



Wachstum, Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz

Chancen der Circular Economy für die deutsche Industrie

Mai 2026

Im Auftrag von

BCG

+



BDI

Die Boston Consulting Group (BCG) unterstützt führende Akteure aus Wirtschaft und Gesellschaft in partnerschaftlicher Zusammenarbeit dabei, Herausforderungen zu meistern und Chancen zu nutzen. Seit der Gründung 1963 leistet BCG Pionierarbeit im Bereich Unternehmensstrategie. Die Boston Consulting Group hilft Kunden, umfassende Transformationen zu gestalten: Die Beratung ermöglicht komplexe Veränderungen, eröffnet Wachstumschancen, schafft Wettbewerbsvorteile, verbessert die Kunden- und Mitarbeiterzufriedenheit und bewirkt so dauerhafte Verbesserungen des Geschäftsergebnisses.

Der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) ist die Spitzenorganisation der deutschen Industrie und der industrienahen Dienstleister. 38 Branchenverbände, 15 Landesvertretungen und mehr als 100.000 Unternehmen mit ca. 8 Millionen Beschäftigten machen den Verband zur Stimme der deutschen Industrie. Der BDI setzt sich für eine moderne, nachhaltige und erfolgreiche Industrie in Deutschland, Europa und der Welt ein.

Gender-Hinweis:

Wenn in dieser Studie aus Gründen der besseren Lesbarkeit die männliche Form (generisches Maskulinum) verwendet wird, sind damit stets wertfrei alle Geschlechter (w/m/d) gemeint.



Wachstum, Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz

Chancen der Circular Economy für die deutsche Industrie

Mai 2026

Inhalt

Kernaussagen	2
1 Circular Economy: Eine strategische Notwendigkeit für Deutschland	7
1.1 Rohstoffsicherheit als strategischer Wettbewerbsfaktor	7
1.2 Zirkularität stärkt wirtschaftliche Resilienz und mindert Krisenanfälligkeit	10
1.3 Zirkuläre Geschäftsmodelle eröffnen Chancen für Unternehmen – auch ohne regulatorischen Druck	13
1.4 Zirkularität verbindet wirtschaftliches Wachstum mit einem Beitrag zur Dekarbonisierung	16
1.5 Europäische Regulierung schafft unterstützende Rahmenbedingungen für Zirkularität	17
2 Status quo: Erste Fortschritte, aber strukturelle Hürden	19
2.1 Deutsche Industrie mit hoher Materialintensität und hauptsächlich linearen Stoffströmen	19
2.2 Die deutsche Circular Economy: Fortschrittliches Abfallmanagement, aber Spielraum für mehr Zirkularität	23
3 Potenziale für 2045: Zielbilder und Business-Cases	26
3.1 Zielbilder 2045: Drei modellierte Entwicklungspfade	26
3.2 Potenzial von > 65 Mrd. Euro zusätzlicher Bruttowertschöpfung in Fokussegmenten bei erhöhter Materialeffizienz und Rohstoffunabhängigkeit	30
3.3 Mobilität: Eine Schlüsselindustrie im Umbruch mit Potenzial für erhöhte Resilienz durch Circular Economy	33
3.3.1 Kontext: Mobilität als Schlüsselindustrie in einem materialintensiven und dynamischen Transformationsumfeld	33
3.3.2 Status quo: Reparatur- und Verwertungsstrukturen sind etabliert, doch ca. 25 % der abgemeldeten Fahrzeuge gehen durch Nicht-EU-Exporte verloren	36
3.3.3 Potenzial: Circular Economy stärkt Rohstoffresilienz, senkt den Materialbedarf und steigert die Bruttowertschöpfung	38
3.3.4 Barrieren: Zentrale Hürden für die Umsetzung der Kreislaufhebel im Mobilitätssegment	50
3.4 Maschinenbau: Segment mit großen Wachstumschancen	52
3.4.1 Kontext: Maschinenbau unter Innovations- und Kostendruck, gleichzeitig mit Schlüsselrolle für Transformationsthemen	52
3.4.2 Status quo: Maschinenbau mit unerschlossenem Potenzial und Hebelwirkung	53
3.4.3 Potenzial: Kreislaufhebel erschließen neue Märkte	56
3.4.4 Barrieren: Interne Strukturhemmnisse und externe Unsicherheiten bremsen die Umsetzung zirkulärer Hebel	65
3.5 Bauwesen: Kreislaufhebel zur Steigerung der Materialeffizienz und zum Erhalt der Materialwerte	70
3.5.1 Kontext: Investitionsbedingte Wachstumsimpulse und bestehende zirkuläre Strukturen prägen das Bausegment	70
3.5.2 Status quo: Hohe Material- und Abfallströme in Kombination mit hohen Verwertungsquoten	71
3.5.3 Potenzial: Effizienter Ressourceneinsatz im Wohnungsbau und Ausbau des Baustoff-Recyclings	73
3.5.4 Barrieren: Strukturelle, regulatorische und marktliche Hürden bremsen heute die Umsetzung weiterer zirkulärer Lösungen aus	83

3.6	Energie: Kreislaufhebel machen die Energiewende günstiger und resilienter	85
3.6.1	Kontext: Der Sektor befindet sich in einer historischen Transformation; die Nachhaltigkeits-herausforderung verschiebt sich	85
3.6.2	Status quo: Große Schritte zu einem kreislauffähigen Sektor sind bereits erfolgt	87
3.6.3	Potenzial: Circular Economy kann die Energiewende billiger und resilienter machen	88
3.6.4	Barrieren: Vier zentrale Hürden für die Umsetzung der Kreislaufhebel	99
3.7	Textil: Kreislaufhebel ermöglichen umfangreiche Wertschöpfungsverlagerung nach Deutschland	103
3.7.1	Kontext: Zunehmende Abfallmengen und verschärfte regulatorische Anforderungen erzeugen Transformationsdruck	103
3.7.2	Status quo: Trotz hoher Sammelquote bleibt die Textilverwertung linear mit Export- und Verbrennungsverlusten	105
3.7.3	Potenzial: Kreislaufhebel können Wertschöpfungsschritte nach Deutschland verlagern	107
3.7.4	Barrieren: Drei systemische Hürden erschweren die Ausschöpfung textiler Kreislaufpotenziale	116
3.8	Zirkuläre Anwendungen als verbindendes Element über Sektor- und Unternehmensgrenzen hinweg: Industrielle Symbiose	118
4	Roadmap für eine international wettbewerbsfähige Circular Economy	121
4.1	Potenziale bis 2045 setzen Investitionen und den Abbau systemischer Hürden voraus	121
4.1.1	Deutschland benötigt Investitionen in die Circular Economy	121
4.1.2	Segmentspezifische Herausforderungen hemmen Investitionen und die Umsetzung der Circular Economy	123
4.2	Circular-Economy-Roadmap: Sieben zentrale Handlungsfelder für deutsche Unternehmen und Politik	125
4.2.1	Gesteigerte Materialverfügbarkeit ist die Grundlage für Wertschöpfung (A, B)	126
4.2.2	Wettbewerbsfähige Verwertung erfordert Kapazitäten und Wirtschaftlichkeit (C, D)	128
4.2.3	Die Nachfrage nach zirkulären Produkten muss gestärkt werden (E, F)	130
4.2.4	Digitalisierung als zentraler Enabler (G)	132
4.3	Der Maximierungspfad erfordert eine stärkere Weiterentwicklung bestehender Marktdynamiken	133
4.4	Eine wettbewerbsfähige Circular Economy erfordert das Zusammenspiel von Industrie und Politik	134
4.4.1	Die Transformation setzt aktives Handeln von Unternehmen voraus	134
4.4.2	Die Politik muss einen verlässlichen Umsetzungsrahmen schaffen	134
	Anhang	139
	Abbildungen	146
	Exkurse und Case-Studies	148
	Glossar und Abkürzungsverzeichnis	149
	Quellen	155
	Über die Autoren	164
	Danksagung	165

Kernaussagen

1

Die internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands steht angesichts globaler Versorgungsunsicherheiten und rückläufiger Entwicklung in zentralen Wirtschaftsbereichen stark unter Druck. Mit über 1,4 Mrd. Tonnen jährlich ist Deutschland die Volkswirtschaft der EU mit dem größten Materialeinsatz und drittgrößter Rohstoffimporteur der Welt, nicht zuletzt aufgrund seiner Rolle als exportorientierte Industrienation. Damit ist Deutschland in zentralen Sektoren aber auch hochgradig von Importen aus dem Ausland abhängig – bei Schlüsselmaterialien für Technologien der Zukunft, zum Beispiel Lithium, Nickel und seltenen Erden, zu mehr als 99 %. Trotz einer guten Ausgangslage im Abfallmanagement und etablierten Reparaturangeboten in vielen Segmenten ist die Wertschöpfung der deutschen Industrie bislang noch überwiegend linear. Während eine stabile Versorgung mit Primärmaterialien weiterhin essenziell bleibt, steht Deutschland vor der Aufgabe, seine industrielle Wettbewerbsfähigkeit auf internationalen Märkten langfristig zu sichern, Resilienz gegenüber globalen Risiken zu schaffen und zugleich klimapolitische Ziele zu erreichen.

2

Die vorliegende Studie zeigt erstmals, welches gesamtwirtschaftliche Potenzial eine konsequente Circular Economy zur Stärkung der Industrie entfalten kann – sogar bei nur begrenztem politischem Eingreifen und weitgehend auf Basis heute tragfähiger Geschäftsmodelle. Zusätzliches Wachstum der Bruttowertschöpfung, Stärkung von Resilienz und Versorgungssicherheit bei Ressourcen sowie positive ökologische Effekte sind das Ergebnis der betrachteten Ansätze. Dazu wurden gemeinsam von BDI, BCG sowie 13 beteiligten Unternehmen und Verbänden fünf wesentliche Segmente der deutschen Industrie betrachtet. Diese decken 62 % der nationalen Wertschöpfung ab: Mobilität, Maschinenbau, Bauwesen, Energie und Textil. In einem bewusst umsetzungsnahen Entwicklungspfad werden zirkuläre Geschäftsmodelle betrachtet, die entweder bereits heute wirtschaftlich tragfähig sind oder es bis 2045 unter stabilen Marktbedingungen werden können – ohne dass tiefgreifende staatliche Eingriffe oder strukturelle Umbrüche in der Industrie oder den Konsumentenpräferenzen vorausgesetzt werden müssen.

3

Die Bruttowertschöpfung der Circular Economy könnte sich von heute 60 Mrd. Euro auf bis zu 125 Mrd. Euro im Jahr 2045 mehr als verdoppeln; damit stellt sie gerade auch angesichts der wirtschaftlichen Stagnation der vergangenen Jahre eine Wachstumschance dar. Die identifizierten zusätzlichen Potenziale resultieren insbesondere aus den R-Strategien *Reuse*, *Refurbishment*, *Remanufacturing* und *Recycling*. Der Großteil des ökonomischen Effekts entfällt dabei auf die Segmente Maschinenbau, Bauwesen und Mobilität. Die identifizierten Kreislaufhebel generieren kumuliert 700 bis 880 Mrd. Euro Bruttowertschöpfung bis 2045. Darüber hinaus erzeugt ein systematischer Ausbau der Circular Economy weitere positive volkswirtschaftliche Effekte; zum Beispiel ließen sich dadurch bei der Energiewende bis 2045 kumuliert Einsparungen von ca. 38 Mrd. Euro erzielen. Auf Einzelunternehmensebene eröffnet die Circular Economy zusätzliche wirtschaftliche Vorteile, etwa durch die Monetarisierung von End-of-Life-Strömen. Margensteigerungen sind auch durch *Remanufacturing* und *Refurbishment* möglich, je nach Anwendung und bestehender Kostenstruktur – im Maschinenbau beispielsweise mit um mehr als 5 Prozentpunkte höheren Margen gegenüber der klassischen Neuproduktion. Hinzu kommt die Erschließung neuer Kundensegmente über zirkuläre Geschäftsmodelle.

4

Die Circular Economy kann zudem Resilienz und Versorgungssicherheit auf Ressourcenebene stärken; zum Beispiel könnten bis 2045 die Importquoten seltener Erden und strategischer Batteriematerialien um 20 % bzw. 10 % reduziert werden. Rund 60.000 Tonnen an jährlichen Importen von Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt, Silber und seltenen Erden, die vor allem in den Segmenten Mobilität, Maschinenbau und Energie benötigt werden, könnten durch Aufarbeitung in Deutschland ersetzt werden. Für Industrieunternehmen kann eine reduzierte Abhängigkeit von Importen und den damit verbundenen geopolitischen Versorgungsrisiken darüber hinaus nicht nur kurzfristig Kosten senken, sondern auch strukturelle Vorteile schaffen – etwa durch höhere Planungssicherheit und stabilere Abläufe.

5

Darüber hinaus sind die ökologischen Effekte der Circular Economy beträchtlich: Die identifizierten Hebel ermöglichen bis 2045 eine zusätzliche Emissionssenkung von ca. 11 Mio. Tonnen CO₂e p.a. in Produktions- und End-of-Life-Phasen und entlang globaler Wertschöpfungsketten. In den betrachteten Segmenten stellen sich die Effekte vielseitig dar: Allein im Mobilitätssegment könnte die Circular Economy gegenüber 2023 Emissionen in Höhe von ca. 4 Mio. Tonnen CO₂e in den vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsschritten senken. Im Textilsegment könnten die Verbrennungsanteile durch den Aufbau geschlossener Kreisläufe in Europa um 9 Prozentpunkte reduziert werden. Im Bausegment wäre es möglich, material-effizient zusätzlichen Wohnraum zu schaffen und den durchschnittlichen Materialeinsatz pro Wohnung bis 2045 um 2 % zu reduzieren. Darüber hinaus könnte die Circular Economy in den fünf betrachteten Segmenten eine jährliche Rezyklatverfügbarkeit von bis zu 83 Mio. Tonnen ermöglichen. Gleichzeitig bietet sie für Unternehmen die Chance, die Materialeffizienz in der Produktion zu erhöhen und die Erreichung von Dekarbonisierungszielen zu unterstützen.

6

Die beschriebenen ökonomischen und ökologischen Potenziale sowie eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit können in den bestehenden Wertschöpfungsstrukturen erreicht werden. Erforderlich ist allerdings ein kollektives Handeln von Industrie und Politik in sieben Handlungsfeldern. Eine erfolgreiche Skalierung der Circular Economy kann nur gelingen, wenn die Wettbewerbsfähigkeit sowohl gegenüber der Primärproduktion als auch im internationalen Vergleich sichergestellt wird. Die entwickelten Maßnahmen erfüllen diese Anforderungen und zielen auf die genannte Stärkung von Bruttowertschöpfung und Resilienz ab. Die sieben Handlungsfelder adressieren die Stärkung der Material- und Produktverfügbarkeit für die Anwendung verschiedener R-Strategien, die Verbesserung von Verwertungsprozessen, die Sicherung der Nachfrage nach zirkulären Produkten sowie den verstärkten Einsatz digitaler Lösungen. Für eine wirksame Umsetzung sind Beiträge der Industrie in den jeweiligen Einflussbereichen gefragt sowie eine kritische Reflexion und eine Weiterentwicklung der politischen Rahmenbedingungen (etwa durch passende Anreizmechanismen, verlässliche Leitplanken und gezielte Förderinstrumente). Auf Unternehmensseite sind ambitionierte Kreislaufziele und der Aufbau spezifischer Expertise zentral, ebenso auch Kooperationen innerhalb der Industrie und mit Forschungseinrichtungen, um die Innovationsfähigkeit zu steigern. Damit sich die volkswirtschaftlichen Potenziale entfalten können sowie betriebliche Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit sichergestellt werden, ist strategischer Gestaltungswille notwendig – in der Zielsetzung der Unternehmen ebenso wie in der politischen Steuerung.

7

Die Umsetzung der Roadmap erfordert kumuliert bis 2045 Einmalinvestitionen von insgesamt ca. 20 Mrd. Euro. Umgelegt auf den Investitionszeitraum, entspricht dies etwa 3 – 4 % des jährlichen Investitionsvolumens in kreislaufwirtschaftsnahe Bereiche. Der größte Anteil entfällt mit ca. 8 Mrd. Euro auf den Ausbau der Recycling-Infrastruktur. Weitere Investitionen sind notwendig für den Aufbau von *Remanufacturing*- und *Refurbishment*-Strukturen sowie von digitalen Infrastrukturen (z. B. dem digitalen Produktpass), außerdem für Designanpassungen und anwendungsnahe Forschung (etwa zu zirkulären Materialien und Recycling-Technologien). Ein wesentlicher Teil der Investitionen wird durch die Industrie getragen. Damit daraus langfristig auch ein Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit entsteht, müssen Investitionen nicht nur wirtschaftlich attraktiv, sondern strategisch sinnvoll und planbar sein. Ob diese Investitionen getätigt werden, hängt daher nicht allein von der Wirtschaftlichkeit ab, sondern auch vom Umsetzungstempo, der Verlässlichkeit und der Klarheit der politischen Rahmenbedingungen. Insgesamt können sich die erforderlichen Investitionen angesichts der durch die Circular Economy freigesetzten Bruttowertschöpfung gesamtwirtschaftlich in nur wenigen Jahren amortisieren.

8

Die Circular-Economy-Roadmap ist ein Baustein der transformativen Wertschöpfungsa-genda für die deutsche Industrie. Deutschland verfügt trotz unterschiedlicher Startpunkte in den einzelnen Segmenten über alle Voraussetzungen, um aus einer ambitionierten Circular Economy einen Standortvorteil zu machen und als Exportnation seine internationale Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu stärken: Technologieführerschaft im Bereich zirkulärer Wertschöpfung, eine starke industrielle Basis mit Grundstoff- und Prozessindustrien als zentralen Systembausteinen sowie weitgehende gesellschaftliche und unternehmerische Akzeptanz für zirkuläre Geschäftsmodelle. Als systemischer Ansatz verbindet die Circular Economy wirtschaftliche Leistungsfähigkeit, erhöhte strategische Souveränität und Klimaschutz – damit kann sie zu einem zentralen Baustein einer zukunftsfähigen deutschen Industrie werden.

