von Kohlenwasserstoffen auf Ölbasis in der EU eingespart werden könnten. Die Verwendung von aus Erdgas gewonnenen Kohlenwasserstoffen wie Ethan, Propan und

Abbildung ES3: Zusätzlicher Energiebedarf für die Dekarbonisierung von Stahl, Zement und Chemikalien (Szenarien mit hoher vs. niedriger Zirkularität)



Quelle: Agora Industrie (2022), auf Basis von Daten von Material Economics (2019) und Eurostat (2021)

1 Da diese Maßnahmen zusätzlich und ergänzend zu anderen Vermeidungsmaßnahmen sind, werden die Maßnahmen für verbesserte Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz im Verhältnis zu einer "Business-as-usual"-

Basislinie berechnet werden, die die aktuelle CO₂-Intensitäten der Produktion widerspiegelt.

Butan in der EU könnte ebenfalls bis 2030 um etwa 2,7 Milliarden Kubikmeter (bcm) und bis 2050 um deutlich größere Mengen reduziert werden.

Klimaneutrale Primärproduktionsverfahren sind im Allgemeinen energieintensiver als konventionelle Verfahren (aufgrund des Wasserstoffverbrauchs und des Energieeinsatzes für Kohlenstoffabscheidung sowie -speicherung). Mittel- und längerfristig würde eine zirkulärere und effizientere Nutzung von Materialien den Bedarf für die Primärproduktion reduzieren, und dadurch den Gesamtenergieverbrauch senken. Es ist entscheidend, den Anstieg des Verbrauchs Erneuerbarer Energie dort, wo es möglich ist, zu begrenzen. In den Sektoren Stahl, Zement und Chemie hat eine verstärkte Kreislaufwirtschaft das Potenzial, den Gesamtbedarf an erneuerbarem Strom bis 2050 um mehr als 400 Terrawattstunden jährlich zu senken – das entspricht der jährlichen Produktion von etwa 60.000 Windrädern.² Wie Abbildung ES3 darstellt, entspricht dies einer Nettoenergieeinsparung von bis zu einem Drittel im Vergleich zu einem hauptsächlich auf der klimaneutralen Primärproduktion und nur wenig auf Zirkularität basierendem Szenario.

Daher kann die europäische Industrie den erfolgreichen Übergang zur Klimaneutralität bis 2050 nicht erfolgreich bewältigen, wenn sie nicht das gesamte CO₂-Minderungs- und Energieeinsparungspotenzial eines wirklich zirkulären und ressourceneffizienten Industriesektors ausschöpft. Es ist notwendig, dass die EU sauberen Wasserstoff für neue, fossilfreie Industrieprozesse und größere Mengen sauberen Stroms für die Elektrifizierung und die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) entwickelt oder Biomasse als Rohstoff in spezifischen *No-regret*-Anwendungen einsetzt. Dennoch ist die Nutzung des Potenzials einer verbesserten,

qualitativ hochwertigen Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz von entscheidender Bedeutung, um technische Engpässe zu vermeiden und die Kosten zu verringern, die mit der Skalierung der Infrastruktur für eine umweltfreundlichere Primärproduktion einhergehen.

Darüber hinaus ist ein stärker an der Kreislaufwirtschaft orientierter und ressourceneffizienter Industriesektor wettbewerbsfähiger und stellt eine große industriepolitische Chance für Europa dar. Wenn man die strukturellen Risiken höherer relativer Energiekosten in Europa im Vergleich zu denen künftiger Wasserstoff-Supermächte bedenkt, kann die Nutzung der eigenen günstigen und reichlich vorhandenen Schrott- und Abfallressourcen der EU ein Mittel sein, um in energieintensiven Sektoren sowohl kostenmäßig wettbewerbsfähig zu bleiben als auch umweltfreundlich zu agieren. Eine weitere Chance für die EU und ihre Mitgliedstaaten, ihre industriellen Wettbewerbsvorteile auszuspielen, besteht darin, die Nachfrage nach nachhaltigeren und kreislauforientierten Industrie- und Konsumgütern zu nutzen, zum Beispiel durch die Entwicklung neuer Technologien, Logistik und Produkte mit hohem Mehrwert. Bis jetzt haben Maßnahmen zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft und der Effizienz von Materialien nicht die erforderliche Aufmerksamkeit erhalten. Die Politik zur Dekarbonisierung der Industrie, sowohl auf EU-Ebene als auch auf Ebene der Mitgliedstaaten, scheint zu wenig integriert zu sein – ein Arbeitsstrang beschäftigt sich mit der Verringerung der Emissionen aus der Industrie durch die Dekarbonisierung der Primärproduktion, ein anderer mit der Kreislaufwirtschaft im weiteren Sinne, vernachlässigt werden aber die Potenziale für CO₂-Minderung, Energieeffizienz und strategische industrielle Unabhängigkeit.