AUSBLICK: Ein zirkuläres Deutschland im Jahr 2045

Reduktion kritischer Importe um

60.000 Tonnen p.a.

von Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt, Silber und Seltenen Erden durch Aufarbeitung in Deutschland

20 – 40 % Rohstoffimporte ersetzbar

durch Recycling & Wiederverwendung bis 2045.
Importabhängigkeit sinkt: Seltene Erden um bis zu 20%,
Batteriematerialien um bis zu 10%

**Über 5 % höhere Margen
im Maschinenbau**

mit *Remanufacturing & Refurbishment* Geschäftsmodellen je nach Anwendung und Kostenstruktur

**>150 Mrd. € globales
Marktpotenzial im Jahr 2045**

für Recyclingtechnologien & Software für die Circular Economy, welche Kreislaufwirtschaft in weiteren Industrien und Märkten vorantreiben werden



700 – 880 Mrd. €

kumulierte Bruttowertschöpfung

kann durch identifizierte Kreislaufhebel bis 2045 erreicht werden

38 Mrd. € **Einsparungen**

bei der Energiewende z.B. durch *Reuse* von Komponenten kumuliert bis 2045

20 Mrd. € **Einmalinvestitionen**

für CE-Infrastruktur inkl. digitale Lösungen bis 2045 notwendig – amortisiert sich gesamtwirtschaftlich innerhalb weniger Jahre

9 Prozentpunkte

geringerer Verbrennungsanteil

durch geschlossene Kreisläufe mit *Reuse* & Recycling im Textilbereich

11 Mio. Tonnen CO₂e

zusätzliche Emissionssenkung

durch identifizierte Hebel in Deutschland jährlich bis 2045. Emissionssenkung in Produktions- und End-of-Life Phasen entlang globaler Wertschöpfungsketten



1 Circular Economy: Eine strategische Notwendigkeit für Deutschland

Die Circular Economy beschreibt ein Wirtschaftsmodell, das auf die konsequente Etablierung von Stoff-, Energie- und Produktkreisläufen abzielt – unter anderem durch langlebiges Design, Wiederverwendung, Reparatur, Aufbereitung und Recycling. Dahinter steht das Bestreben, den Einsatz von Primärrohstoffen und die Entstehung von Abfällen dauerhaft zu reduzieren. Für die deutsche Industrie stellt die Circular Economy einen strategischen Hebel zur effizienten und zielgerichteten Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit, der Rohstoffversorgung sowie der Erreichbarkeit von Klimazielen dar. In einem Umfeld global wachsender Unsicherheit kann sie Deutschlands industrielle Basis unabhängiger, ressourceneffizienter und widerstandsfähiger machen.

Die wirtschaftliche Bedeutung zirkulärer Wertschöpfungssysteme ist erheblich. Eine systematische Transformation hin zu zirkulären Wertschöpfungssystemen eröffnet gerade vor dem Hintergrund eines zuletzt stagnierenden Wirtschaftswachstums ein Potenzial von zusätzlicher Bruttowertschöpfung bis 2045 – bei häufig deutlich sinkenden Materialkosten und Emissionen. Um diese Potenziale zu realisieren, sind abgestimmte Maßnahmen von Industrie, Politik und Forschung erforderlich.

1.1 Rohstoffsicherheit als strategischer Wettbewerbsfaktor

Deutschlands Industriesektor ist der größte in Europa und bildet das Rückgrat der deutschen Volkswirtschaft. Das verarbeitende Gewerbe hierzu-lande ist das viertgrößte der Welt sowie das größte in der EU; es trägt ca. 20 % zur Bruttowertschöpfung in

Deutschland bei (1.100 Mrd. Euro).¹ Die deutsche Industrie beschäftigte 2024 23 % aller Angestellten, etwa 11 Millionen in absoluten Zahlen.² Zudem ist die deutsche Industrie über den Bezug von Dienstleistungen (z. B. Ingenieurdienstleistungen) für eine weitere Wertschöpfung von 12,9 % der Bruttowertschöpfung verantwortlich.³ Gleichzeitig zählt Deutschland mit einem Exportanteil von über 40 % am Bruttoinlandsprodukt zu den offensten Volkswirtschaften der Welt. Der industrielle Wohlstand der Exportnation Deutschland basiert wesentlich auf dem sicheren, wettbewerbsfähigen Zugang zu Rohstoffen sowie der Innovationsfähigkeit, mit weniger Rohstoffen auszukommen.

Die deutsche Industrie ist in außergewöhnlichem Maße von Rohstoffimporten abhängig. Deutschland zählt zu den drei größten Rohstoffimporteuren weltweit und importierte 2023 ca. 530 Mio.⁴ Tonnen an Waren mit einem Gesamtwert von über 1,3 Billionen Euro, wovon 360 Mio.⁵ Tonnen wieder exportiert wurden.^{6,7,8} In anschaulichen Größen: 530 Mio. Tonnen Material entsprechen etwa 27 Millionen Lkw-Ladungen, die jedes Jahr über deutsche Grenzen strömen – eine Kolonne, die über zehnmal um den Erdball reichen würde. Damit entfielen ca. 5 % der weltweiten und 20 % der europäischen Warenimporte auf Deutschland; zwei Drittel der Warenimporte bezieht Deutschland aus dem europäischen Ausland.⁹ Der Anteil der Importe von Waren und Dienstleistungen am Bruttoinlandsprodukt lag 2023 bei ca. 40 % und damit deutlich über dem Niveau anderer großer Industrieländer. Unter den europäischen Industrieländern weist Deutschland eine der höchsten Importquoten außerhalb der besonders handelsintensiven EU-Binnenstandorte wie Belgien oder Niederlande auf.

¹ World Bank Group (2024), Daten von 2023.

² Laut Statistischem Bundesamt gab es im Jahr 2024 in der Industrie 8,1 Millionen Beschäftigte, in der Baubranche 2,6 Millionen.

³ BCG, IW und BDI (2024).

⁴ Errechnet aus direktem Materialeinsatz (*Direct Material Input, DMI*) minus inländischer Entnahme (*Domestic Extraction, DE*).

⁵ Errechnet aus DMI minus inländischem Materialverbrauch (*Domestic Material Consumption, DMC*).

⁶ WTO (2026).

⁷ Eurostat (2025a).

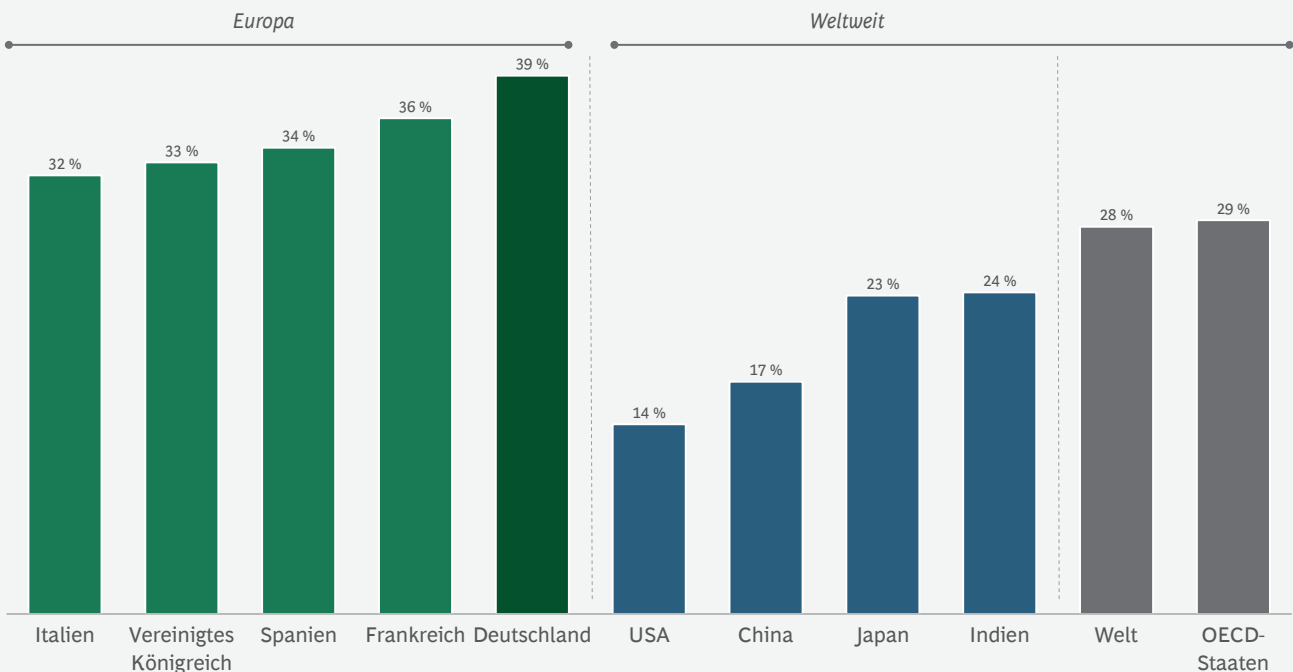
⁸ BPB (2024).

⁹ UNCTAD (2025).

Deutschland unter den Industrieländern mit höchster Importquote von Waren und Dienstleistungen

ABBILDUNG 1 | Importierte Waren und Dienstleistungen 2023 im europäischen und weltweiten Vergleich

Importe von Waren und Dienstleistungen
(2023, in % des BIP)



Quelle: Weltbank, Imports of goods and services (% of GDP); BCG-Analyse

Besonders kritisch ist die Abhängigkeit vor allem bei strategischen Rohstoffen. Die deutsche Industrie verarbeitet unter anderem diverse Rohstoffe, die in Deutschland kaum vorkommen bzw. abgebaut werden, aber für zentrale Zukunftstechnologien unverzichtbar sind.¹⁰ Kupfer, Nickel, Lithium, Aluminium, Kobalt, Silizium und Magnesium sind Schlüsselmaterialien für Batterien, Halbleiter, Windturbinen, Elektrofahrzeuge oder die Verteidigungsindustrie. Deutschland importiert über 99 % seiner Metallerze.¹¹ Während die EU im Durchschnitt 45 % ihrer seltenen Erden aus China bezieht, lag der Anteil Deutschlands 2024 bei 66 %.¹² Die Bedeutung der seltenen Erden zeigt sich darin, dass sie schon heute in die Produktionsprozesse (z. B. in Zwischenprodukte) von über 20 % der Wertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes integriert sind – und sich ihr Einsatz weiter erhöhen wird.¹³ Sie können auch in kleinen Mengen die Produktionsprozesse beeinflussen; unverzichtbar sind sie zum Beispiel für Permanentmagneten in der Fahrzeugindustrie.

Die Problematik der Importabhängigkeit verschärft sich durch die aktuelle Phase strukturell steigender Nachfrage und anziehender Rohstoffpreise. So lässt sich etwa eine Verknappung und preisliche Volatilität von Kupfer und Aluminium feststellen: Für diese beiden Metalle stiegen die Marktpreise in den letzten fünf Jahren um ca. 60 %, der Kupferpreis schwankte zwischen 2020 und 2024 um bis zu 2.500 Euro pro Tonne.¹⁴ Vergleichbare Volatilitäten sind auch bei Lithium und Nickel zu beobachten. Für die Industrie erhöhen volatile Rohstoffpreise tendenziell die Kapitalbindung und erschweren die Planung, wenn gleich sich Preisrisiken bei einzelnen Rohstoffen, etwa Lithium, teilweise über Terminmärkte und langfristige Verträge absichern lassen.

Die strategische Abhängigkeit gegenüber geopolitischen Risiken nimmt damit zu; Deutschland bezieht jährlich mehr als 8 Mio. Tonnen kritische Rohstoffe. Auf einer geopolitischen Ebene werden diese Rohstoffe zunehmend zum politischen Macht-

¹⁰ Das erkennen bereits sowohl das europäische Gesetz zu kritischen Rohstoffen (Critical Raw Materials Act, CRM Act) als auch die NATO-Liste der 12 verteidigungskritischen Rohstoffe an.

¹¹ Deutscher Bundestag (2025).

¹² Umfasst v. a. primäre und chemische Vorprodukte (Warennummern WA28053010, WA28053021, WA28053029, WA28053031, WA28053039, WA28053040, WA28053080, WA28461000, WA28469040, WA28469050, WA28469060, WA28469070, WA28469030 und WA28469090), vgl. Destatis (2025).

¹³ IW und Fraunhofer ISI (2024).

¹⁴ Annäherung auf Basis von LME-Preisen. Der Durchschnittspreis lag 2019 bei 5.350 Euro/Tonne, 2024 bei 8.450 Euro/Tonne, vgl. KME (2025), DERA (2026).

Exkurs 1: Kritische Rohstoffe als geopolitischer Hebel

Rohstoffe werden zunehmend zum Spielball internationaler Politik. Exportrestriktionen und/oder Zölle – etwa bei einzelnen Lithium-Produkten wie Batterien sowie bei Graphit, Magnesium oder seltenen Erden – zeigen, wie stark geopolitische Entscheidungen die Versorgungssicherheit beeinflussen. Im Zuge des europäischen Gesetzes zu kritischen Rohstoffen (*Critical Raw Materials Act*, *CRM Act*) hat die EU erstmals neben kritischen Rohstoffen auch strategische Materialien definiert.¹⁵ Große Unternehmen in strategischen Technologiebereichen werden verpflichtet, Lieferkettenrisiken für strategische Rohstoffe zu bewerten.

Je größer die Abhängigkeit, desto stärker wird die Regulierung: Mit Benchmarks entlang der Wertschöpfungskette macht der *CRM Act* Rohstoffmanagement zu einem strategischen Wettbewerbsfaktor. Gemäß dem *CRM Act* gelten derzeit 34 Materialien als kritisch für die europäische Industrie, unter anderem Mangan, Magnesium und Silizium. Rund 8 Mio. Tonnen des direkten Materialeinsatzes in Deutschland betreffen kritische und strategische Rohstoffe.

Besonders stark betroffen sind Branchen, die auf Metalle und Hochleistungsmaterialien angewiesen sind – etwa in den Segmenten Energie und Elektronik sowie Mobilität und Maschinenbau.

¹⁵ Kritische Rohstoffe weisen sowohl eine hohe wirtschaftliche Bedeutung als auch ein hohes Versorgungsrisiko für die EU auf. Strategische Rohstoffe bilden weitgehend eine Teilmenge der kritischen Rohstoffe und erlangen ihren Status aufgrund ihrer Schlüsselrolle für strategisch relevante Technologien (z. B. im Hinblick auf die Energiewende und in der Verteidigungsindustrie), vgl. RMIS (2026). Die Bewertung erfolgt nach Richtlinien der EU, vgl. Amt für Veröffentlichungen der EU (2017).

7 strategische¹ Rohstoffgruppen machen 8 Mio. Tonnen des deutschen Materialeinsatzes aus

ABBILDUNG 2 | Einstufung und Quantifizierung der kritischen Rohstoffe gemäß *Critical Raw Materials Act* der EU

Material ²	Relevante Segmente ³	Materialeinsatz (in kt)	Versorgungsrisiko ⁴	Wirtschaftliche Bedeutung ⁴
Bauxit (Aluminium)	Mobilität, Energie, Bauwesen, Maschinenbau	3.722,7	Mittel	Hoch
Kupfer	Bauwesen, Mobilität, Energie	3.873,7	Mittel	Mittel
Seltene Erden	Mobilität, Maschinenbau, Energie	5,8	Hoch	Mittel
Nickel	Mobilität, Maschinenbau, Bauwesen	148,2	Mittel	Hoch
Lithium	Mobilität, Maschinenbau, Bauwesen, Energie	0,7	Mittel	Mittel
Kobalt	Mobilität, Maschinenbau, Bauwesen	2,3	Mittel	Hoch
Graphit	Mobilität, Maschinenbau, Bauwesen	66,5	Mittel	Mittel

Nicht kritisch  Kritisch  Kein Risiko  Hohes Risiko  Schwach  Stark 

1. Die 7 Rohstoffgruppen sind sowohl kritisch als auch strategisch
2. Rohstoffbewertung gemäß EU-Gesetz zu kritischen Rohstoffen (*Critical Raw Materials Act* [*CRM Act*]), das 70 Rohstoffe bewertet und 34 als kritisch eingestuft hat. Da die EU alle seltenen Erden einzeln auflistet, wurden diese zu einer Gruppe zusammengefasst
3. Weitere Anwendungsbereiche über den Rahmen der Studie hinaus bspw. Verteidigungssektor, Elektrogeräte
4. Einstufung erfolgt durch *CRM Act*, Stand 2023 | Quelle: *CRM Act* der EU; BCG-Analyse

faktor – das zeigt sich etwa an Exportrestriktionen für seltene Erden oder an der Einführung neuer Zollregime. Die EU hat darauf mit dem europäischen Gesetz zu kritischen Rohstoffen (Critical Raw Materials Act, CRM Act) reagiert, das 34 kritische – davon 17 strategische – Rohstoffe definiert. Der CRM Act setzt Benchmarks für den Ausbau heimischer Kapazitäten entlang der Wertschöpfungskette (u. a. Extraktion, Verarbeitung und Recycling) sowie für eine stärkere Diversifizierung. Große Unternehmen in strategischen Technologiebereichen werden verpflichtet, Lieferkettenrisiken für strategische Rohstoffe zu bewerten.

Für die deutsche Industrie ergibt sich daraus eine doppelte Herausforderung. Einerseits gilt es, die Importabhängigkeit durch eine breitere Diversifizierung der Bezugsquellen zu verringern und neue Partnerschaften in geopolitisch stabilen Regionen zu etablieren sowie Weiterverarbeitungskapazitäten in Deutschland und Europa aufzubauen. Andererseits müssen zirkuläre Rohstoffsysteme im Inland gezielt ausgebaut werden – unter anderem durch verlängerte Nutzungsdauern, die Wiederverwendung von Material sowie die Rückgewinnung und den Einsatz von Rezyklaten. Deutschland exportierte 2023 mengenmäßig mehr Abfälle und Metallschrott, als es importierte; der Exportwert (11,4 Mrd. Euro) lag unter dem Importwert (14,6 Mrd. Euro). Rund 92 % dieser Abfall- und Schrottexporte verblieben innerhalb der EU, was die Bedeutung regionaler Stoffkreisläufe unterstreicht.¹⁶

1.2 Zirkularität stärkt wirtschaftliche Resilienz und mindert Krisenanfälligkeit

Die Erfahrung der letzten Jahre offenbart Verletzlichkeit: Globale Schocks – von der COVID-19-Pandemie über Energiepreisexplosionen bis zu geopolitischen Konflikten – haben die Anfälligkeit linearer Wertschöpfungssysteme offengelegt. In Deutschland führten Lieferkettenstörungen bei kritischen Rohstoffen und Zwischenprodukten in mehreren Branchen zu Produktionsausfällen und signifikanten Preissteigerungen bei Vorprodukten. So schätzt das ifo Institut, dass allein im Jahr 2021 40 Mrd. Euro Bruttowertschöpfung infolge von Lieferengpässen verloren wurden und über 80 % der Betriebe damit konfrontiert waren.^{17,18}

Zirkularität wirkt damit als Resilienzhebel: Eine Circular Economy kann die Abhängigkeit von Importen signifikant verringern und zugleich die Versorgungssicherheit stärken. Geschlossene Materialkreisläufe – bewirkt unter anderem durch Rückgewinnung, Rezyklateinsatz, Wiederverwendung und Neudesign – reduzieren kritische Abhängigkeiten von volatilen Märkten und geopolitisch instabilen Regionen.¹⁹ Gerade deshalb sind zum Beispiel seit 2021 alle Systeme und Anlagen zur Sammlung, Beförderung, Verwertung und Beseitigung von Siedlungsabfällen Teil der kritischen Infrastruktur.²⁰ Durch zirkuläre Beschaffungs- und Produktionsmodelle lassen sich diese Effekte deutlich besser abfedern, und es kann Resilienz gegen Preisschwankungen und Versorgungsrisiken aufgebaut werden.²¹ So entsteht eine stabilere industrielle Basis, die weniger anfällig für externe Schocks ist. Zirkularität ist damit nicht nur ein Nachhaltigkeitsprinzip, sondern ein strategischer Risikopuffer, der vor Brüchen an kritischen Stellen der Lieferketten schützt. Sie erhöht die Krisenfestigkeit, stabilisiert Margen und schafft Planungssicherheit für Investitionen – gerade in volatilen Märkten.

¹⁶ Destatis (2024).

¹⁷ ifo Institut (2021a).

¹⁸ ifo Institut (2021b).

¹⁹ OECD (2019).

²⁰ BMJV (2016).

²¹ OECD (2019).

Zirkularität ist ein Resilienzhebel gegen zunehmende Liefer-, Transport- und Handelsdisruptionen

ABBILDUNG 3 | Indikative Schäden der deutschen Industrie bei Disruptionen

Indikativ

	Ereignis	Zeitraum	Effekte auf Wertschöpfungskette	Auswirkung
Lieferketten und Transport	Suez-Blockade	2021	Beeinflusst internationalen Handel und notwendige Importe für die Produktion	Waren im Wert von \$ 10 Mrd. pro Tag beeinträchtigt
	Container-Engpässe und Hafenstaus	2021/2022	Verlängerte Shipping-Days führen zu Materialengpässen und Transportkosten	Preisanstieg: bis zu \$ 10 Tsd./ Container vs. \$ 2 Tsd. heute
Material und Rohstoffe	Knappheit von Halbleitern und Chips	Seit 2021	Beeinflusst Produktion, da essenziell für Elektrotechnik	€ 100 Mrd. Verlust der dt. Industrie ¹ zw. 2021 und 2023
	Energiekrise in China	2021	Produktionsdrosselungen führen zu längeren Lieferzeiten und Engpässen	+47,5 % Aluminiumpreis zw. Jan. und Okt. 2021
Handel und Regulierung	US-Zölle	Seit 2025	Höhere Preise und Unsicherheit beeinflussen Materialwirtschaft und produzierende Industrie	Wirtschaftswachstum 0,75 PPs niedriger ²
	Exportkontrolle von seltenen Erden in China	Seit 2023	Exportlizenzen und Kontrollen beschränken Zufluss seltener Erden	22 % BWS der Industrie abhängig; 66 % aus China

1. Schätzung durch ZVEI. Allein 2021 und 2022 € 48 Mrd. BWS-Verlust für deutsche Automobilindustrie lt. Allianz 2. Schätzungen über das Ausmaß von Handelszöllen gehen auseinander. Durch die starke Abhängigkeit von amerikanischen Märkten und die steigenden Preise ist ein Großteil des produzierenden Gewerbes von Zöllen beeinflusst, insbesondere die Materialwirtschaft und die Automobilindustrie
Quelle: Drewry World Container Index; Flexport Ocean Timeliness Indicator; KfW; Bundesbank; Lloyd's List; Allianz; ZVEI; Westmetall; BCG-Analyse



Exkurs 2: Von der linearen zur zirkulären Wertschöpfung – das Prinzip der R-Strategien

Die dominierenden Produktionssysteme der letzten Jahrzehnte folgen einer linearen Logik:

Take – Make – Waste. Rohstoffe werden entnommen, verarbeitet und am Ende entsorgt. Die Circular Economy ersetzt dieses Muster durch ein zirkuläres System, in dem Materialien und Produkte so lange wie möglich im Umlauf bleiben – durch besseres Design, effizientere Produktion, Wiederverwendung, Reparatur, Aufarbeitung und Recycling.

Als zentrale Richtschnur dient dabei das Konzept der R-Strategien. Es beschreibt konkrete Handlungsoptionen entlang des gesamten Produktlebenszyklus – von der Ressourcenschonung über die Verlängerung von Nutzungsdauern bis zur Rückgewinnung. Das Ziel der R-Strategien ist es, den Wert von Produkten, Komponenten und Materialien möglichst lange zu erhalten – ökonomisch wie ökologisch. Die Strategien (R0 – R9) lassen sich drei Gruppen zuordnen:

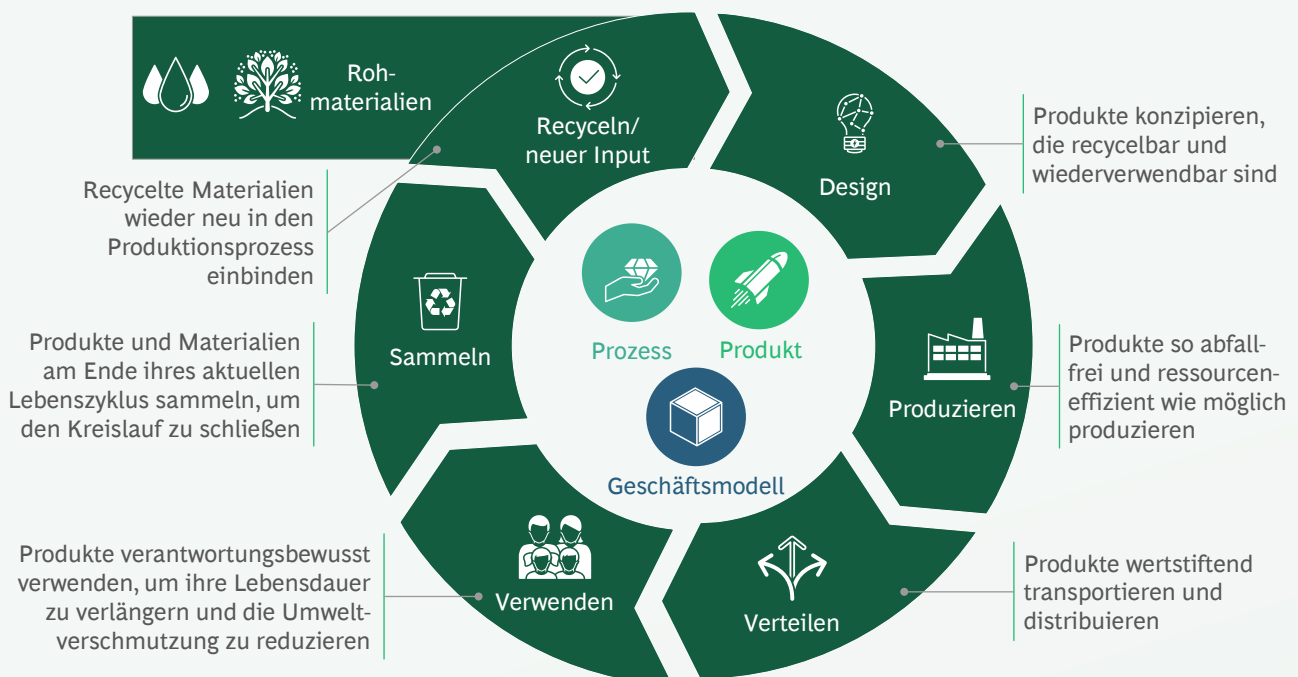
- Vermeiden und Reduzieren: *Refuse (R0), Rethink (R1), Reduce (R2)*
- Wiederverwenden und Verlängern: *Reuse (R3), Repair (R4), Refurbish (R5), Remanufacture (R6), Repurpose (R7)*
- Rezyklieren und Rückgewinnen: *Recycle (R8), Recover (R9)*

Die R-Strategien stehen in enger Beziehung zueinander, was auch zu Zielkonflikten führen kann.

So können zum Beispiel durch *Remanufacturing*- und *Refurbishment*-Ansätze Materialien länger in der Nutzung gehalten und Abfälle reduziert werden, wodurch gleichzeitig das Aufkommen an recycelbarem Material verringert wird. Insgesamt bieten R-Strategien je nach betrachtetem Segment in der Industrie unterschiedliche Vorteile für Bruttowertschöpfung, Resilienz und Emissionsreduktion. Diese müssen aufeinander abgestimmt werden.

Die Circular Economy bietet Wertschöpfungspotenziale entlang des gesamten Lebenszyklus

ABBILDUNG 4 | Die Circular Economy entlang des Wertschöpfungszyklus



Quelle: BCG-Analyse

Hebel für eine vollumfängliche Circular Economy: Die 10 R-Strategien

ABBILDUNG 5 | Die 10 R-Strategien der Circular Economy

Designphase <i>Intelligente Produktnutzung und -herstellung</i>			Nutzungsphase <i>Verlängerte wirtschaftliche Nutzungsdauer von Produkt und Materialien</i>					EOL-/ Rückgabephase <i>Wert aus EOL-Materialien</i>	
 R0 Nicht nutzen (Refuse)	 R1 Überdenken (Rethink)	 R2 Reduzieren (Reduce)	 R3 Wiederverw. (Reuse)	 R4 Reparieren (Repair)	 R5 Aufarbeiten (Refurbish)	 R6 Wiederaufarbeiten (Remanufact.)	 R7 Umnutzen (Repurpose)	 R8 Recyceln (Recycle)	 R9 Rückgewinnen (Recover)
Produkt überflüssig machen, Funktion anders bereitstellen, z. B. durch Produkt-as-a-Service-Modell	Umgestaltung zur Verstärkung der Produktnutzung, z. B. durch Sharing-Modell	Effizienz in Produktion oder Nutzungssteigern und Rohmaterial-/Input reduzieren, Abfälle durch Produktion vermeiden	Erhöhung auf mehr als eine Nutzungsphase je Produkt, z. B. Design für Vermietung, Zweitnutzermärkte	Durch Reparatur und Wartung auf ursprünglichen Standard bringen zur weiteren Nutzung	Gebrauchte Produkte für weitere Nutzung auf aktuellen Stand bringen	Bereitstellung eines neuen Produkts auf Basis von Komponenten alter Produkte mit derselben Funktion	Komponenten eines alten Produkts in einem neuen Produkt mit anderer Funktion verwenden	Materialien zur Verwendung in anderen Produkten verarbeiten	Verbrennen zur Rückgewinnung von Energie sowie Materialkleinstmengen aus Abfall

Anmerkung: EOL = am Ende des Lebenszyklus (End of Life)
Quelle: Kirchherr et al. (2017); University of Cambridge, Centre for Industrial Sustainability; BCG-Analyse

1.3 Zirkuläre Geschäftsmodelle eröffnen Chancen für Unternehmen – auch ohne regulatorischen Druck

Zirkularität ist kein Kostentreiber, sondern bietet – bei richtiger Umsetzung – Margen- und Wachstumspotenziale. Als eine der drei EU-Strategien, um die Wettbewerbsfähigkeit Europas langfristig zu sichern²², eröffnet sie ein breites Spektrum an neuen ökonomischen Chancen. Zirkuläre Geschäftsmodelle – von der Wiederverwendung und dem *Remanufacturing* über das *Refurbishment* bis hin zum Recycling – schaffen neue Märkte, Beschäftigung und Wertschöpfungsketten. Sie ermöglichen höhere Margen durch Serviceerlöse und verlängerte Produktnutzung: Leasing, Rücknahme- und Reparaturangebote, modulare Produktarchitekturen oder „*Product as a Service*“-Modelle führen zu wiederkehrenden Umsätzen, unabhängig vom Ressourcenbedarf. Für Unternehmen verschiebt sich damit die Perspektive: Zirkularität wandelt sich vom freiwilligen Nachhaltigkeitsziel zum Wettbewerbs-

faktor. Wer frühzeitig in zirkuläres Design, Lösungen für digitale Rückverfolgung und intelligente Rückführungsstrukturen investiert, kann regulatorische Vorgaben proaktiv erfüllen, Kostenvorteile realisieren und sich als *First Mover* in europäischen Leitmärkten positionieren.

Deutschlands Innovationsfähigkeit eröffnet Chancen, um mit zirkulären Geschäftsmodellen Ressourceneffizienz und Wettbewerbsfähigkeit zu kombinieren. Laut dem *GreenTech Atlas* zählt Deutschland zu den drei Ländern mit den meisten Patentanmeldungen für *GreenTech*-Innovationen, wozu auch die Circular Economy gezählt wird.²³ Unternehmen, die frühzeitig in Circular-Economy-Modelle investieren, positionieren sich zudem vorteilhaft im globalen Wettbewerb um kostengünstigere, robustere und nachhaltigere Produktionssysteme. Schon heute gehören zahlreiche deutsche Unternehmen zu den Pionieren profitabler Kreislaufmodelle (siehe Case-Studies in Kapitel 3). Die Beispiele reichen von weit ausgebauten Aluminium- und Stahlkreisläufen in der Metallindustrie über modulare Produktkonzepte im Maschinen-

²² Draghi (2024).

²³ UBA (2025a).

bau bis zu Rücknahme- und *Refurbishment*-Programmen in der Elektronikbranche. Die Transformation zu zirkulären Produktionssystemen kann auch unabhängig von der Gesetzgebung attraktiv für Unternehmen sein: Erste Studien lassen erkennen, dass Unternehmen mit Circular-Economy-Strategien erfolgreicher sind als jene, die keine solchen Strategien implementiert haben.²⁴

Zirkularität und Regulierung stehen in einem wechselseitigen Verhältnis. Ohne verlässliche ökonomische Rahmenbedingungen – etwa eine wirksame CO₂-Bepreisung mit damit einhergehendem verlässlichem *Carbon-Leakage*-Schutz, ein Verbot der Deponierung organischer Abfälle sowie praktikable Mindesteinsatzquoten für ausgewählte Rohstoffe der Circular Economy – entsteht vorerst kein breiter Markt für zirkuläre Lösungen. Doch Regulierung allein schafft keine Geschäftsmodelle: Die Wirkung von Gesetzen entfaltet sich erst, wenn Unternehmen Innovationen entwickeln und Marktmechanismen greifen. In diesem Zusammenhang muss der politische Rahmen so gestaltet werden, dass die internationale Wettbewerbsfähigkeit einzelner Akteure nicht geschwächt wird.

²⁴ Lichtenthäler und Neligan (2023).

Zirkularität ist daher mehr als eine Reaktion auf Regulierung – sie ist eine eigenständige Wettbewerbsstrategie, die durch kluge Setzung politischer Leitplanken und durch umfassende internationale Referenzrahmen (siehe Exkurs 3: *Global Circularity Protocol*) gefördert werden kann. Sie verbindet Effizienz, Wachstum und ökologische Verantwortung und wird so zu einer Win-win-Strategie für Industrie und Umwelt – und zu einem zentralen Innovationsfeld einer zukunftsfähigen Wirtschaft.

Exkurs 3: *Global Circularity Protocol* (GCP)

Was ist das GCP?

Mit dem *Global Circularity Protocol for Business* (GCP) wurde erstmals eine weltweite unterstützende Leitlinie für Unternehmen geschaffen, um ihre Fortschritte hin zu einer Circular Economy systematisch messen, steuern und kommunizieren zu können. Das Protokoll wurde in seiner Erstversion vom November 2025 von dem World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) und dem One Planet Network des UN-Umweltprogramms auf der UN-Klimakonferenz COP30 vorgestellt. Ausgearbeitet wurde es gemeinschaftlich von über 150 Experten sowie 80 Organisationen und Unternehmen, unter anderem auch aus Deutschland.

Welche Inhalte umfasst das GCP?

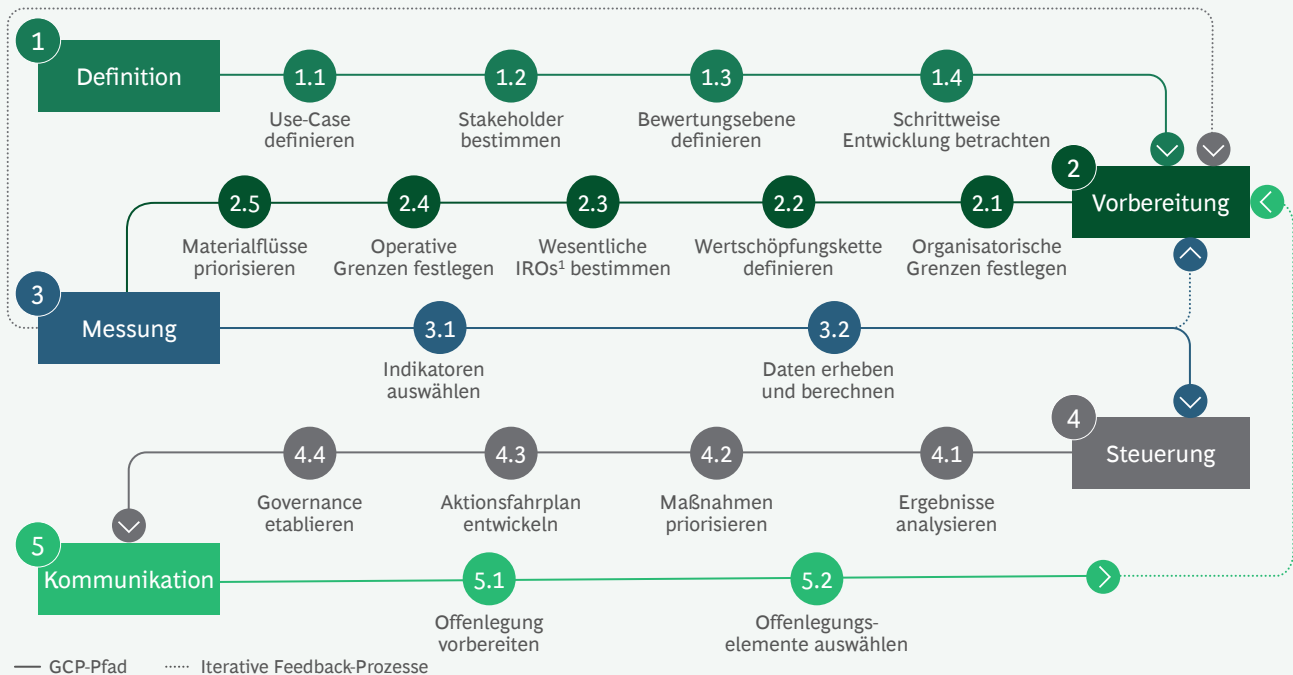
Das GCP ist keine weitere Reporting-Richtlinie, sondern versteht sich vor allem als vereinheitlichte Leitlinie, die Unternehmen dabei unterstützt, die eigenen Materialströme zu messen sowie ihre Circular-Economy-Ambitionen umzusetzen und zu kommunizieren. Es wurde für Organisationen aller Größen, Branchen und Regionen konzipiert und stellt einen umfassenden

Ansatz zur Integration von Zirkularität in Strategie, operative Abläufe und Performance-Management dar. Gleichzeitig ermöglicht es die Kommunikation vergleichbarer Informationen, wodurch Kapital gezielt in die Skalierung zirkulärer Initiativen gelenkt werden kann. Das GCP stellt hierfür einen wissenschaftsbasierten Rahmen bereit, der fünf Schritte umfasst, um für Unternehmen die Implementierung zirkulärer Ansätze messbar zu machen:

1. Definition von Zielen
2. Vorbereitung der eigenen Materialflüsse zur Messung
3. Messung der eigenen zirkulären Leistung
4. Steuerung der eigenen zirkulären Leistung
5. Kommunikation mit externen Stakeholdern

Das GCP unterstützt Unternehmen bei der Messung der eigenen Circular-Economy-Performance in 5 Phasen

ABBILDUNG 6 | *Global Circularity Protocol User Journey*



1. Auswirkungen, Risiken und Chancen (Impacts, Risks and Opportunities)
Quelle: WBCSD

Dies erlaubt Unternehmen, durch ein vereinheitlichtes System Möglichkeiten für mehr zirkuläre Ansätze zu identifizieren und umzusetzen. Das GCP ist mit ISO 59020 abgestimmt, lässt sich leicht in bestehende Berichterstattungen wie CSRD ESRS E5 integrieren und soll als übergeordnete Orientierungslinie dienen.

Welchen Mehrwert schafft das GCP, und welche Entwicklung ist abzusehen?