2 Dabei wird von einer durchschnittlichen Kapazität von 2 GW und einem jährlichen Auslastungsfaktor von 0,38 ausgegangen.

Im Großen und Ganzen ist die derzeitige Kreislaufwirtschaft für CO₂-intensive Materialien in Europa bei Weitem nicht das, was sie auf den ersten Blick zu sein scheint:

- **Downcycling ist allgegenwärtig:** 70 bis 85 Prozent des Stahls, des Aluminiums und sogar des Betons sind heute technisch als *recycelt* definiert, werden aber nicht in dem Umfang als Primärmaterial wiederverwendet. Grund dafür ist ein *Downcycling* der Materialien, was dringend geändert werden muss.
- **Politische Maßnahmen konzentrieren sich auf die Quantität und nicht auf die Qualität des Recyclings:** Während das erste EU-Paket zur Kreislaufwirtschaft einige bedeutende Fortschritte bei der Bekämpfung von Verpackungsabfällen, insbesondere bei Kunststoffen, gemacht hat, wurde der Verbesserung der *Qualität* des Recyclings anderer CO₂-intensiver Grundstoffe wie Stahl, Aluminium, Zement und Beton kaum Aufmerksamkeit geschenkt. Insbesondere die Wertschöpfungsketten im Baugewerbe und in der Automobilindustrie erfordern eine wesentlich höhere Qualität des Recyclings.
- **Die Statistiken über das Kunststoffrecycling sind unvollständig** und daher unzuverlässig: Während die EU heute Recyclingquoten in der Größenordnung von 35 Prozent angibt, werden mit den aktuellen Daten und den verwendeten statistischen Methoden *schätzungsweise 50 Prozent* aller Kunststoffabfälle am Ende ihrer Lebensdauer *nicht erfasst* (Material Economics, 2022: *Europe's Missing Plastics*). Die korrekte Recyclingquote für Kunststoffabfälle in der EU liegt daher eher bei 15 Prozent.
- **Für Materialeffizienz gibt es kaum Anreize:** Neuschrott wird in der Regel als recyceltes Material definiert, obwohl der Schwerpunkt auf dem hochwertigen Recycling von *Post-Consumer-Schrott* liegen sollte, während die Produktion von Neuschrott nicht gefördert werden sollte.

Der laufende Prozess zur Umsetzung des zweiten europäischen Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft (CEAP2) ist eine gute Gelegenheit, um diese Probleme in den europäischen Rechtsvorschriften für Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Produkte zu berücksichtigen. Gleichzeitig erfordert die Komplexität der lokalen Probleme, dass auch die Mitgliedstaaten eine starke Rolle übernehmen.

Es gibt kein Patentrezept. Vielmehr ist ein Bündel von Maßnahmen erforderlich, um die heutigen Hindernisse für das Angebot und die Nachfrage nach hochwertigen recycelten und wiederverwendbaren Materialien zu beseitigen. Die neun wichtigsten Prioritäten für politische Entscheidungsträger:innen sind in Kasten ES1 zusammengefasst.

Oberste Priorität hat die Schaffung von Märkten für die verbesserte Kreislaufwirtschaft von wichtigen CO₂-intensiven Materialien in den wichtigsten Verwendungsbereichen. Quoten für den Recyclinganteil von Verpackungen, Neufahrzeugen und neuen Gebäuden haben sich als das wirksamste Instrument zur Ankurbelung geschlossener Wertschöpfungsketten erwiesen. Indem sie die Nachfrage garantieren, fördern Quoten frühzeitige Investitionen in verbesserte hochwertige Recycling-Wertschöpfungsketten – im Gegensatz zu den heute üblichen Praktiken.

Grenzwerte für eingebetteten Kohlenstoff für Gebäude sowie für Fahrzeuge und Verpackungen sollten als mittel- beziehungsweise längerfristige Strategie entwickelt werden. Eingebettete Kohlenstoffgrenzwerte sind bei der Förderung eines klimafreundlichen und materialeffizienten Designs wirksamer als eine direkte Regulierung, zum Beispiel durch Ökodesign-Maßnahmen.

Um das Potenzial der Kreislaufwirtschaft über die Zeit hinweg voll auszuschöpfen, sind ergänzende politische Maßnahmen erforderlich.

Kasten ES1: Politische Schlüsselmaßnahmen für die Schaffung hochgradig zirkulärer und ressourceneffizienter Märkte für energieintensive Materialien

Politikmaßnahmen zur Schaffung von Märkten

1. Ausweitung der Verwendung von Recyclingquoten auf eine breitere Palette von Kunststoffprodukten (nicht nur PET-Flaschen); auf Stahl, Aluminium und Kunststoffe in Fahrzeugen und auf Betonmaterialien, die in öffentlichen Bauvorhaben verwendet werden.
2. Begrenzung der eingebetteten Lebenszyklus-Kohlenstoffemissionen von Baumaterialien in neuen Gebäuden, Fahrzeugen und Verpackungen.
3. Bessere Mobilisierung der CO₂-Preise: Einbeziehung der Abfallverbrennung in das EU-Emissionshandelssystem (EHS), schrittweiser Übergang von der kostenlosen Zuteilung zur vollständigen Versteigerung und Einführung eines Grenzausgleichsmechanismus (CBAM), um die Preisanreize für recycelte Materialien zu verstärken.
4. Reform der Produktstandards für Materialien zur Beseitigung bestehender Innovationshemmnisse für CO₂-effiziente oder recycelte Werkstoffe (insbesondere Beton und Kunststoffe) auf europäischer und, falls erforderlich, nationaler Ebene.
5. Verbot der Ausfuhr von EU-Abfällen in Länder, die keine gleichwertig strengen Recyclingziele und -praktiken verfolgen (über die vergleichsweise lockeren Beschränkungen hinaus, die derzeit für OECD-Länder gelten).

Unterstützende Maßnahmen zur Maximierung des Angebots an hochwertigen recycelten Materialien

6. Überprüfung der Messung der Recyclingquoten, insbesondere für Kunststoffe am Ende des Lebenszyklus, auf der Grundlage von *Bottom-up*-Analysemethoden, um die nicht gezählten Fehlallokationen von Kunststoffabfällen zu berücksichtigen und die derzeitigen Recyclingquoten und -ziele zu überarbeiten.
7. Massive Ausweitung der Unterstützung für Schlüsseltechnologien in der Kreislaufwirtschaft und neue Primärproduktionsrouten für die energieintensive Industrie.
8. Einführung der Anforderung einer *Best-Practice*-Infrastruktur für die Abfallsammlung und der besten verfügbaren Technologien für die Materialsortierung in der Recyclinganlage, einschließlich der Nachsortierung von gemischten Abfällen, um die bis zu 75 Prozent der recycelbaren Kunststoffe im Gemisch zu extrahieren und dem Recycling zuzuführen.
9. Kennzeichnung, Besteuerung oder Verbot ineffizienter Materialverwendung und Abfallbewirtschaftungspraktiken, einschließlich der übermäßigen Verwendung von Verpackungen, des Verkaufs von kurzlebigen Produkten, der Verbrennung von unsortiertem Plastikmüll und des Schredderns von Fahrzeugen vor der Entfernung des Kupferinhalts.

Highlights pro Produkt und Wertschöpfungskette

Stahl

Rund 86 Prozent des Stahls werden heute recycelt, wobei der größte Teil davon aufgrund der Verunreinigung des Stahlschrotts mit Kupfer und anderen Elementen qualitativ herabgestuft wird. Unsere Modellrechnungen deuten darauf hin, dass in der EU über das Jahr 2030 hinaus eine wachsende Menge an Stahlschrott verfügbar sein wird. Die Kupferverunreinigung des neu verfügbaren Schrotts schränkt jedoch das Ausmaß ein, indem Sekundärstahl Primärstahl ersetzen kann. Bis etwa 2040 bis 2050 könnten bis zu 35 Millionen Tonnen pro Jahr an Primärstahl durch sauberen Schrott ersetzt werden. Dies entspräche in etwa einer CO₂-Minderung von 63 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr in der EU.

Saubere Schrottströme würden mindestens folgende Maßnahmen erfordern:

- Förderung der Entwicklung und des Einsatzes fortschrittlicher Technologien zur Entfernung von Kupfer aus Stahl;
- Abschaffung ineffizienter Recyclingpraktiken am Ende des Lebenszyklus, um das Schrottangebot in der EU insgesamt zu maximieren und gleichzeitig saubere Schrottströme zu erhalten;
- Entwicklung integrierter Direktreduktions- (DRI) und Elektrolichtbogenofen- (EAF) Produktionstechnologien, um die Einbindung hoher Schrottanteile in integrierte primäre und sekundäre Stahlproduktionsrouten zu erleichtern, und Entwicklung von EAF-Mini-Mühlen zur Verarbeitung wachsender Stahlschrottmengen zu einer Reihe verschiedener Stahlprodukte.