Künftige Iterationen des GCP sollen unter anderem kontinuierlich dazu beitragen, Risiken und Chancen in Bezug auf Ressourcennutzung und zirkuläre Ansätze zu quantifizieren, wissenschaftsbasierte Zirkularitätsziele zu definieren und die Circular Economy in regulatorische Rahmenwerke zu integrieren. Weitere

Entwicklungen sollen eine Methodik zur Zusammenfassung der Wirkung unterschiedlicher Circular-Economy-Strategien auf die Substitution linearer Ressourcennutzung enthalten, um die systematische Reduktion der Abhängigkeit von Primärressourcen voranzutreiben. Gleichzeitig werden Umsetzung und Anwendung des GCP durch einen *Implementation Accelerator* gefördert, der Kompetenzaufbau, bereits etablierte Strategien und Lehrformate sowie regionale Dialoge gemeinsam mit Partnern umfasst. Die weitere Skalierung des GCP wird maßgeblich durch die *Front Runner Coalition* vorangetrieben, eine Gruppe von Unternehmen, die das Protokoll in der Praxis testen und strukturell unterstützen.

1.4 Zirkularität verbindet wirtschaftliches Wachstum mit einem Beitrag zur Dekarbonisierung

Im Jahr 2023 entfielen auf die deutsche Industrie ca. 155 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente – 24 % der nationalen Gesamtemissionen.²⁵ Die Industrieemissionen gingen zwischen 1990 und 2023 bereits um ca. 46 % zurück.²⁶ Auch bei einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung bliebe der materialbedingte Anteil der deutschen Emissionen erheblich, wenn Wertschöpfungsketten nur auf Primärmaterialien beruhen.²⁷ Rund 6 % der nationalen Gesamtemissionen fallen auf prozessbedingte Emissionen, die bei der Gewinnung, Verarbeitung und Nutzung von Rohstoffen innerhalb Deutschlands freigesetzt werden.²⁸

Die Circular Economy ist daher eine zentrale Säule der Dekarbonisierung. Studien zeigen, dass zirkuläre Strategien die materialbedingten Emissionen signifikant senken können.²⁹ Da diese Strategien die Verlagerung von Wertschöpfungsketten nach Deutschland bedeuten können, sind die Emissionswirkungen gesamtheitlich zu betrachten, sie schlagen sich nicht zwangsläufig als Einsparungen bei den direkten Emissionen Deutschlands nieder. Durch den Ersatz energie- und CO₂-intensiver Primärmaterialien durch Rezyklate lassen sich gleichzeitig der Energieverbrauch und die Prozessemissionen deutlich reduzieren. Beispielsweise reduziert der Einsatz von Schrotten in der Aluminiumproduktion den Energiebedarf im Vergleich zum Primärmaterial um 95 %.^{30,31} Der größtmögliche Einsatz von Aluminiumschrotten in der Produktion ist daher aus ökonomischen und ökologischen Gründen sehr sinnvoll.

²⁵ UBA (2024).

²⁶ Dieser Prozentsatz ist allerdings mit Vorsicht zu berücksichtigen, da der Wert von 1990 CO₂-Werte vor der Wiedervereinigung umfasst und COVID-19 ebenfalls Auswirkungen hatte. Nimmt man den Wert vor der COVID-19-Pandemie (189 Mio. Tonnen im Jahr 2019), so ergibt sich eine Veränderung von 32 % gegenüber 1990, vgl. BCG und BDI (2021).

²⁷ Unter der Annahme gleichbleibender technologischer Effizienz.

²⁸ Laut Klimapfade 2.0 machen drei Schlüsselindustrien ca. 75 % der deutschen Emissionen aus: die Verarbeitung von Steinen und Erden, die Grundchemikalien sowie die Produktion von Eisen, Stahl und Ferrolegierungen, vgl. BCG und BDI (2021)..

²⁹ Deutsche Umwelthilfe (2024).

³⁰ European Aluminium (2021).

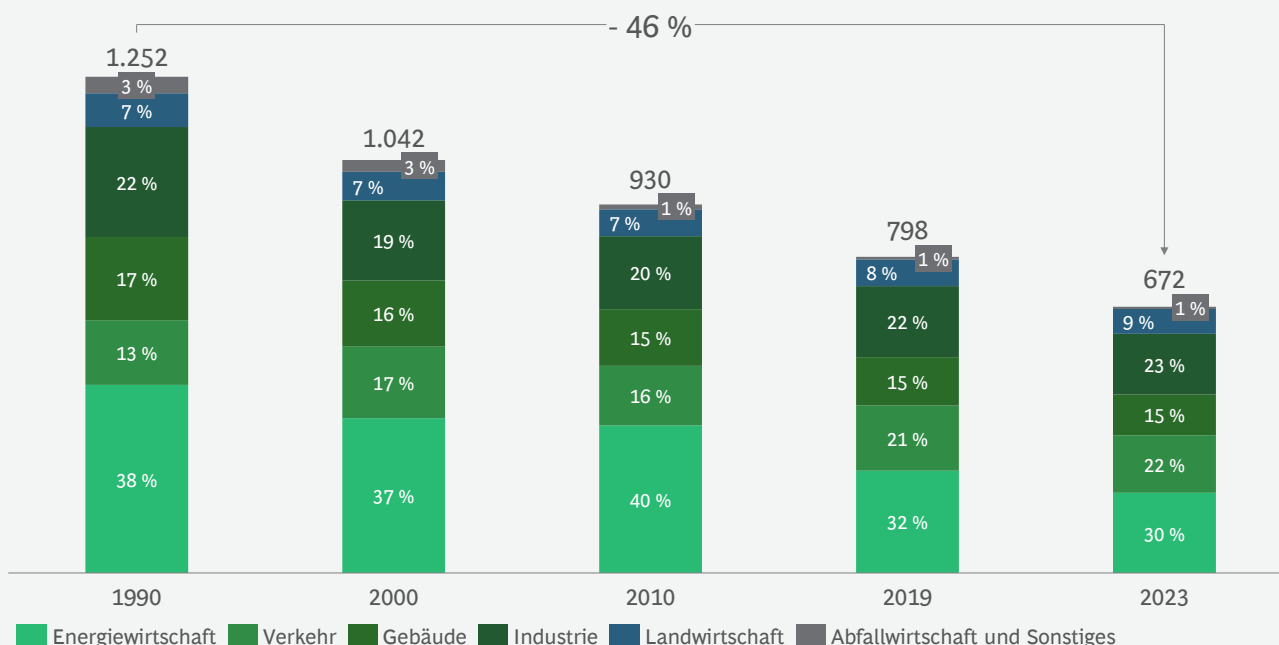
³¹ Dabei bedarf es weiterer technologischer Innovation, um auch bei starken Verunreinigungen Recycling auf gleicher Wertschöpfungsstufe zu ermöglichen.

Gesamtemissionen in Deutschland sind seit 1990 gesunken, während der relative Anteil der Industrie konstant bleibt

ABBILDUNG 7 | Direkte CO₂e-Emissionen der deutschen Sektoren zwischen 1990 und 2023

Direkte CO₂e-Emissionen nach Sektor

% der gesamten CO₂e-Emissionen (in Mio. t, exkl. LULUCF)



Quelle: Umweltbundesamt; BDI und BCG, Klimapfade; BCG-Analyse

Zirkularität entkoppelt Wohlstand vom Ressourcenbedarf. Sie steht für einen neuen industriellen Wertschöpfungsansatz: Mehr Wertschöpfung mit weniger Ressourcen. Denn Zirkularität ermöglicht wirtschaftliches Wachstum, ohne den Ressourcenbedarf zu steigern. Unternehmen können durch effizientere Nutzung, längere Produktlebenszyklen und geschlossene Stoffkreisläufe mehr Wertschöpfung pro eingesetzte Tonne Material erzielen – und dadurch sowohl die ökonomische als auch die ökologische Produktivität erhöhen.³²

Damit ist Zirkularität eine Antwort auf die wachsende planetare Überlastung. Laut aktuellen Analysen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und des Stockholm Resilience Centre sind heute bereits sieben von neun planetaren Grenzen überschritten – darunter Klimastabilität, Biodiversität und Landnutzung.³³ Diese Entwicklung zeigt: Klimaschutz über Dekarbonisierung von Energie reicht allein nicht mehr aus – gefragt ist eine Wirtschaft, die Wertschöpfung und Ressourcennutzung systemisch entkoppelt, den Einsatz von Primärmaterialien und damit verbundene Emissionen und Landnutzungswirkungen senkt, den Verbrauch von Stoffen durch Wiederverwendung verlängert und die Nutzungsdauer von Produkten maximiert.

1.5 Europäische Regulierung schafft unterstützende Rahmenbedingungen für Zirkularität

Die Europäische Union verankert Zirkularität zunehmend als verbindliches Leitprinzip in der Industrie- und Produktpolitik. Sie verfolgt mit dem 2020 veröffentlichten neuen Aktionsplan für die Circular Economy (*New Circular Economy Action Plan, CEAP 2.0*) eine umfassende Strategie, um Produktion, Konsum und Ressourcenmanagement systemisch zu verändern. Der *CEAP 2.0* bildet den politischen Rahmen für eine Vielzahl von Gesetzesinitiativen, die gemeinsam den Übergang von einer linearen zu einer zirkulären Wirtschaft beschleunigen sollen. Zentral ist dabei eine Produktpolitik, die Zirkularität über den gesamten Lebenszyklus sicherstellt. Dabei wird es in den kommenden Jahren auch darauf ankommen, regulatorische Anforderungen, industriegetriebene Normen und Standards sowie die gestalterische Freiheit von Unternehmen auszubalancieren. Nur so werden funk-

tionierende Märkte entstehen können. Die untenstehend genannten Regulierungen sind nur einige Beispiele innerhalb eines breiten Spektrums an Maßnahmen:

- **Die Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (*Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR*³⁴)** setzt für Unternehmen einen rechtsverbindlichen Rahmen mit produktgruppenspezifischen Anforderungen an Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Rezyklateinsatz und digitale Nachverfolgbarkeit. Im Zuge von delegierten Rechtsakten sollen die Anforderungen für priorisierte Produktgruppen festgelegt werden. Diese Produktgruppen sind im Arbeitsplan 2025 – 2030 zur ESPR und zur Energieverbrauchskennzeichnung definiert. So stellt der **digitale Produktpass (*Digital Product Passport, DPP*)** ein Datengerüst dar, das Produkte und Materialien über alle Lebenszyklusphasen rückverfolgbar macht und sich auf die Geschäftsbeziehungen zwischen Unternehmen auswirkt.
- **Die Verpackungsverordnung (*Packaging and Packaging Waste Regulation, PPWR*³⁵)** legt verbindliche EU-weite Quoten für den Einsatz von Recycling-Material in Verpackungen sowie für die Wiederverwendung bestimmter Verpackungsarten fest. Dafür definiert sie Kriterien zur Bemessung und Klassifizierung der Recycling-Fähigkeit.
- **Die EU-Batterieverordnung (*Battery Regulation*³⁶)** setzt Standards für Kreislaufführung, Materialrückgewinnung und CO₂-Fußabdrücke entlang der Batteriewertschöpfungskette.
- **Die EU-Altfahrzeugverordnung (*ELV-Verordnung*)**, für die im Dezember 2025 eine vorläufige Einigung zwischen dem Rat der Europäischen Union und dem Europäischen Parlament erreicht wurde, umfasst einen erweiterten Anwendungsbereich gegenüber der seit 2000 bestehenden Altfahrzeug-Richtlinie und harmonisiert die nationalen Umsetzungen. Geplant sind unter anderem ein Regelwerk für eine klarere Beurteilung, wann ein Fahrzeug das Ende seines Lebenszyklus erreicht, sowie Designanforderungen, um Recycling, *Reuse* und *Remanufacturing* von Teilen zu erleichtern. Zudem sollen Zielvorgaben für Rezyklatanteile von Kunststoff und erweiterte Reportingpflichten der Akteure der Circular Economy erstellt werden.³⁷

³² van Keeken et al. (2024).

³³ PIK (2025).

³⁴ EUR-Lex (2024).

³⁵ EUR-Lex (2025).

³⁶ EUR-Lex (2023).

³⁷ Europäische Kommission (2025a).

2025 wurde der sich ständig weiterentwickelnde regulatorische Rahmen der Europäischen Union um den Deal für eine saubere Industrie (*Clean Industrial Deal, CID*) erweitert, durch welchen Dekarbonisierung unter Bezugnahme auf kostengünstige Energie und saubere Technologien stärker mit industrieller Wettbewerbsfähigkeit verbunden werden soll.³⁸ Kernbestandteil des Deals soll auch der Rechtsakt über die Circular Economy (*Circular Economy Act, CEA*) werden, der unter anderem auf eine Steigerung der Sammlung von Abfällen und die Nutzung von rückgewonnenen Materialien abzielt und die Preiskluft gegenüber Primärrohstoffen adressieren soll. Voraussichtlich wird er im dritten Quartal 2026 von der EU-Kommission im Detail vorgestellt werden.³⁹ Insgesamt soll der Rechtsrahmen auf EU-Ebene R-Strategien fördern und den Fortschritt von Zirkularität mess- und nachvollziehbar machen. Dadurch sollen Raum und Rechtssicherheit⁴⁰ sowie wirtschaftliche Tragfähigkeit für neue, skalierbare Geschäftsmodelle geschaffen werden, etwa für *Refurbishment*- und *Remanufacturing*-Services, hochwertige Rezyklatmärkte sowie digitale Produktpass- und Compliance-Lösungen. Auf nationaler Ebene bilden unter anderem das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG⁴¹), diverse nationale Durchführungsgesetze (z. B. Batt-EU-AnpG⁴²), die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV⁴³), die Rohstoffstrategie⁴⁴ und das Ressourceneffizienzprogramm ProgRess⁴⁵ den regulatorischen und strategischen Rahmen. Mit der im Dezember 2024 beschlossenen Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) sollen erstmals Industrie-, Klima- und Rohstoffpolitik systematisch verzahnt werden. Die NKWS adressiert dabei zentrale Hebel wie den Rezyklateinsatz, digitale Produktpässe und nachhaltige öffentliche Beschaffung; ein Aktionsprogramm zur Umsetzung befindet sich in Ausarbeitung.⁴⁶

Deutschland ist aufgrund seiner wirtschaftlichen Struktur besonders tief in die europäische Wertschöpfung eingebettet. Als größte Industrienation Europas fungiert es als Knotenpunkt komplexer Binnenmarkt-Lieferketten, in denen Produkte, Komponenten und Materialien frei zirkulieren. Wertschöpfungsketten – insbesondere in Fahrzeugindustrie, Maschinenbau, Chemie und Energietechnik – sind dadurch faktisch europäische (oder sogar globale) Produktionssysteme. In diesem Umfeld entfalten nationale Kreislaufstrategien nur dann Wirkung, wenn sie mit

EU-Anforderungen kompatibel sind und sich in gemeinsame Standards, Produktregeln und Materialströme einfügen, ohne dabei internationale Wettbewerbsnachteile zu erzeugen.

Gleichzeitig setzt die Regulierung auf EU-Ebene den strategischen Rahmen, in dem sich deutsche Unternehmen bewegen. Einheitliche Vorgaben zu Abfallende-Kriterien, Rücknahme und Datentransparenz bestimmen künftig die Wettbewerbsfähigkeit zirkulärer Produkte im gesamten Binnenmarkt. Deutschland profitiert dabei unmittelbar von harmonisierten Regeln, da sie Skaleneffekte ermöglichen und Fragmentierung verhindern. EU-Richtlinien bilden für Deutschland daher nicht nur den Compliance-Rahmen, sondern sind Voraussetzung für funktionierende Märkte für Rezyklate und wiederaufbereitete Produkte, die Etablierung neuer Produkte und planbare Investitionsbedingungen – insbesondere in einer hoch exportorientierten Industrie.

Dennoch entscheidet sich die tatsächliche Transformationsgeschwindigkeit im nationalen Kontext. Obwohl viele Leitplanken europäisch gesetzt werden, liegen zentrale Hebel für die Umsetzung der Circular Economy in Deutschland selbst: der Ausbau von Recycling- und *Remanufacturing*-Kapazitäten, effiziente Genehmigungsverfahren, Förderinstrumente, die öffentliche Beschaffung, Rohstoffpolitik und Infrastrukturplanung sowie die Unterstützung von Unternehmen bei Investitionen und der Skalierung. Hier hat Deutschland unmittelbaren Handlungsspielraum – und kann durch klare Priorisierung und wirtschaftliche Anreize die Rahmenregulierung in konkreten industriellen Fortschritt übersetzen.

Vor diesem Hintergrund richtet die Studie ihren Fokus bewusst auf Deutschland. Die Circular Economy entsteht im Zusammenspiel europäischer Regulierung, nationaler Umsetzung sowie unternehmerischer Verantwortung und Innovation – doch wie schnell und wirtschaftlich erfolgreich sie realisiert wird, hängt wesentlich davon ab, wie Deutschland seine industriellen, technologischen und politischen Hebel nutzt. Die deutsche Industrie besitzt die kritische Masse, die Innovationskraft und die Investitionsstärke, um Zirkularität zum ökonomischen Wettbewerbsfaktor zu machen.

³⁸ Europäische Kommission (2025b).

³⁹ Europäisches Parlament (2026).

⁴⁰ Aktuell bestehen allerdings zum Teil noch rechtliche Unsicherheiten, zum Beispiel hinsichtlich der Abgrenzung und Vorrangstellung verschiedener Vorgaben, etwa in Bezug auf Rezyklate (CRMA, ELV-Verordnung) und Kennzeichnungspflicht (ESPR, ELVR).

⁴¹ BMUKN (2024a).

⁴² Deutscher Bundestag (2024).

⁴³ BMJV (2017).

⁴⁴ BMW (2020).

⁴⁵ BMUKN (2020).

⁴⁶ BMUKN (2024b).

2 Status quo: Erste Fortschritte, aber strukturelle Hürden

Deutschland verarbeitet jährlich über 1,4 Mrd. Tonnen Materialien aus dem In- und Ausland und bleibt damit die Volkswirtschaft der EU mit dem größten mengenmäßigen Materialeinsatz. Rücknahmesysteme sowie duale Sammel- und Recycling-Strukturen sind seit Jahrzehnten etabliert; die formalen Sammlungsraten sind hoch. Dennoch bleibt der Übergang vom fortschrittlichen Abfallmanagement zu einer umfassenden Zirkularität fragmentiert und bietet Spielraum für weitere Fortschritte.

Rund 14 % der industriell genutzten Materialien sind sekundär – Rezyklate sind knapp, Stoffflüsse weitgehend linear. Das Ergebnis sind wachsende Importabhängigkeiten, Kostenrisiken und verpasste Wertschöpfung im Inland. Trotz einer dichten Regulierungslandschaft fehlt ein ganzheitlicher Ansatz, der Zirkularität in der deutschen Wirtschaft integriert. In diesem Kapitel liegt der Schwerpunkt auf Materialströmen und Recycling, da sie die gesamte deutsche Industrie betreffen und die Praktiken anderer R-Strategien häufig branchenspezifisch ausgestaltet sind. In den nachfolgenden Kapiteln werden auch weitere R-Strategien umfassend betrachtet – sowohl im Status quo als auch hinsichtlich ihrer Potenziale.

2.1 Deutsche Industrie mit hoher Materialintensität und hauptsächlich linearen Stoffströmen

Die industrielle Wertschöpfung stützt sich weiterhin auf große Primärmaterialmengen. 2023 betrug der direkte Materialeinsatz (*Direct Material Input, DMI*) des produzierenden Gewerbes ca. 1,38 Mrd. Tonnen – davon 850 Mio. Tonnen aus inländischer Förderung und 530 Mio. Tonnen aus Importen. Die jeweiligen Anteile sind seit Jahren nahezu unverändert: Nichtmetallische Minerale – vor allem Sand, Kies und Zement – dominieren mit etwa 40 %, gefolgt von fossilen Energieträgern (28 %), Biomasse (22 %) sowie Metallen und Spezialrohstoffen (10 %). Etwa drei Viertel dieser Mengen werden im Inland eingesetzt, ein Viertel wird exportiert – der Exportanteil variiert dabei je nach Materialgruppe erheblich und reicht von ca. 11 % bei nichtmetallischen Mineralien bis zu über 70 % bei Metallen.⁴⁷

⁴⁷ Destatis (2023a).

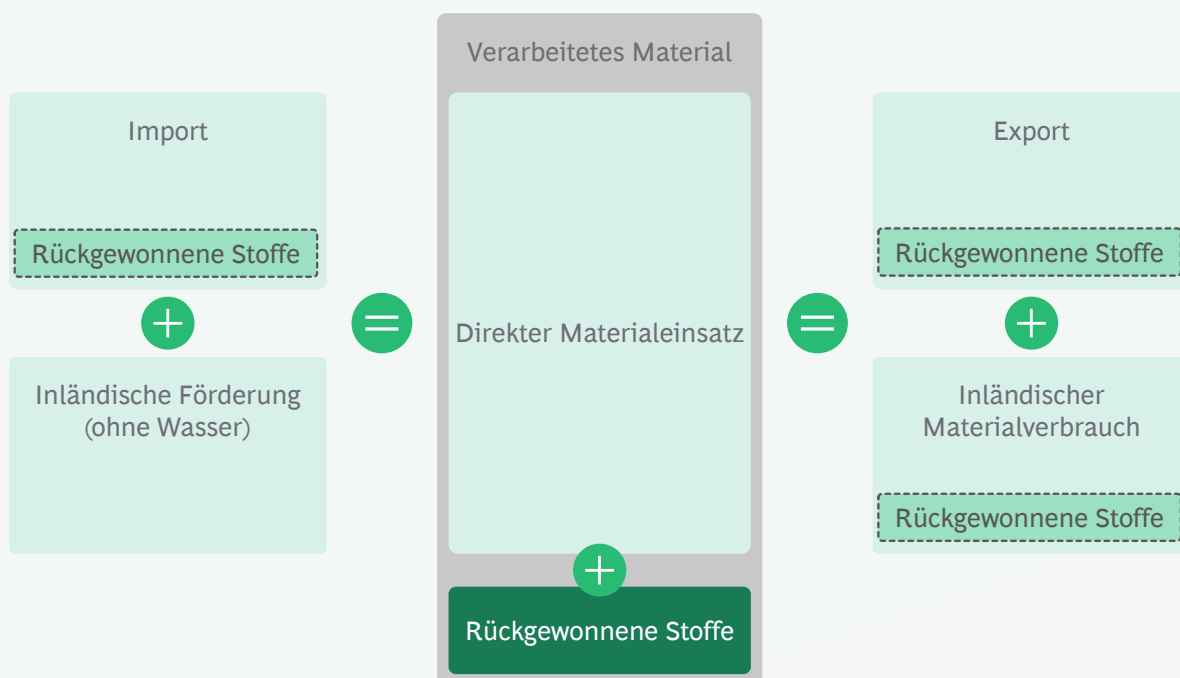
Exkurs 4: Definition zentraler Stoffströme

Materialflüsse zeigen, wie Rohstoffe in die Wirtschaft gelangen, genutzt und wieder ausgeschleust werden. Sie sind Grundlage für die Bewertung von Ressourceneffizienz und Kreislaufführung. Der direkte Materialeinsatz (*Direct Material Input, DMI*) umfasst die Summe aus inländischer Förderung (*Domestic Extraction*) und Importen – also alle Materialien, die in Produktion und Konsum eingehen. Diese verteilen sich auf Exporte und den inländischen Materialverbrauch (*Domestic Material Consumption, DMC*), also das, was tatsächlich im Land genutzt wird:

Import + inländische Förderung = DMI = Export + inländischer Materialverbrauch

Ergänzend zu *DMI* und *DMC* werden Indikatoren auf Basis von Rohstoffäquivalenten genutzt, um die den Importen vorgelagerten Rohstoffentnahmen entlang globaler Lieferketten abzubilden: Der Primärrohstoffeinsatz (*Raw Material Input, RMI*) ersetzt dabei die physischen Importe im *DMI* durch Rohstoffäquivalente. Der Primärrohstoffverbrauch (*Raw Material Consumption, RMC*; „*Material Footprint*“) bildet den exportbereinigten inländischen Verbrauch an Primärrohstoffen ab, indem die in Exporten enthaltenen Rohstoffäquivalente berücksichtigt werden.⁴⁸

Das Stoffdiagramm zur Begriffsdefinition
(2023, in Tonnen)



Hinweis: Der Materialfluss folgt dem Ansatz des Umweltbundesamtes und Eurostat

⁴⁸ Bardt und Neligan (2019).

In dieser Studie werden ausschließlich wertstoffbasierte Ströme betrachtet – Metalle, Minerale und industrielle Materialien, die in Produkten und Anlagen gebunden sind. Biomasse und fossile Energieträger bleiben weitgehend unberücksichtigt; ausgenommen sind beispielsweise Holz für Möbel sowie Öl für die Produktion von Kunststoffen. Die Datengrundlage umfasst ca. 800 Mio. Tonnen Material, wovon etwa 680 Mio. Tonnen in die Analyse einfließen.

Rund 80 % aller prozessbezogenen Materialströme entfallen auf drei Sektoren: Bauwesen, Mobilität und Maschinenbau. Hinzu kommen indirekte Verbräuche von Zwischenprodukten aus anderen Sektoren, wodurch die drei Sektoren noch stärker ins Gewicht fallen. Das Bausegment dominiert in der Tonnage – Sand, Kies, Stahl und Beton machen den größten Teil des inländischen Materialumsatzes aus. Der Blick auf den Materialwert statt nur auf die Masse verändert die Perspektive: Während Bau- und Grundstoffindustrien mengengetrieben sind, tragen Fahrzeug- und Maschinenbau pro Tonne signifikant mehr zur Wertschöpfung bei. Die wertintensivsten

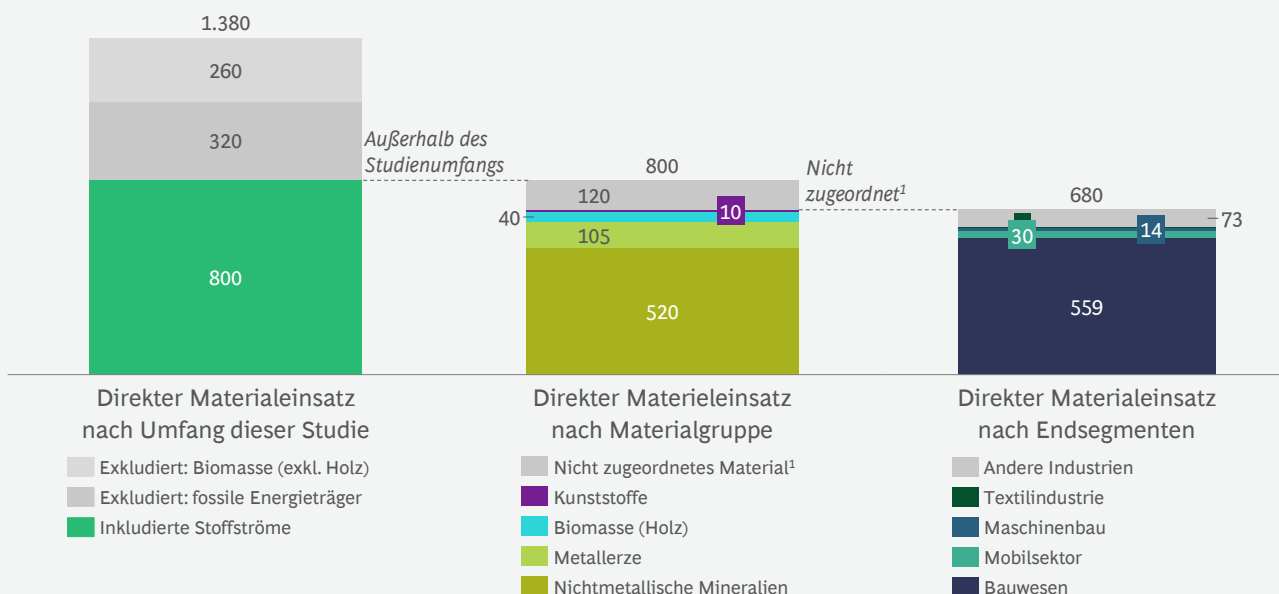
Stoffe – Metalle, Speziallegierungen und Elektronikmaterialien – konzentrieren sich auf die Industriebranchen mit hoher Exportquote und Innovationsdichte. Gerade hier steigt die Abhängigkeit von hochwertigen Materialien und Vorprodukten. Die Kombination aus hohem Materialwert, geringer Substituierbarkeit und geringen Rückführungsquoten zur Wiederaufbereitung macht diese Branchen strukturell verwundbar.

Fünf ausgewählte Endprodukt-Industrien stehen im Fokus der Studie: der Mobilitätssektor (Auto, Bahn, Batterien, ausgenommen Flugzeuge und sonstige Fahrzeuge), der Maschinenbau, das Bauwesen, der Energiesektor sowie der Textilsektor. Diese machen 90 % des erfassten und zugeordneten Materialbedarfs der deutschen Wirtschaft aus (610 Mio. Tonnen).

Die deutsche Industrie setzt prozessbezogene Materialien von ca. 800 Mio. t ein, die für die Circular Economy relevant sind

ABBILDUNG 8 | Direkter Materialeinsatz der deutschen Industrie nach Materialgruppe

Direkter Materialeinsatz
(2023, Primärmaterialien in Mio. t)

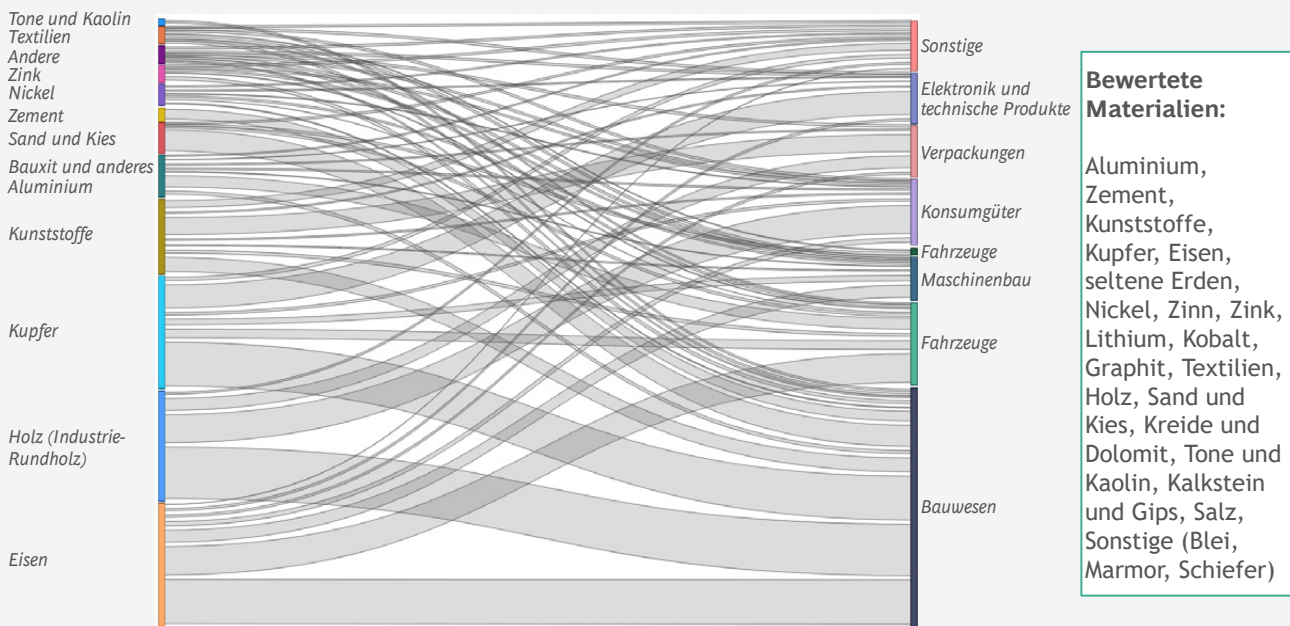


1. Kumulation von Materialien, die aufgrund begrenzter Datenverfügbarkeit nicht auf Branchenebene zugeordnet werden konnten: sonstige nichtmetallische Mineralien, vorwiegend aus nichtmetallischen Mineralien bestehende Produkte, sonstige NE-Metalle, vorwiegend aus fossilen Energieträgern bestehende Produkte, Uran und Thorium, vorwiegend aus Biomasse bestehende Produkte, sonstige Produkte
Quelle: Eurostat, Materialflussrechnungen (env_ac_mfa); Destatis, Statistischer Bericht – Abfallbilanz 2022; BCG-Analyse

Metalle und Holz prägen den materialwertbezogenen Primärmaterialeinsatz in Deutschland

ABBILDUNG 9 | Deutscher Primärmaterialeinsatz nach Materialwert¹

(Primärmaterialien im Jahr 2023, Richtwerte)

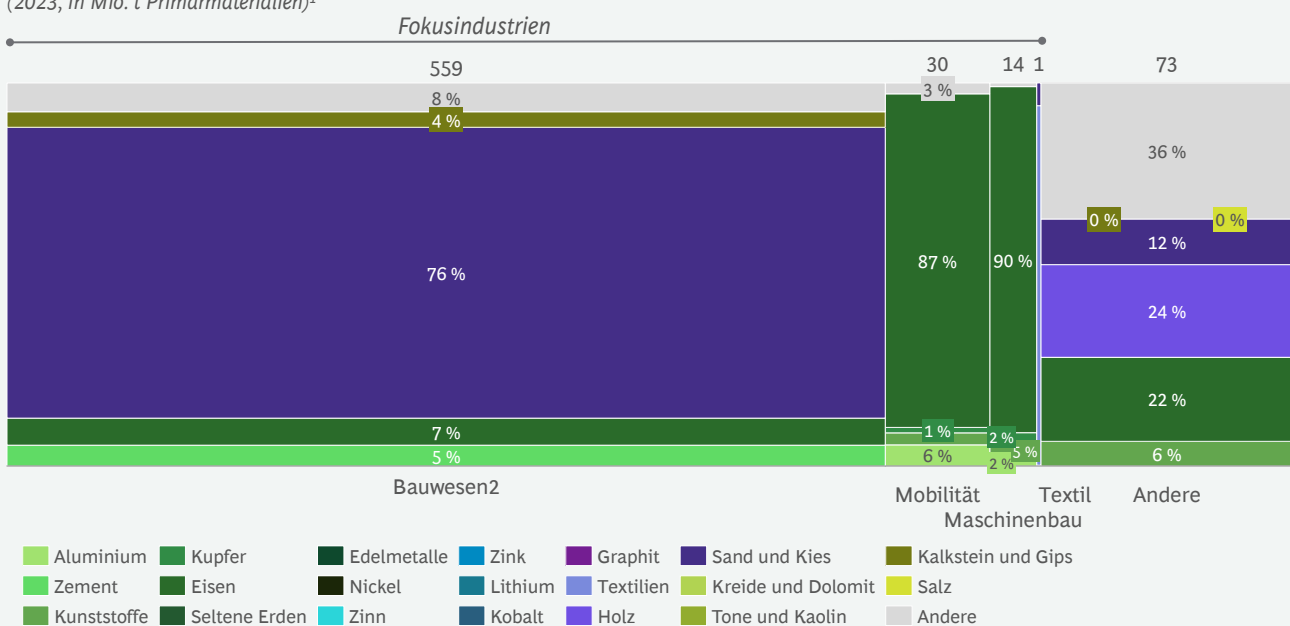


1. Die Materialwertanalyse exkludiert Edelmetalle, da diese im Preis zu unterschiedlich sind und die Ergebnisse verfälschen könnten. Materialien mit einem Gesamtwert von unter € 1 Mrd. wurden unter "Andere" gruppiert. Gesundheitswesen sowie Lebensmittel und Landwirtschaft wurden zusammen mit anderen Anwendungszwecken unter "Sonstige" gruppiert
Quelle: Destatis, Materialflussrechnung 2023; BCG-Analyse

Bauwesen dominiert von Sand und Kies; Eisen und andere Metalle wichtigste Bestandteile in Mobilitätssektor und Maschinenbau

ABBILDUNG 10 | Direkter Materialeinsatz der vier meistgenutzten Materialien pro Industrie

Direkter Materialeinsatz pro Industrie
(2023, in Mio. t Primärmaterialien)¹



1. Umfasst 680 Mio. t zugeordneter Materialtonnage. Ausgeschlossen ist Kumulation von Materialien, die aufgrund begrenzter Datenverfügbarkeit nicht auf Branchenebene zugeordnet werden konnten. Zeigt die 4 meistgenutzten Materialbestandteile pro Industrie 2. Die Produktion von Energie-Anlagen und -Infrastruktur sind in Maschinenbau und Bauwesen enthalten
Quelle: Eurostat, Materialflussrechnungen (env_ac_mfa); Destatis, Statistischer Bericht – Abfallbilanz 2022; BCG-Analyse

2.2 Die deutsche Circular Economy: Fortschrittliches Abfallmanagement, aber Spielraum für mehr Zirkularität

Die Abfalllogistik in Deutschland funktioniert, die Wertschöpfung im Kreislauf nicht. 2023 wurden 380 Mio. Tonnen Abfälle am Ende der Lebensdauer (*End-of-Life-Abfälle*) erfasst; nach Abzug von Produktions-, Bergbau- und biogenen Abfällen verbleiben ca. 290 Mio. Tonnen *End-of-Life-Abfälle*, von welchen 240 Mio. Tonnen in dieser Studie den Industrien zugeordnet wurden. Die dualen Abfallbewirtschaftungs- und Rückführungssysteme, gepaart mit einem hohen Bewusstsein der Verbraucher und der Industrie für Abfalltrennung an der Quelle, ermöglichen hohe Sammel- und Trennraten in vielen Stoffströmen.⁴⁹ Gleichwohl geht Wertschöpfung verloren, da Stoffströme das Land verlassen und die Rückführung in den Kreislauf nur begrenzt nach stofflicher Qualität differenziert erfolgt; zudem werden knapp 10 % der Abfälle energetisch verwertet.