Saubere Schrottströme werden einer der wichtigsten Faktoren – wenn nicht sogar *der* wichtigste – für die Wettbewerbsfähigkeit der künftigen EU-Stahlindustrie sein. Derzeit konzentrieren sich die Stahlhersteller in der EU in erster Linie auf die

Umstellung auf wasserstoffbasierte Primärerzeugungsrouten. Langfristig wird die Wettbewerbsfähigkeit der wasserstoffbasierten DRI-Produktion jedoch in erster Linie von den Kosten für die Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff abhängen. Es wird erwartet, dass die heutigen Eisenerzexporteure wie Australien und Brasilien, die über ein großes Potenzial an Erneuerbaren Energien verfügen, bald auf die Produktion und den Export von grünem DRI umsteigen könnten. Die heimischen Ressourcen an sauberem Schrott für die Herstellung hochwertiger Stahlsorten werden daher einer der wichtigsten Wettbewerbsfaktoren für die europäische Stahlindustrie sein. Da die sekundäre Stahlproduktion etwa fünf- bis sechsmal energieeffizienter ist als die derzeitige Primärproduktion, wird sie auch die klimaneutrale Umstellung der EU-Stahlindustrie erleichtern und gleichzeitig ihre Wettbewerbsfähigkeit erhalten.

Aluminium

Aluminium ist ein relativ neuer Werkstoff, der sowohl in kurzlebigen Anwendungen wie Lebensmittelverpackungen und Folien als auch in langlebigeren Anwendungen wie dem Baugewerbe und Fahrzeugen eingesetzt wird. Im Jahr 2019 erreichten 5 Millionen Tonnen Aluminium das Ende des Lebenszyklus; davon wurden etwa 3 Millionen Tonnen recycelt. Die Sekundäraluminiumproduktion emittiert deutlich weniger als die herkömmliche Primärproduktion: 0,3 Tonnen CO₂ pro Tonne gegenüber 13 bis 16 Tonnen CO₂.

Wichtig ist, hohe Sammelquoten zu erreichen. Die Sicherstellung sauberer Schrottströme zur Begrenzung des Downcyclings bedeutet, dass Legierungen identifiziert und nach ihren jeweiligen Qualitäten für verschiedene Aluminiumsorten und Verwendungszwecken sortiert werden. Mit der Zeit werden die ansteigenden Mengen an Aluminium, die das Lebensende erreichen, das Potenzial für hochwertiges Recycling in Europa auf ein erhebliches Niveau anheben.

Zur Realisierung sauberer Stoffströme sind folgende Maßnahmen erforderlich:

- Unterstützung der raschen Entwicklung und Einführung fortschrittlicher Sortiertechnologien für Post-Verbraucher-Schrott als eine der wichtigsten und prioritärsten Klimaschutztechnologien;
- Design von Produkten wie Dosen, Fahrzeugen, elektronischen Geräten, IT-Gütern und Bauprodukten, um den Rückbau, die Sortierung und das Recycling zu erleichtern und Verunreinigungen zu minimieren;
- Abschaffung ineffizienter Recycling-Praktiken am Ende des Lebenszyklus: Die derzeitigen Recycling-Praktiken wie das Schreddern von Autos oder die nicht getrennte Sammlung von Bau- und anderen Abfällen können verbessert werden, um saubere Aluminiumströme zu erhalten.

Qualitativ hochwertiges Recycling würde nicht nur die CO₂-Emissionen erheblich reduzieren und deutlich weniger saubere Energie erfordern als die Primärproduktion, sondern auch dazu beitragen, dass die Industrie einen Wettbewerbsvorteil behält, indem sie künftige Herausforderungen meistert, wie zum Beispiel:

- Der Verlust von Märkten für Downcycling-Produkte: Mit der Elektrifizierung der Fahrzeuge wird der Markt für viele Downcycling-Produkte aus Aluminiumguss-Rezyklaten, die in Fahrzeuge eingebaut werden, voraussichtlich wegfallen;
- Strukturell hohe Energiekosten in Europa: Eine höhere Recyclingquote würde dazu beitragen, diesen Wettbewerbsnachteil auszugleichen, da recyceltes Aluminium eine Größenordnung weniger Energie verbraucht als die Primärschmelze;
- Die Einführung eines Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment Mechanism - CBAM) und ähnliche Initiativen zur Schaffung von Märkten für kohlenstoffärmeres Aluminium: Die Erhöhung des Anteils von

Sekundäraluminium an der gesamten verkauften Produktion wird kurzfristige (direkte) Verringerungen der CO₂-Intensität ermöglichen und dazu beitragen, die Notwendigkeit der Verringerung von Prozess- und Stromemissionen zu bewältigen, um wettbewerbsfähig zu sein.

Kunststoffe

In der EU wurden 2019 63 Millionen Tonnen Kunststoffe hergestellt. 51 Millionen Tonnen wurden in Produkten verwendet, die auf dem europäischen Markt verkauft wurden, und etwa 45 Millionen Tonnen Kunststoffe erreichten ihr Lebensende (EoL). Nur ein Bruchteil davon, 6,7 Millionen Tonnen, wurde recycelt. Trotz der Fokussierung auf die Sammlung und das Recycling von Kunststoffen in den letzten Jahren wurden in der EU nur etwa 15 Prozent der gesamten jährlichen Altkunststoffe über mechanische Recyclingverfahren recycelt. Jedes Jahr werden in der EU etwa 25 Millionen Tonnen Kunststoffe verbrannt, wobei falsch zugewiesene Abfälle in gemischten Abfallströmen berücksichtigt werden. Die Verbrennung von Kunststoffen führt in der Regel zu 2,8 Kilogramm CO₂ pro Kilogramm verbranntem Kunststoff, wobei derzeit bis zu 70 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr emittiert werden. Es wird erwartet, dass die Verwendung von Kunststoffen zunehmen wird und dass die verbrennungsbedingten Emissionen bis 2050 112 Millionen Tonnen CO₂ erreichen, wenn nicht gegengesteuert wird.

Die Vermeidung der Verwendung von kurzlebigen Kunststoffen und die Förderung der Wiederverwendung von Kunststoffen durch Konzepte zur Verringerung und Wiederverwendung könnten im Jahr 2030 und im Jahr 2050 8 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen im Vergleich zu *Business-as-usual*-Szenarien einsparen. Höhere Werte könnten dabei

möglich sein (SystemIQ 2022³). Zweitens ist das mechanische Recycling die energie-, material- und kosteneffizienteste Recyclingtechnologie; dessen Potenzial sollte vorrangig maximiert werden, wo immer dies technisch möglich ist. Die derzeitigen mechanischen Recyclingquoten von 15 Prozent⁴ könnten theoretisch auf 35 Prozent gesteigert werden.

Da das mechanische Recycling jedoch von relativ reinen Abfallströmen abhängt, sind seinem Potenzial durch folgende Faktoren Grenzen gesetzt: die Logistik der getrennten Sammlung und Sortierung, Einschränkungen bei bestimmten Kunststoffarten, verfahrensbedingte Probleme bei der qualitativen Herabstufung sowie unzureichende Standorte und Größenverhältnisse der Anlagen. Diese Grenzen könnten mit einem umfassenden System für nachhaltiges und hochwertiges chemisches Recycling überwunden werden, das die Sammelquoten von Kunststoffen aus *gemischten* Abfallströmen optimiert. Bis zu 75 Prozent der gemischten Kunststoffabfälle könnten zurückgewonnen werden und wären für das chemische Recycling noch brauchbar. Ein flächendeckender Einsatz des chemischen Recyclings könnte bis 2030 zu einer CO₂-Reduktion von 4 Millionen Tonnen und bis 2050 von 44 Millionen Tonnen führen, wenn durch entsprechende Regelungen sichergestellt wird, dass nur die nachhaltigsten Technologien und Verfahren Marktzugang erhalten.

Um das volle Potenzial einer Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe zu erschließen, sind Maßnahmen in jeder Phase des Kreislaufs erforderlich:

- Überarbeitung der Methoden zur Erhebung von Daten zum Lebensende, um alle Kunststoffabfälle und die damit verbundenen Emissionen zu

berücksichtigen und die Sammel- und Recyclingziele des Sektors entsprechend anzupassen;

- Forderung der Sortierung und Verwertung von Kunststoffen in gemischten Abfällen nach der Sammlung unter Verwendung fortschrittlicher Sortiertechnologien (in Norwegen und Schweden bereits im Einsatz);
- Unterstützung des parallelen mechanischen und chemischen Recyclings bei gleichzeitiger Maximierung des Potenzials mechanisch recycelter Abfallströme;
- Sicherstellung einer zuverlässigen und großzügigen Versorgung mit hochwertigen Rohstoffen durch Verbesserung der Sammlung und Reinheit von Abfallströmen;
- Sicherstellung der Vereinbarkeit des chemischen Recyclings mit den allgemeinen Umwelt- und Klimazielen;
- Anpassung der Produktnormen, die derzeit die Verwendung von recycelten Kunststoffen in bestimmten Anwendungen einschränken.