Die formalen Verwertungsraten sind hoch, doch sie können auch strukturelle Schwächen verdecken. Je nach Materialstrom gibt es unterschiedliche Gründe, warum in der Industrieproduktion in Deutschland nicht mehr Rezyklate eingesetzt werden. Baustoffrezyklate müssen höhere regulatorische Anforderungen erfüllen als Primärbaustoffe und werden häufig in öffentlichen Ausschreibungen ausgeschlossen. Kunststoffrezyklate sind aufgrund der Kopplung der Primärmaterialien an den Rohölpreis wirtschaftlich oft nicht wettbewerbsfähig, und bei Metallen wie Stahl und Aluminium ist die Bereitschaft der Industrie, den Mehraufwand für die Bereitstellung hochwertiger Rezyklate zu bonifizieren, derzeit noch nicht besonders ausgeprägt.⁵⁰

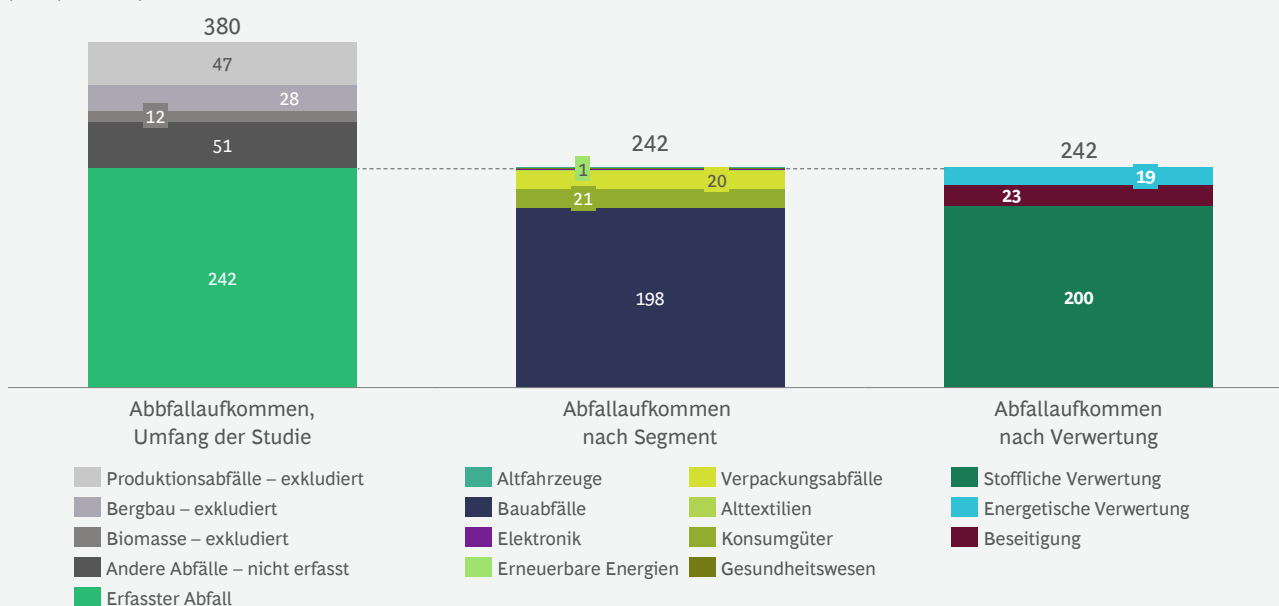
⁴⁹ Beispielsweise PET-Flaschen und Dosen (> 98 %, vgl. DPG [2025]), Altpapier (ca. 85 %, vgl. UBA [2025b]), Altglas (82 %, vgl. bvse [2025] sowie BDI [2023]).

⁵⁰ Pothen und Brock (2021).

Von über 240 Mio. t erfassten und zugeordneten Abfällen entfällt der Großteil auf den Bausektor, die gesamte stoffliche Verwertung liegt bei 80 %

ABBILDUNG 11 | Bilanz Abfälle am Ende des Lebenszyklus, Deutschland

Abfallaufkommen Deutschland
(2023, in Mio. t)¹



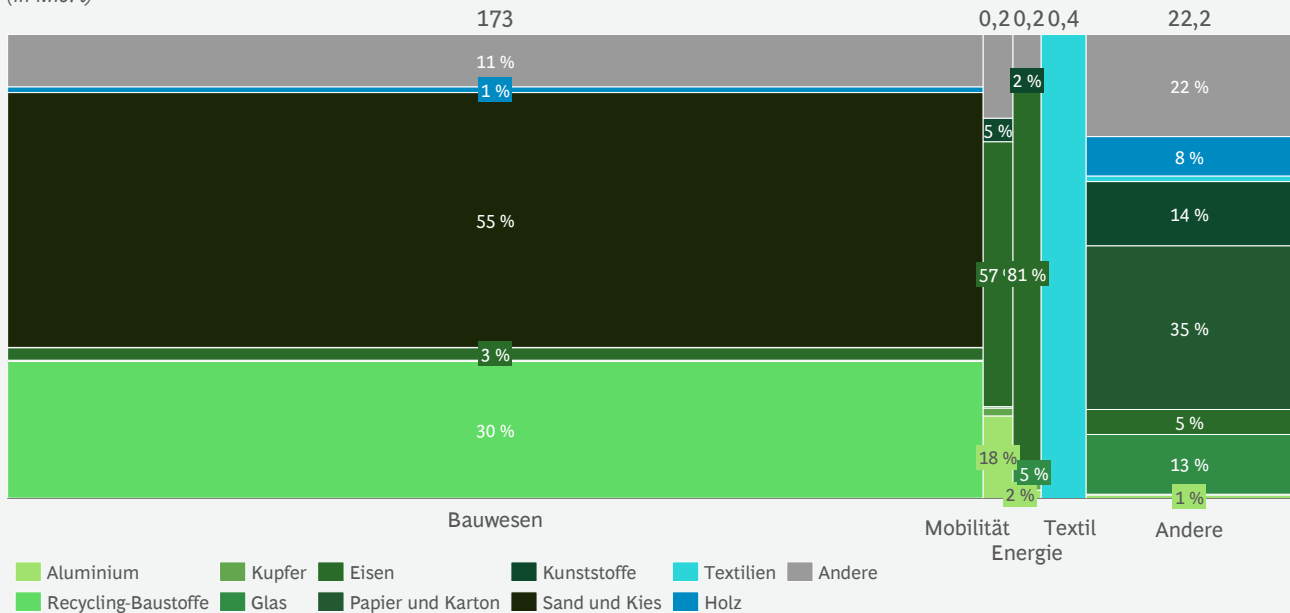
1. Die Abfallbilanz stellt offizielle Schätzungen über die gesamte Abfallmenge an und inkludiert das "Nassgewicht". Neben Bergbau und Biomasse wurden auch Produktionsabfälle exkludiert, die nicht zweifelsfrei zugeordnet werden konnten. Abfallstatistiken stammen teilweise aus anderen Jahren: Bau 2020, Erneuerbare 2020, Verpackungen 2021. Mapping für Branche "Maschinenbau" noch nicht durchgeführt. Dunkelziffer wird nicht aufgeführt
Quelle: Eurostat, Materialflussrechnungen (env_ac_mfa); Destatis, Statistischer Bericht — Abfallbilanz 2022; BCG-Analyse

Mehr als 85 % der rückgewonnenen Materialien kommen aus dem Bauwesen, wo Zement, Sand und Kies dominieren

ABBILDUNG 12 | Volumen stofflich verwerteter Materialien nach Segmenten

Rückgewonnene Materialien aus stofflicher Verwertung

(in Mio. t)¹



1. Die Abfallbilanz stellt offizielle Schätzungen über die gesamte Abfallmenge an und inkludiert das "Nassgewicht". Abfallstatistiken stammen teilweise aus anderen Jahren: Bau 2020, Erneuerbare 2020, Verpackungen 2021. Mapping für Branche "Maschinenbau" noch nicht durchgeführt. Dunkelziffer wird nicht aufgeführt

Quelle: Eurostat, Materialflussrechnungen (env_ac_mfa); Destatis, Statistischer Bericht – Abfallbilanz 2022; BCG-Analyse

Erhebliche Materialmengen fließen in Verwertungswege, die außerhalb der europäischen industriellen Wertschöpfung liegen. Zwar liegt der Anteil nicht erfasster oder nicht gemeldeter Abfälle in den Kernindustrien bei unter 1 %, doch Produkte mit hohem Restwert – etwa Altfahrzeuge, Photovoltaikanlagen und Elektronikgeräte – entziehen sich dem System. Sie werden gehandelt oder exportiert, ohne erfasst zu werden. So werden jährlich 85 % der endgültig abgemeldeten Fahrzeuge als Gebrauchtwagen ins Ausland ausgeführt – nur 15 % werden als Altfahrzeuge in Deutschland verwertet.⁵¹ 30 % der exportierten Fahrzeuge werden in Länder außerhalb der EU ausgeführt, wo diese dann weitergenutzt oder zerlegt werden, ohne je in den EU-europäischen Stoffkreislauf zurückzukehren. Damit gehen der EU perspektivisch strategisch wertvolle Materialien verloren: Stahl, Aluminium, Kupfer, seltene Erden, Lithium und Kobalt.

Die zirkuläre Materialnutzungsrate von 14,5 % zeigt, dass in Deutschland nur ein geringer Teil der Produktion auf Rezyklaten beruht:⁵² Das sind mehr als zwei Prozentpunkte über dem europäischen

Durchschnitt, zeigt jedoch einen Rückstand im Vergleich zu anderen europäischen Industrienationen wie Italien (21 %) und Frankreich (18 %).

Alternative Ansätze, etwa der Circularity Gap Report (CGR) oder die Substitutionsquote des Umweltbundesamts (UBA), wählen andere Systemgrenzen. Der CGR bezieht vorgelagerte Rohstoffverbräuche (*Raw Material Equivalents*) ein, was die Gesamtmenge erhöht und den Anteil von rückgewonnenen Materialien reduziert: Global weist der Wert nur 7 % Zirkularität aus.⁵³ Die Substitutionsquote misst den Anteil tatsächlich ersetzter Primärrohstoffe – in Deutschland geht die Expertenkommission in ihrem Bericht von derzeit etwa 10 – 15 % aus.⁵⁴ Ergänzend werden im EU Kontext auch rohstoffspezifische Recycling-Indikatoren genutzt, z. B. die *End of Life Recycling Input Rate (End-of-Life RIR)*. Sie beschreibt – je Rohstoff – den Anteil des Materialinputs in das Produktionssystem, der aus Recycling von Post Konsumenten Schrott stammt. Alle genannten Indikatoren bleiben jedoch in ihrer Logik überwiegend Materialfluss- und Recycling-orientiert.

⁵¹ UBA (2023).

⁵² Die *Circular Material Use Rate* in Deutschland betrug im Jahr 2023 gemäß Eurostat 14,5 %. Sofern man die in dieser Studie bewerteten Abfallströme zur Grundlage nimmt (z. B. Exklusion von Biomasse oder fossilen Materialien), erhöht sich die Sekundärrate z. B. für wertvolle Metalle, vgl. Eurostat (2025b).

⁵³ Circle Economy und Deloitte (2024).

⁵⁴ ifeu (2021).

Exkurs 5: Zirkuläre Materialnutzungsrate und andere Zirkularitätsindikatoren

Es existieren unterschiedliche Maßzahlen für den Anteil an Zirkularität in Wirtschaftssystemen. Viele der etablierten Indikatoren sind mengenbasierte KPIs, die Zirkularität vor allem über Recycling-Ströme messen.

Eurostat nutzt als Leitindikator die zirkuläre Materialnutzungsrate (*Circular Material Use Rate, CMUR*). Sie misst den Anteil der rückgewonnenen Materialien aus stofflicher Verwertung (in Mio. Tonnen) am inländischen Materialverbrauch (*Domestic Material Consumption, DMC* – direkter Materialeinsatz abzüglich Exporte). Rückgewonnene Materialien werden dabei näherungsweise aus Abfallstatistiken abgeleitet (inländisch recycelte Abfälle minus importierte Abfälle zur Verwertung plus exportierte Abfälle zur Verwertung). Die *CMUR* ist damit ein mengenbasierter Makroindikator, der eine praktikable, aber notwendigerweise vereinfachende Einordnung der Zirkularität erlaubt.

Konzeptionell bildet sie Kreislaufführung vor allem über Recycling ab; R-Strategien vor dem Recycling werden in dieser Kennzahl in der Regel nicht unmittelbar⁵⁵ sichtbar.

2023 lag diese EU-weit bei 11,8 %. Wenn man Biomasse (10,1 %) und fossile Rohstoffe (3,4 %) ausnimmt, zeigt sich naturgemäß ein höherer Wert für Metalle (24,7 %) und Mineralien (13,6 %).⁵⁶ Die EU strebt bis 2030 eine Verdopplung der *CMUR* an, was unter anderem durch einen Mix aus mehr Recycling von Abfällen und geringerem Materialeinsatz in der Wirtschaft erreicht werden soll.⁵⁷ Während der *Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2024* ein Potenzial von 22 % *CMUR* bei vollständiger Verwertung der Abfallmenge aus gibt,⁵⁸ schätzt der WWF den realistischen *CMUR*-Wert für Deutschland bis 2030 bei 18 %.⁵⁹

Indikatoren, die neben Recycling auch vorgelagerte R-Strategien berücksichtigen, setzen stärker auf die Abbildung von Produkt- und Komponenten-Schleifen sowie der Nutzungsdauer. Beispiele sind die *Circular Transition Indicators (CTI)* des WBCSD und der *Material Circularity Indicator (MCI)* der Ellen MacArthur Foundation. Während *CTI* den Anteil zirkulärer Zu- und Abflüsse so definiert, dass darunter ausdrücklich auch Wiederverwendung, Reparatur, *Refurbishment* und *Remanufacturing* fallen (und nicht nur Recycling), ermöglicht der *MCI* eine produktbezogene Bewertung, bei der die Wiederverwendung und eine verlängerte Nutzungsdauer positiv wirken.^{60,61}

Vorgelagerte R-Strategien spielen eine zentrale Rolle für eine wirksame Zirkularität und reichen von werthaltigem Produktdesign, Qualität und Langlebigkeit über Reparatur bis hin zu industrieller (Wieder-)Aufarbeitung. Ihre Bedeutung und Marktdurchdringung variieren jedoch stark zwischen den Branchen und werden daher in Kapitel 3 segment-spezifisch vertieft analysiert (siehe insb. Kapitel 3.4.2). Insgesamt werden ca. 40 Mrd. Euro zirkulärer Wertschöpfung außerhalb des klassischen Recyclings

generiert, insbesondere durch Reparaturaktivitäten in den Segmenten Mobilität (15 Mrd. Euro) sowie Maschinenbau (11 Mrd. Euro).

Trotz hoher stofflicher Verwertungsquoten ist die Mehrheit der Geschäftsmodelle in Deutschland noch nicht auf Zirkularität ausgerichtet. Entsprechende Konzepte sind heute zwar in einzelnen Branchen etabliert, etwa das Reparaturgeschäft im Mobilitäts- oder im Maschinenbausegment; trotzdem erreichen sie im gesamtwirtschaftlichen Kontext und über Segmente hinweg noch geringe Volumina. Gründe sind fehlende Reparierbarkeit vieler Produkte, eingeschränkte Ersatzteilverfügbarkeit, hohe Arbeitskosten, eingeschränkte Reverse-Logistik sowie bislang wenig skalierte Geschäftsmodelle für längere Nutzungsphasen⁶², modulare Upgrades oder produktbegleitende Services. Die Wertschöpfung konzentriert sich auf das Ende des Lebenszyklus, während die potenziell wesentlich wirkungsvolleren Zirkularitätsstrategien am Anfang und während der Nutzung kaum zur Anwendung kommen. Dieses Missverhältnis erklärt, warum die Circular Economy heute noch keinen systemischen industriellen Beitrag leistet.

⁵⁵ Indirekt jedoch über die Reduktion des direkten Materialverbrauchs.

⁵⁶ EEA (2025).

⁵⁷ EEA (2023).

⁵⁸ ASA et al. (2024).

⁵⁹ WWF (2023).

⁶⁰ Ellen MacArthur Foundation und ANSYS Granta (2019).

⁶¹ WBCSD (2026).

⁶² Im Mobilitäts- und Maschinenbausegment sind, wie später in der Studie angeführt, Geschäftsmodelle für die Verlängerung von Nutzungsdauern teilweise weitgehend etabliert.

3 Potenziale für 2045: Zielbilder und Business-Cases

3.1 Zielbilder 2045: Drei modellierte Entwicklungspfade

Im Mittelpunkt der Potenzialanalyse dieser Studie stehen vier Kernmetriken: Bruttowertschöpfung (BWS), Investitionen, Materialbedarf und Materialeffizienz. Sie beschreiben die Auswirkungen erhöhter Zirkularität und ermöglichen differenzierte Einblicke in die Unterschiede zwischen Pfaden und Segmenten. Die Metrik Bruttowertschöpfung zeigt aus volkswirtschaftlicher Perspektive, welchen ökonomischen Mehrwert die Circular Economy für Deutschland generieren kann. Die Metrik Investitionen – im Folgenden neben dem Ausbau von Sammel-, Sortier- und Recycling-Infrastruktur auch für den Aufbau von *Refurbishment*- und *Remanufacturing*-Kapazitäten, IT- und Systeminfrastrukturen sowie für Forschung und Entwicklung ausgewiesen – ordnet ein, welche finanziellen Mittel erforderlich sind, um die jeweiligen Pfade technisch und systemisch zu realisieren. Die Metriken Materialbedarf und Materialeffizienz wiederum erlauben Einblicke in den ökologischen Mehrwert zirkulärer Ansätze und zeigen, wie sich der Materialeinsatz reduziert und wie Materialien durch veränderte Nutzungskonzepte effizienter eingesetzt werden können – also wie mit weniger Input derselbe oder ein höherer Output erzielt werden kann.

Um das Potenzial der Circular Economy für den Industriestandort Deutschland zu quantifizieren, wurden drei Szenarien modelliert, die den Einfluss unterschiedlicher Zirkularitätsgrade auf die beschriebenen Kennzahlen bis zum Jahr 2045 abbilden. Die Pfade unterscheiden sich hinsichtlich der Ambition der betrachteten Kreislaufhebel, der notwendigen Rahmenbedingungen und der Höhe der Disruption bestehender Wertschöpfungsstrukturen:

Basispfad: Fortführung bestehender Rahmenbedingungen

Der Basispfad umfasst die Fortschreibung der heute gesetzten regulatorischen und marktseitigen Rahmenbedingungen bis 2045. Er bildet die Referenz für bestehende Trends und Programme – etwa CO₂-Bepreisung, *EU-ETS*, Recycling-Quoten und Elektrifizierungsvorgaben. Zirkularität entwickelt sich vor allem im Rahmen beschlossener Instrumente und regulatorischer Vorgaben sowie marktreifer Geschäftsmodelle; Investitionen und Effizienzgewinne bleiben auf inkrementelle Prozessoptimierungen beschränkt.

Intensivierungspfad: Beschleunigte Transfor- mation durch Politik und Innovation

Der Intensivierungspfad geht von einem gezielten Ausbau institutioneller und marktwirtschaftlicher Rahmenbedingungen aus, die neue, profitable Geschäftsmodelle fördern. Bestehende Wertschöpfungsstrukturen werden weiterentwickelt, Zirkularität wird zu einem festen Bestandteil industrieller Wettbewerbsfähigkeit. Prämisse des Intensivierungspfads ist, dass die Umsetzung der Hebel nicht zulasten der Wettbewerbsfähigkeit beteiligter Akteure des Wertschöpfungskreislaufs führen darf.

Der Pfad kombiniert höhere Investitionen mit steigender Ressourceneffizienz und etabliert Zirkularität als integralen Bestandteil der industriellen Transformationsagenda, ohne bestehende Industriestrukturen aufzubrechen.