Die Förderung einer ganzheitlichen Kreislaufwirtschaft bietet das Potenzial, eine ressourceneffiziente und klimafreundliche Kunststoffwirtschaft zu entwickeln und gleichzeitig die langfristige Wettbewerbsfähigkeit des Chemie- und Kunststoffsektors in der EU zu sichern. Die effiziente Rückführung von EoL-Kunststoffen in die Wertschöpfungskette verringert CO₂-Emissionen, Umweltverschmutzung und die Abhängigkeit von der Einfuhr neuer Rohstoffe. Sie ermöglicht den Zugang zu großen Vorräten an wichtigen Rohstoffen, ohne dass fossile Brennstoffe oder Derivate aus dem Ausland eingeführt werden müssen. Der verbesserte ökologische Fußabdruck von Kunststoffen in Europa wird langfristig zu einem Markt für saubere Produkte, einer nachhaltigen Wettbewerbsposition, lokaler Produktion, Arbeitsplätzen und Innovation führen. Durch den

3 SystemIQ: *Reshaping plastics - Pathways to a circular, net zero emissions European plastics economy, 2022* (in Vorbereitung)

4 Hier geht es um den Übergang vom Produkt am Lebensende zum recycelten Produkt.

entschlossenen Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe kann die EU zu einem internationalen Technologieführer werden.

Zement und Beton

Beton ist die grundlegende strukturelle Komponente vieler Gebäude und eines Großteils der heutigen Infrastruktur. Gegenwärtig werden Betonabfälle größtenteils zu minderwertigen Verwendungszwecken, wie zum Beispiel als Füllmaterial, recycelt.

Ansätze für Zirkularität und Materialeffizienz befinden sich derzeit in der Entwicklung. Sie zielen auf folgende Aspekte ab:

- Rückgewinnung und Wiederverwendung hochwertiger recycelter Einsatzstoffe für die Produktion von neuem Klinker oder Zement durch die intelligente Trennung von Betonbestandteilen am Ende des Lebenszyklus;
- verstärkte Nutzung der natürlichen Tendenz des Zements zur Rekarbonisierung – wenn kalziumreiche, hydratisierte Feinanteile CO₂ aufnehmen;
- Nutzung der Materialeffizienz, Materialsubstitution und Optimierung von Zement- und Betonrezepturen.

Unsere Schätzungen deuten darauf hin, dass es ein erhebliches Potenzial zur Emissionsreduktion durch klinkerarme Zement- und Betonformeln und durch zirkuläre Konzepte im Zementsektor gibt.

Zusätzliche Emissionsminderungen in der Größenordnung von 16 bis 24 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr bis 2050 wären möglich, wenn Technologien für Zementrecycling die Kommerzialisierungsstufe erreichen und in größerem Umfang eingesetzt würden. Eine weitere wichtige Möglichkeit ist die direkte Wiederverwendung von intakten Betonteilen wie Betonplatten oder -trägern. Durch eine modularere Gestaltung solcher Produkte und die Entwicklung von Materialdatenbanken könnte eine größere

Wiederverwendung bestehender Komponenten erreicht werden.

Mehrere Hindernisse müssen beseitigt werden, damit klinkerarme Zement- und Betonrezepturen und die geschlossene Wiederverwendung von recyceltem Zement technisch machbar werden. Die folgenden Maßnahmen werden dabei eine entscheidende Rolle spielen:

- Einführung von Grenzwerten für eingebetteten Kohlenstoff in neuen Gebäuden;
- Reform der Vorschriften und Standards, um den Einsatz innovativer Technologien auf europäischer und nationaler Ebene zu ermöglichen;
- Förderung der Einführung neuer Technologien und alternativer Materialien durch innovative öffentliche Beschaffung und Demonstrationsprojekte im kommerziellen Maßstab;
- Überarbeitung des derzeitigen EU-Emissionshandelssystems (EHS) und Einführung von CBAM für den Zementsektor, um die verzerrende Wirkung auf Strategien zur Materialeffizienz durch unbeabsichtigte Subventionierung der Primärproduktion von Klinker zu beseitigen.