Circular Economy 2045: Vier zentrale Bewertungsmetriken betrachtet

ABBILDUNG 13 | Zentrale Bewertungsmetriken der Studie



Quelle: BCG-Analyse

Maximierungspfad: Zirkularität als Kernbestandteil deutscher Industriepolitik

Der Maximierungspfad beschreibt eine Umstellung hin zu einer maximal kreislaufgeschlossenen, ressourcen-effizienten Industrie unter Verschiebung von Wertschöpfungsstrukturen. Im Mittelpunkt steht die Maximierung der Materialeffizienz bei stabilem Bruttowertschöpfungsniveau. Die Transformation basiert auf disruptiven Technologien und integrierten Wertschöpfungssystemen, die sich auch auf bestehende Industriestrukturen auswirken. Das Szenario setzt voraus, dass neue Technologien, digitale Rückverfolgbarkeit und standardisierte Materialsysteme flächendeckend verfügbar sind und Zirkularität Kernbestandteil deutscher Industriepolitik wird.

Limitationspfad (nicht modelliert)

Ein alternatives Zielbild bildet die Einhaltung der planetaren Grenzen ohne Berücksichtigung wirtschaftlicher Wachstumskennzahlen ab. Es wird in dieser Studie nicht im Detail ausgearbeitet, da hier Resilienz nur in Kombination mit Wettbewerbsfähigkeit im Fokus steht, sollte aber in einer umfassenden ökologischen Bewertung berücksichtigt werden.

Die Studie fokussiert sich im Folgenden auf fünf ausgewählte Endprodukt-Industrien: den Mobilitätssektor (Auto, Bahn, Batterien, ausgenommen Flugzeuge und sonstige Fahrzeuge), den Maschinenbau, das Bauwesen, den Energiesektor sowie den Textilsektor. Die Materialwirtschaft ist indirekt inkludiert, weil ihre Erzeugnisse maßgebliche Zwischenprodukte für die Fokusindustrien darstellen. Kunststoffe sind ein zentraler Hebel für die industrielle Circular Economy und werden dieser Analyse zufolge der Chemiebranche zugeordnet. Ihr Beitrag entfaltet sich vor allem als Schlüsselmaterialie in industriellen Wertschöpfungsketten, weshalb sie nicht separat, sondern als integraler Bestandteil der fünf Fokusindustrien betrachtet werden. Verpackungsmaterialien für Konsumgüter bleiben bewusst unberücksichtigt, da der Fokus auf industriellen Stoffströmen liegt.

ABBILDUNG 14 | Ambitionsniveaus der möglichen Entwicklungspfade

Modellierte Entwicklungspfade

1	2	3	4
Basispfad	Intensivierungspfad	Maximierungspfad	Limitationspfad
<i>Fortführung der 2025 gesetzten Rahmenbedingungen bis 2045</i> - Umsetzung bestehender und beschlossener Regulierungen (z. B. EU-ETS 2, CO₂-Bepreisung, Recycling-Quoten) - Aktivierung dadurch profitabler Business-Cases und Trends (z. B. Elektrifizierung, EE-Ausbau)	<i>BWS¹-Maximierung in bestehenden Wert-schöpfungsstrukturen</i> - Ausbau institutioneller und marktwirtschaftlicher Rahmenbedingungen für neue, profitable Geschäftsmodelle - Skalierung bestehender Business-Cases durch unternehmerisches Potenzial und Makro-Entwicklungen (z. B. Knappheit)	<i>Materialeffizienz-Maximierung bei grunds. stabilem BWS¹-Wachstum</i> - Ableitung von disruptiven Transformationshebeln für eine maximal zirkuläre Wirtschaft - Unter Berücksichtigung von - stabiler BWS¹ (vs. Basispfad) - technologischen Grenzen - begrenzten Ressourcen	<i>Einhaltung planetarer Grenzen ohne BWS¹-Berücksichtigung</i> <i>Depriorisiert und nicht weiter in dieser Studie ausgeführt</i>

BCG + BDI

Die fünf analysierten Industriesegmente repräsentieren wertschöpfungsstarke und ressourcenintensive Bereiche der deutschen Industrie und erwirtschafteten 2023 gemeinsam mehr als 62 % der industriellen Bruttowertschöpfung (ca. 1.000 Mrd. Euro).⁶³ Laut Destatis betrug die gesamtdeutsche Bruttowertschöpfung im Jahr 2023 ca. 2.900 Mrd. Euro⁶⁴ (im Vergleich zu ca. 4.200 Mrd. Euro BIP), davon entfielen etwa 1.600 Mrd. Euro (ca. 55 %) auf die Industrie.

Der heutige Beitrag der Circular Economy zur deutschen Wertschöpfung ist noch vergleichsweise gering; im Jahr 2023 betrug er ca. 60 Mrd. Euro.⁶⁵ Dazu zählen Aktivitäten wie beispielsweise Reparaturen im Bereich Pkw und Maschinenbau oder bei der Abfallsammlung, -beseitigung und -rückgewinnung, nicht jedoch die Neuproduktion von Ersatzteilen.⁶⁶ Die vorliegende Studie analysiert einen Teilbereich dieser Aktivitäten in den fünf betrachteten

Industriesegmenten, die 2023 eine gemeinsame Bruttowertschöpfung von ca. 20 Mrd. Euro ausmachten und in denen in den kommenden 20 Jahren die größten ökonomischen, ökologischen und strategischen Potenziale erwartet werden. Bereiche, die bereits heute weitgehend etabliert sind und damit vergleichsweise geringeres Potenzial zur weiteren Optimierung aufweisen – etwa bestimmte Reparaturen in einzelnen Segmenten – oder Kreislaufhebel außerhalb der priorisierten Segmente (z. B. Gebrauchsgüter) werden in der Analyse nicht weiter vertieft.⁶⁷

⁶³ Destatis (2023b).

⁶⁴ Destatis (2023b).

⁶⁵ Umfasst Pkw-Reparatur (15 Mrd. Euro), Maschinenreparatur/-instandhaltung (11 Mrd. Euro), Gebrauchsgüterreparatur (1,7 Mrd. Euro), Abfallsammlung, -beseitigung und -rückgewinnung (19,7 Mrd. Euro), Handel von Altmaterialien/Reststoffen (1,9 Mrd. Euro) sowie Sanierungsleistungen (11 Mrd. Euro); vgl. Destatis (2023).

⁶⁶ Umfasst sowohl thermische Verwertung als auch Recycling.

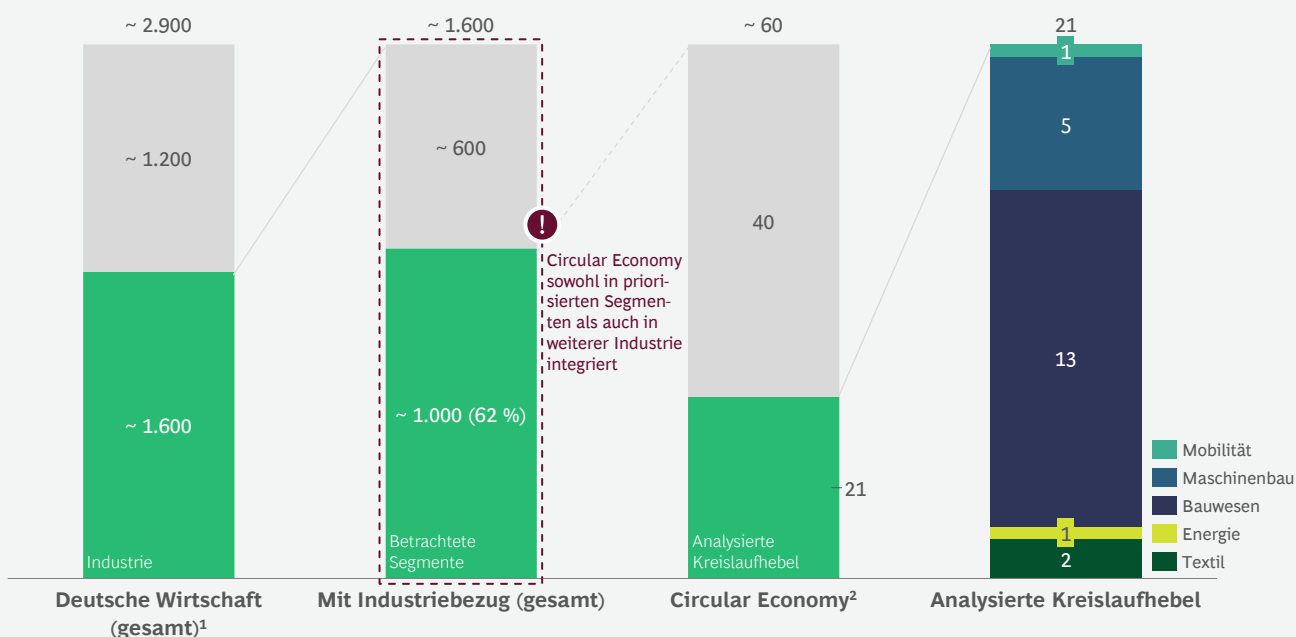
⁶⁷ Für diesen Anteil der Bruttowertschöpfung wird stattdessen eine Fortschreibung der Bruttowertschöpfung unter Berücksichtigung der erwarteten Inflation vorgenommen.

Analysierte Kreislaufhebel aktuell mit einer Bruttowertschöpfung von über € 20 Mrd.

ABBILDUNG 16 | Bruttowertschöpfung in Deutschland nach Industrien sowie Circular Economy-Aktivitäten

Bruttowertschöpfung Deutschland nach Industrien und Aktivitäten

(in Mrd. €, 2023)



1. Gesamte deutsche Wertschöpfung, inkl. Industrie, Dienstleistungen, Gesundheitswesen 2. Beinhaltet Pkw-Reparatur (€ 15 Mrd.), Maschinenreparatur/-instandhaltung (€ 11 Mrd.), Gebrauchsgüterreparatur (€ 1,7 Mrd.), Abfallsammlung, -beseitigung und -rückgewinnung (€ 19,7 Mrd.), Handel von Altmaterialien/Reststoffen (€ 1,9 Mrd.) sowie Sanierungsleistungen (€ 11 Mrd. – basierend auf BCG-Modell)

Quelle: Destatis; BCG-Analyse

Exkurs 6: Internationale Rahmenannahmen 2045 – *Belief Parameters* der Studie

Deutschland agiert 2045 in einer Welt, die von anhaltender Rohstoffknappheit, geopolitischer Unsicherheit und wachsenden Klimarisiken geprägt ist. Alle drei modellierten Pfade – Basispfad, Intensivierungspfad und Maximierungspfad – teilen folgende globale Annahmen:

- **Rohstoffe bleiben knapp und teuer.** Die weltweite Nachfrage nach versorgungskritischen Metallen, Mineralien und biogenen Materialien übersteigt das Angebot. Förderkapazitäten konzentrieren sich auf wenige Länder, politische Risiken steigen. Unter anderem werden Recycling, Materialeffizienz und Wiederverwendung zum Kern industrieller Wettbewerbsfähigkeit.
- **Energiepreise und Klimarisiken bleiben hoch.** Globale Lieferketten bleiben anfällig, Betriebskosten gerade in Deutschland hoch. CO₂-Preise steigen weiter, Klimawandelfolgen und Extremwetter erhöhen den Anpassungsdruck auf Wirtschaft und Infrastruktur.
- **Regulierung und Gesellschaft verankern Zirkularität.** Bis 2045 behält die EU den Regulierungsdruck auf Ressourceneinsatz und nachhaltiges Sourcing, Ökodesign-Standards und digitale Produktpässe bei. Märkte und Konsumenten honorieren zunehmend Ressourceneffizienz.
- **Geopolitische Macht verschiebt sich.** China etabliert sich neben den USA als führende Industrie- und Technologiemacht; neue Märkte entstehen in Lateinamerika, Afrika und Südostasien. Deutschland und die EU bleiben exportorientiert, müssen ihre Stärke jedoch über Technologie, Innovation und Ressourceneffizienz sichern.

3.2 Potenzial von > 65 Mrd. Euro zusätzlicher Bruttowertschöpfung in Fokussegmenten bei erhöhter Materialeffizienz und Rohstoffunabhängigkeit

Bei konsequenter Umsetzung der identifizierten Kreislaufhebel kann die durch die Circular Economy erreichte Bruttowertschöpfung von ca. 60 Mrd. Euro im Jahr 2023 auf bis zu 125 Mrd. Euro⁶⁸ im Jahr 2045 anwachsen – mehr als doppelt so viel wie heute. Damit entspräche die Wertschöpfung der Circular Economy im Jahr 2045 in etwa der heutigen wirtschaftlichen Größenordnung des deutschen Maschinenbaus.⁶⁹ Die analysierten Hebel selbst steigern ihre gemeinsame Wertschöpfung von ca. 20 Mrd. Euro (2023) auf jährlich 55 bis 65 Mrd. Euro bis 2045 im Intensivierungspfad bzw. 65 bis 70 Mrd. Euro im Maximierungspfad – und damit auf mehr als das Dreifache ihres heutigen Niveaus. Die zirkuläre Bruttowertschöpfung dieser Hebel entspricht – unter

konservativen Annahmen zum Effekthochlauf – 700 bis 880 Mrd. Euro im Intensivierungspfad und 750 bis 920 Mrd. Euro im Maximierungspfad.

Der Großteil des Potenzials entfällt auf verstärkte Aktivitäten in den Bereichen *Reuse* und *Remanufacturing*, die Ausweitung hochwertiger Recycling-Kapazitäten sowie segmentspezifische Effizienzhebel. Die jeweiligen Hebel wurden ausgewählt unter der Prämisse von mindestens stabilen Wertschöpfungsbeiträgen sowie, im Intensivierungspfad, unter Beibehaltung bestehender Industrie- und Wertschöpfungsstrukturen. Gleichzeitig berücksichtigt die Bruttowertschöpfungsbetrachtung bereits Kannibalisierungseffekte für die deutsche Wirtschaft – also eine potenzielle Reduktion der Primärmaterialproduktion beispielsweise infolge der Wirkung von Hebeln zur Lebensdauerverlängerung.⁷⁰

Um das identifizierte jährliche Potenzial zu realisieren, sind gezielte Einmalinvestitionen erforderlich – diese belaufen sich kumuliert bis 2045 im

⁶⁸ Alle Beträge sind nominale Werte und nicht inflationsbereinigt.

⁶⁹ Wirtschaftszweig: Herstellung von Maschinen (WZ08-28), exkl. verbundener Services, vgl. Destatis (2023b).

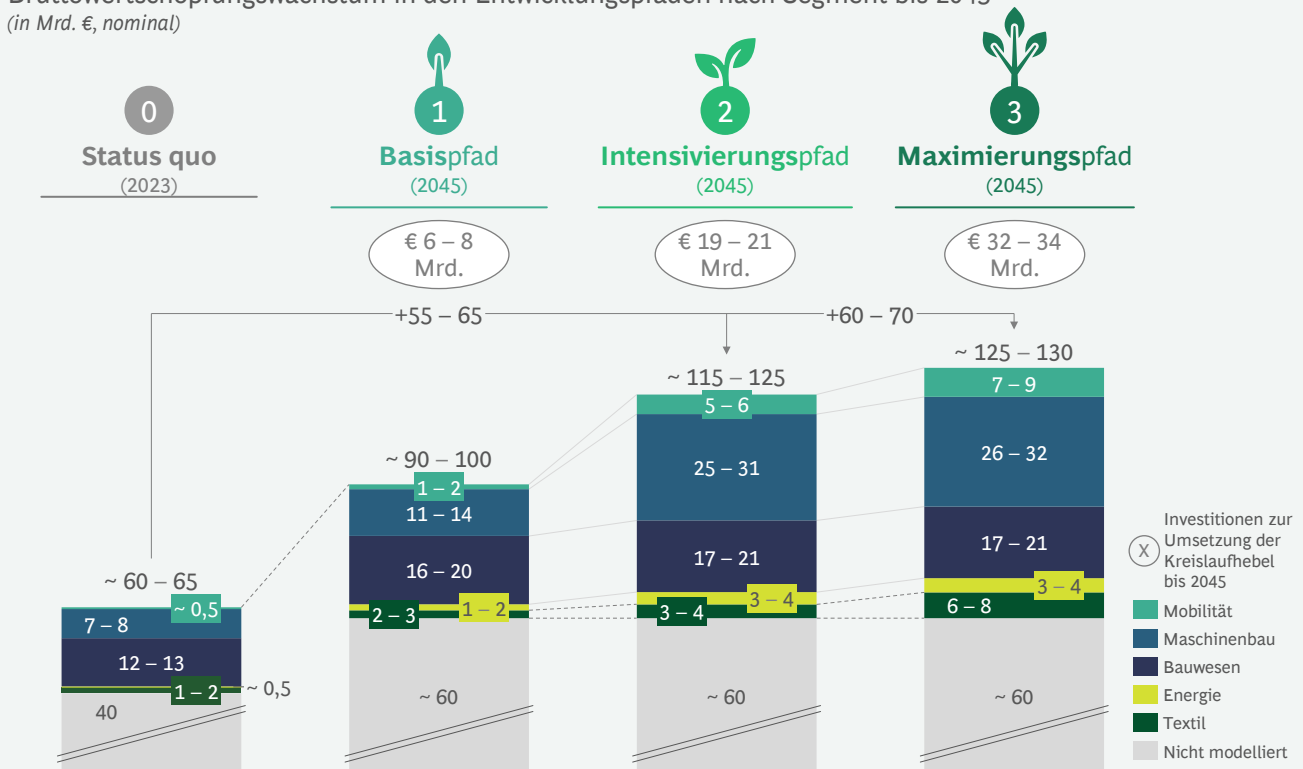
⁷⁰ Infolge einer Reduktion der Primärmaterialproduktion verringern sich je nach betrachtetem Stoffstrom außerdem Importvolumina – was sich zusätzlich positiv auf Abhängigkeiten auswirken kann.

Deutsche Fokusindustrien mit bis zu € 125 Mrd. BWS-Potenzial bis 2045 im Intensivierungspfad

ABBILDUNG 17 | Bruttowertschöpfungswachstum nach Segmenten in verschiedenen Entwicklungspfaden bis 2045

Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Segment bis 2045

(in Mrd. €, nominal)



Intensivierungspfad auf etwa 20 Mrd. Euro, im Maximierungspfad auf etwa 33 Mrd. Euro. Umgelegt auf den Investitionszeitraum, entspricht dies etwa 3 – 6 % des jährlichen Volumens an Investitionen in kreislaufwirtschaftsnahe Bereiche (je nach betrachtetem Pfad). Der größte Anteil davon entfällt auf den Aufbau von Sammel-, Sortier- und Recycling-Infrastrukturen (7 bis 8 Mrd. Euro im Intensivierungspfad und 15 bis 17 Mrd. Euro im Maximierungspfad). Die restlichen Investitionen verteilen sich auf Forschung und Entwicklung, die Integration digitaler Lösungen sowie den Aufbau von *Remanufacturing*-Strukturen. Neben einem verlässlichen regulatorischen Rahmen sind zur Realisierung der Potenziale auch technologische Weiterentwicklungen und Impulse aus der Industrie sowie verstärkte Industriekooperationen notwendig.