Zirkuläre und effiziente Ansätze im Zement- und Betonsektor verringern das Ausmaß und die Dringlichkeit der Notwendigkeit anderer Dekarbonisierungsstrategien wie der CO₂-Abscheidung und -speicherung (CCS). Der Aufbau der Infrastruktur für CCS ist kostspielig und die Entwicklung der entsprechenden Vorschriften erfordert einige Zeit, während zirkuläre und materialeffiziente Ansätze theoretisch bereits heute umgesetzt werden könnten.

Materialeffizienz und Substitution

Etwa 60 Prozent der Treibhausgasemissionen in der Industrie stammen aus der Produktion von Materialien, die in Bau-, Mobilitäts- und Kunststoffbereichen eingesetzt werden. Diese Emissionen können reduziert werden, indem die Kreislauffähigkeit CO₂-intensiver Materialkomponenten verbessert wird. Es

lassen sich jedoch auch beträchtliche Potenziale für Materialeffizienz erschließen, während gleichzeitig ein gleichbleibend hoher wirtschaftlicher Wert in Form von Materialdienstleistungen für die Verbraucher:innen produziert wird.

Im **Bauwesen und in Gebäuden** kann die Verwendung von CO₂-intensiven Materialien durch folgende Maßnahmen verringert werden:

- Planung von Projekten unter Berücksichtigung der CO₂- und Materialoptimierung bei Neubauten von Beginn an (zum Beispiel durch die Verwendung von Gebäudeinformationsmodellen, die die CO₂-Emissionen von Materialien optimieren);
- Ausweitung des Konzepts der „Materialpässe“⁵, um ein höheres Maß an Recycling zu ermöglichen;
- Verlängerung der Lebensdauer von Teilen oder des gesamten Gebäudes;
- Ergänzung von Energieaudits durch kohlenstoffoptimale Bewertungen, die das eingebettete CO₂ der für die Renovierung verwendeten Materialien einbeziehen; und
- Förderung regulatorischer Anreize, um sicherzustellen, dass komplexe Wertschöpfungsketten im Bauwesen mit Anreizen zur Optimierung der CO₂-Intensität in Einklang gebracht werden (zum Beispiel Grenzwerte für eingebetteten Kohlenstoff und Lebenszyklusemissionen von Gebäuden).

Im **Mobilitätssektor** können die Menge und die CO₂-Intensität von Materialien unter anderem durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

- Gewichtsreduzierung der Bauteile;
- Verringerung der Wachstumsrate der durchschnittlichen Fahrzeuggröße;

- Ersatz von Primärmaterial wie Stahl durch Sekundärmaterial wie Stahl für flache Bauteile;
- Steigerung und Optimierung des *Near-Net-Shape*-Gießens von Bauteilen, um die hohen Neuschrottraten (bis zu 35 Prozent bei Stahl) zu reduzieren, die bei der Herstellung von Fahrzeugteilen anfallen;
- Förderung von Neuinvestitionen in flexiblere Werke, die in der Lage sind, die Nachfrage nach hochwertigen flachen Produkten für High-End-Fahrzeuge zu decken.

Agora schätzt, dass bis 2050 jährlich bis zu 12 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen eingespart werden könnten, wenn die Materialeffizienz verbessert und das Substitutionspotenzial von Metall- und Kunststoffkomponenten im Mobilitätssektor maximiert würden. Dies entspricht einer ungefähren Einsparung von 14 Prozent im Vergleich zum *Business-as-usual*-Szenario in einem komplexen Sektor, der dekarbonisiert werden soll.

Bei **Kunststoffverpackungen** ist es unwahrscheinlich, dass durch mechanisches und chemisches Recycling mehr als 70 Prozent der gesamten Emissionsminderungen erreicht werden können. Daher sind zusätzliche Lösungen erforderlich, um die verbleibenden 30 Prozent der Emissionen langfristig zu eliminieren. Zu den wichtigsten Lösungen gehören hier:

- Förderung des effizienten Einsatzes von Kunststoffen, insbesondere durch mehr Wiederverwendung und weniger Einwegplastik;
- Förderung der verstärkten Verwendung von biobasiertem Kunststoff auf der Grundlage strenger Auflagen für eine nachhaltige Biomassebewirtschaftung;
- Einführung von CO₂-Abscheidung und -Speicherung oder -Nutzung (idealerweise mit

5 siehe Gebäude als Materialbanken: Integration von Materialpässen mit reversiblen Gebäudedesign zur

Optimierung industrieller Wertschöpfungsketten (<https://cordis.europa.eu/project/id/642384>)

Speicherung in langlebigen Produkten) als letztes Mittel zur Vermeidung von Restemissionen von Kunststoffen.

Erhebliche Potenziale für CO₂-Einsparungen sind wahrscheinlich und erfordern weitere Analysen.

Ersten Schätzungen zufolge könnten durch die Verringerung und Wiederverwendung von Kunststoffen in Verpackungen die Emissionen bis 2030 und 2050 um etwa 8 Millionen Tonnen CO₂ gesenkt werden. Diese Zahlen entsprächen zusätzlichen 11 Prozent beziehungsweise 10 Prozent der Gesamtemissionen des Kunststoffsektors über die gesamte Wertschöpfungskette im Jahr 2030 beziehungsweise 2050. Dementsprechend spielen Reduzierung und Wiederverwendung eine wichtige Rolle in einem breiteren Portfolio von CO₂-Minderungslösungen.

Tabelle E51: Zusammenfassung der wichtigsten Hebel für mehr Kreislaufwirtschaft, Materialeffizienz und Substitution sowie deren technische CO₂-Minderungspotenziale

Sektor	Verbesserte Kreislaufwirtschaft oder Materialeffizienz als Hebel	Kombinierte potenzielle Emissionseinsparungen für 2030 und 2050, in Mt CO ₂ /Jahr (Anteil in Prozent gegenüber BAU)	Art des Hebels
Stahl	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung der Recyclingkapazitäten (insbesondere des Schrottanteils in der DRI- und EAF-basierten Produktion) Aufrechterhaltung sauberer Schrottströme (Kupfer) 	2030: -5 Mt CO ₂ (2,4 % Einsparung) 2050: -63 Mt CO ₂ (30 % Einsparung)	verbessertes Recycling
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung der Kreislaufwirtschaft für hochwertige Verbraucherprodukte Aufrechterhaltung sauberer Schrottströme 	2030: -5 Mt CO ₂ (10 % Einsparung) 2050: -15 Mt CO ₂ (31 % Einsparung)	verbessertes Recycling
Zement und Beton	<ul style="list-style-type: none"> Substitution durch bindemittelarme Formulierungen Rekarbonisierung und Recycling von Zement als Input für die zirkuläre Zementherstellung 	2030 & 2050: -10 Mt CO ₂ & -31 Mt CO ₂ (10 % bzw. 30 % Einsparung) 2030 & 2050: -5 Mt CO ₂ und -16 Mt CO ₂ (5% und 15% Einsparung)	Material-effizienz, verbessertes Recycling
Kunststoffe	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung des mechanischen Recyclings auf 35 % (von derzeit 15 %) Erhöhung des chemischen Recyclings auf 30–40% (von derzeit 0 %) 	2030 & 2050: -12 & -27 Mt CO ₂ (18–27 % Einsparung) 2030 & 2050: -4 & -44 Mt CO ₂ (6–44 % Einsparung)	verbessertes Recycling
Bauwesen	<ul style="list-style-type: none"> Verringerung des Materialabfalls (Neuschrott) bei Entwurf und Bau Optimierung des Einsatzes von CO₂-intensiven Materialien Substitution 	2030: -15 Mt CO ₂ (12 % Einsparung) 2050: -23 Mt CO ₂ (15 % Einsparung)	Material-effizienz, Substitution
Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierung des Materialabfalls (neuer Schrott) bei der Produktion Gewichtsreduktion durch hochfeste Materialien verstärkte Integration von zirkulären Komponenten Reduzierung der durchschnittlichen Fahrzeuggröße 	2030: ca. -6 Mt CO ₂ (7 % Einsparung) 2050: ca. -12 Mt CO ₂ (14 % Einsparung)	Material-effizienz, Substitution
Verpackung	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion und Wiederverwendung (vor allem Einwegplastik) Umstellung auf faserbasierte Materialien 	2030: -8 Mt CO ₂ (10 % Einsparung)* 2050: -8 Mt CO ₂ (11 % Einsparung)*	Material-effizienz, Substitution

*Dies bezieht sich ausschließlich auf die Reduzierung und Wiederverwendung von Kunststoffverpackungen. Agora Industrie (2022)



Agora Industrie

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin

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

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

www.agora-industrie.de

info@agora-industrie.de