Über die ökonomischen Effekte hinaus kann eine stärkere Kreislaufführung erheblichen ökologischen Mehrwert schaffen – vor allem durch eine Reduzierung des Materialbedarfs und eine höhere Materialeffizienz. In den Segmenten Mobilität, Energie und Textil könnten im Maximierungspfad

im Vergleich zu den Materialbedarfen des Jahres 2023 bis zu ca. 0,6 Mio. Tonnen an zusätzlichen direkten Einsparungen erreicht werden (ca. 0,3 Mio. Tonnen im Intensivierungspfad) – primär infolge von *Reuse*, *Refurbishment* und *Remanufacturing*. Die im Bausegment betrachteten Kreislaufhebel – im Intensivierungspfad vorrangig eine erhöhte Sanierungsaktivität ohne Kannibalisierung des Neubaus – würden im Jahr 2045 gegenüber 2023 zwar einen erhöhten Materialbedarf von 1,7 Mio. Tonnen hervorrufen (Intensivierungspfad), allerdings steht dem ein überproportionales, dabei ressourceneffizienteres Wachstum des Wohnungsbaus gegenüber. Der durchschnittliche Materialeinsatz pro neu geschaffenen Wohnraum könnte dank dieser Effizienz bis 2045 um 2 % sinken. In allen betrachteten Segmenten könnte sich darüber hinaus eine Rezyklatverfügbarkeit in Höhe von 80 Mio. (Maximierungspfad) bis 83 Mio. Tonnen⁷¹ (Intensivierungspfad) ergeben – was einem Anteil von ca. 14 % des direkten Materialeinsatzes in den betrachteten Segmenten entspricht.

⁷¹ Diese Betrachtung berücksichtigt bereits eine zugrundeliegende Recycling-Effizienz der jeweiligen Stoffströme.

Wenn die Aufbereitung in Deutschland weiter ausgebaut würde, könnte sich daraus bis 2045 außerdem eine signifikant reduzierte Importabhängigkeit für Unternehmen ergeben: In den Segmenten Mobilität, Energie und Maschinenbau eine Reduktion von 20 – 40 % für seltene Erden sowie von 10 – 15 % für strategische Batteriematerialien. Weiterhin ergibt sich bei Substitution von Primärmaterial durch das Rezyklat sowie selbst unter Berücksichtigung der Nettoerhöhung des Materialbedarfs⁷² eine Emissionsreduktion in Höhe von 11 Mio. CO₂e im Vergleich zu 2023. Die Systemgrenzen bei der Emissionsbetrachtung gehen allerdings über Deutschland hinaus, was bedeutet, dass die tatsächlichen Emissionseinsparungen nicht vollends auf Deutschland umgemünzt werden können.

Die exakte Herleitung der hier dargestellten ökonomischen, ökologischen und strategischen Potenziale sowie die Darstellung der wichtigsten zugrundeliegenden Annahmen⁷³ erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln für jedes priorisierte Segment.

Neben den quantitativen Effekten eröffnet die Circular Economy in allen Segmenten zusätzliche strategische Chancen.

- Im **Mobilitätssegment** ermöglicht sie die Reduktion von Abhängigkeiten von kritischen Rohstoffen und unterstützt Dekarbonisierungsziele der Unternehmen.
- Im **Maschinenbau** eröffnen zirkuläre Geschäftsmodelle zusätzliche Wachstumschancen und Exportpotenziale.
- Im **Bauwesen** unterstützt die Circular Economy einen ressourceneffizienten Materialeinsatz und erhöht damit die Materialeffizienz beim Wohnungsbau.
- Im **Energiesegment** hilft sie, den Netzausbau sowie den Ausbau der erneuerbaren Energien und der Speicherinfrastruktur kosteneffizienter zu gestalten.
- Im **Textilsegment** besteht die Chance, Wertschöpfung in die EU zurückzuverlagern und neue geschlossene Kreisläufe zur Stärkung der regionalen Industrie aufzubauen.

⁷² Die Einsparungen in den Segmenten Mobilität, Maschinenbau, Energie und Textil werden durch den zusätzlichen Materialbedarf im Bereich Infrastruktur überkompensiert.

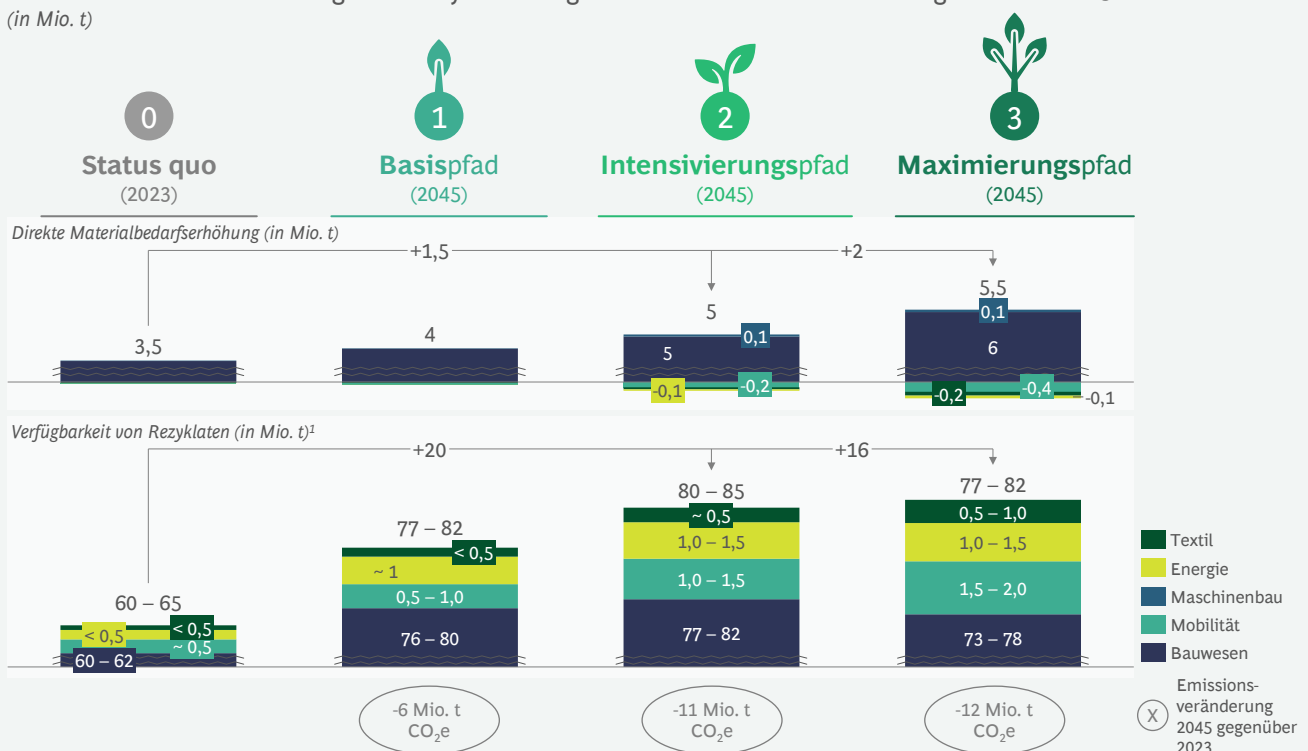
⁷³ Eine detaillierte Auflistung aller notwendigen Quellen und Annahmen ist im Anhang zu finden.

20 Mio. t zusätzliche Rezyklate bis 2045 im Intensivierungspfad möglich

ABBILDUNG 18 | Materialbedarf und Rezyklate nach Segmenten und Entwicklungspfaden bis 2045

Materialbedarfsveränderung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2045

(in Mio. t)



Diese Studie setzt bewusst auf einen ökonomisch fundierten Bewertungsansatz für die Potenziale der Circular Economy, um belastbare, umsetzungsnahe Ergebnisse für Industrie und Politik unter realistischen Rahmenbedingungen abzuleiten.

Während andere Studien primär auf die Maximierung ökologischer Potenziale abzielen oder theoretische Kreislaufhebel ausreizen, die weitreichende politische Eingriffe voraussetzen (und häufig mit negativer Auswirkung auf die Bruttowertschöpfung einhergehen), wurden der vorliegenden Analyse mit Bedacht konservative Annahmen zugrunde gelegt. Im Fokus stehen dabei – neben den inhärenten ökologischen Vorteilen der Circular Economy – insbesondere die ökonomischen und strategischen Potenziale für den Industriestandort Deutschland und seine Unternehmen. Ziel ist es aufzuzeigen, welche Potenziale bis 2045 realistisch gehoben werden können, ohne tiefgreifende politische Interventionen oder disruptive Veränderungen bestehender Wertschöpfungsstrukturen. Dieser robuste Ansatz gewinnt vor dem Hintergrund stagnierenden Wirtschaftswachstums, nachlassender Wettbewerbsfähigkeit und zunehmender globaler Versorgungsunsicherheiten an Bedeutung. Entsprechend konzentriert sich die Analyse auf solche Kreislaufhebel in den priorisierten Segmenten, die entweder bereits heute wirtschaftlich tragfähig sind und bis 2045 skaliert werden können oder bei denen eine Entwicklung hin zur Rentabilität bis 2045 realistisch absehbar ist. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die analysierten Potenziale für jedes Fokussegment genauer erläutert, sodann die Bedeutung zirkulärer Anwendungen industrieübergreifend betrachtet. Kapitel 4 skizziert anschließend die für die Realisierung zentralen Handlungsfelder in Industrie und Politik.

3.3 Mobilität: Eine Schlüsselindustrie im Umbruch mit Potenzial für erhöhte Resilienz durch Circular Economy

Zusammenfassung

- Die **betrachteten Kreislaufhebel können** im Intensivierungspfad bis 2045 zusätzlich bis zu 4,8 Mrd. Euro jährliche Bruttowertschöpfung und ca. 1,1 Mio. Tonnen Materialeffekte (direkte Einsparung und Primärsatz) im Vergleich zu heute **erschließen**.
- Durch Batterie-Recycling könnte die **Importabhängigkeit bei zentralen Batteriematerialien bis 2045 um 10 – 15 % gesenkt werden**, was die Versorgungssicherheit stärkt und strukturelle Verwundbarkeit verringert.
- Wichtigste Voraussetzung dafür ist, dass ein größerer Teil an Altfahrzeugen für **inländische Kreislaufprozesse verfügbar wird und Verarbeitungskapazitäten ausgebaut** und weiterentwickelt werden.

3.3.1 Kontext: Mobilität als Schlüsselindustrie in einem materialintensiven und dynamischen Transformationsumfeld

Das Mobilitätssegment⁷⁴ ist mit einer Bruttowertschöpfung von 220 Mrd. Euro und knapp 1,7 Mio. Beschäftigten eine der tragenden Säulen der deutschen Industrie. Im Fokus des Segments stehen nachfolgend vor allem die Produktion von Kraftwagen und Kraftwagenteilen⁷⁵ (122 Mrd. Euro) und damit verbundene Services und Handel⁷⁶ (90 Mrd. Euro) sowie die Zugproduktion⁷⁷ (1,3 Mrd. Euro) und die Beförderung mit Zügen und im ländlichen Nahverkehr⁷⁸ (7 Mrd. Euro). Die Branche gestaltet entscheidend zentrale industrielle Wertschöpfungsketten, verbindet Fahrzeugproduktion, Zulieferstrukturen und Serviceaktivitäten und steht damit im Zentrum der deutschen Wirtschaftsleistung. Zugleich ist das Segment stark materialgetrieben: Allein in der Pkw-Produktion wurden 2023 ca. 10 Mio. Tonnen Stahl, Aluminium, Kunststoffe und weitere Materialien verarbeitet, was Mobilität zu einem der volumenstärksten

⁷⁴ In dieser Studie werden unter dem Mobilitätssegment die Herstellung und der Handel von Kraftwagen und Kraftwagenteilen sowie deren Instandhaltung, Reparatur und Vermietung verstanden. Zudem umfasst es die Herstellung von Schienenfahrzeugen und die Beförderung durch den Zug und im ländlichen Nahverkehr. Die Herstellung von Schiffen und Flugzeugen und die Beförderung mit solchen Transportmitteln wurden im Rahmen der Studie nicht analysiert.

⁷⁵ Wirtschaftszweig: WZ08-29, vgl. Destatis (2023b).

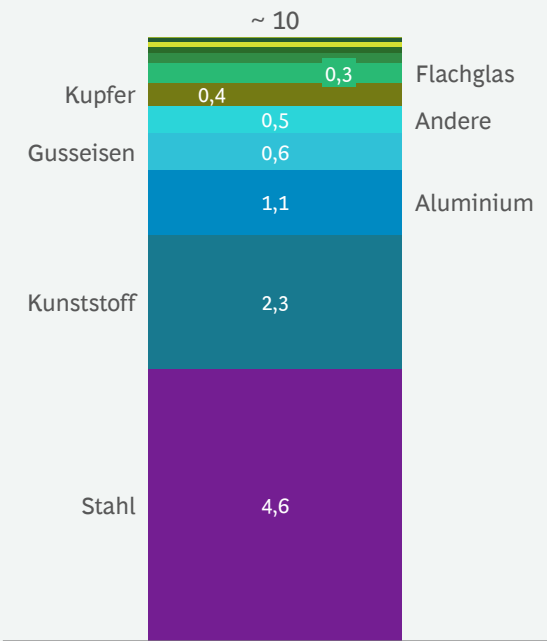
⁷⁶ Wirtschaftszweig: WZ08-451 bis -453, WZ08-771, vgl. Destatis (2023b).

⁷⁷ Wirtschaftszweig: WZ08-302, vgl. Destatis (2023b).

⁷⁸ Wirtschaftszweige: WZ08-491 bis -493, vgl. Destatis (2023b).

Mobilität als zentrales Standbein der deutschen Industrie bei hoher Materialintensität

ABBILDUNG 19 | Materialeinsatz in der Pkw-Produktion
(in Mio. t, Produktion 2023)



Quelle: Destatis (2023); VDA; UBA; Switch GT; Experteninterviews; BCG-Analyse

industriellen Stoffstromsegmente in Deutschland macht.⁷⁹ Im Gesamtsegment werden zwar sowohl Automobil- als auch Zuganwendungen betrachtet, der Schwerpunkt der folgenden Ausführungen liegt jedoch auf dem Pkw-Bereich, da hier der überwiegende Teil der wirtschaftlichen und materiellen Relevanz entsteht.

Durch den Umstieg vom Verbrennungsmotor auf Elektromobilität befindet sich die deutsche Automobilindustrie in der tiefgreifendsten Transformation ihrer Geschichte. Strengere CO₂-Flottengrenzwerte, nationale Klimaziele und veränderte Kundenpräferenzen treiben den Hochlauf batterieelektrischer Fahrzeuge (BEVs), während Neuzulassungen klassischer Verbrenner schrittweise zurückgehen. Der Fahrzeugbestand verschiebt sich damit von heute noch ca. 95 % Verbrenneranteil auf einen überwiegend elektrifizierten Pkw-Bestand von etwa 41 Mio. Fahrzeugen bis 2045 (ca. 68 % des erwarteten Gesamtbestands).

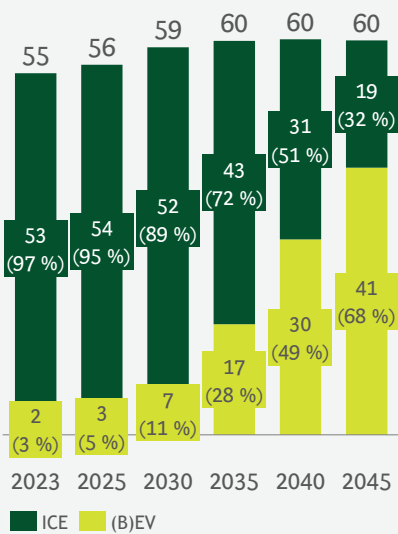
Mit einer Importabhängigkeit von ca. 100 % bei strategischen Batteriematerialien verschärft die Transformation bestehende Rohstoffrisiken der

⁷⁹ BCG-Analyse, ohne Produktionsschrott.

Elektrofahrzeuge werden mehr als 68 % des Pkw-Aufkommens bis 2045 stellen, mit Folgen für den zukünftigen Materialeinsatz

ABBILDUNG 20 | Basisannahmen für Automobilbestand
(in Mio. t)

Erwarteter Pkw-Bestand
(in Mio.)



Ø Materialzusammensetzung
pro ICE¹
(in %, 2023)

Materialien	%
Stahl	48 %
Kunststoffe	17 %
Aluminium	12 %
Eisen	8 %
Textil	2 %
Glas	2 %
Kupfer	2 %
Zink	1 %
Andere	8 %

Gesamtgewicht 1,7 t

Ø Materialzusammensetzung pro
(B)EV²
(exkl. Batterie³, in %, 2023)

Materialien	%
Stahl	44 %
Kunststoffe	19 %
Aluminium	16 %
Eisen	5 %
Textil	3 %
Glas	3 %
Kupfer	5 %
Zink	0 %
Andere (insb. Karbonf.)	5 %

Gesamtgewicht 1,8 t

1. Auto mit Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine) 2. Elektroauto ([Battery] Electric Vehicle)
3. 250 – 260 kg, 42 % davon entsprechen Batteriemetallen Lithium, Mangan, Nickel, Kobalt
Quelle: ERA; KBA; UBA; ACC, Chemistry and Automobiles - Driving the Future (2024); Projekterfahrung; BCG-Analyse

Industrie. Die Fahrzeugelektrifizierung erhöht den Bedarf an Lithium, Nickel, Graphit und seltenen Erden⁸⁰ deutlich, während diese Rohstoffe weltweit nur in wenigen Regionen gefördert und verarbeitet werden: Im Jahr 2023 entfielen ca. 70 % der Förderung der weltweit verfügbaren seltenen Erden auf China, gefolgt von den USA mit 12,3 %.⁸¹ Die damit einhergehende Markt- und Preisvolatilität kann Beschaffungs- und Planungsprozesse zunehmend herausfordern und die Resilienz globaler Lieferketten beeinflussen. Dabei hat das Verhältnis unterschiedlicher Batterietechnologien einen wesentlichen Einfluss auf den Materialbedarf, da NMC-Batterien neben Lithium insbesondere Nickel und Kobalt benötigen, während LFP-Batterien auf diese kritischen Metalle verzichten und stattdessen Eisen und Phosphat einsetzen.⁸²

Gleichzeitig verschärft sich der internationale Wettbewerb, da Unternehmen außerhalb Europas sich in der Batteriezellproduktion und bei E-Fahrzeugen frühzeitig große Marktanteile

gesichert haben und zunehmend in europäische Märkte drängen. So ist der Anteil von in China produzierten BEVs an den EU-BEV-Verkäufen in den vergangenen drei Jahren von etwa 3 % auf über 20 % und einen Wert von 9,7 Mrd. Euro gestiegen. Als handelspolitische Reaktion hat die EU vorübergehende Ausgleichszölle auf übermäßig subventionierte Elektrofahrzeuge aus China für fünf Jahre eingeführt.^{83,84}

Die Marktdynamik wird zusätzlich durch steigende Kosten und einen volatilen nationalen Abnahmemarkt geprägt. Steigende Energie-, Material- und Finanzierungskosten belasten die inländische Produktion und verstärken den Wettbewerbsdruck gegenüber international kostengünstigeren Standorten. Zugleich nehmen die Anforderungen an Investitionen in Elektrifizierung, Digitalisierung und neue Produktionsplattformen zu, während Energie- und Materialkosten mittelfristig auf hohem Niveau bleiben oder steigen könnten. Eine wechselhafte Förderlandschaft führt dazu, dass die inländische Nachfrage nach

⁸⁰ Insbesondere für Permanentmagnete: Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Dysprosium (Dy), Terbium (Tb); detaillierte Darstellung in Abbildung 21.

⁸¹ Mining Technology (2025).

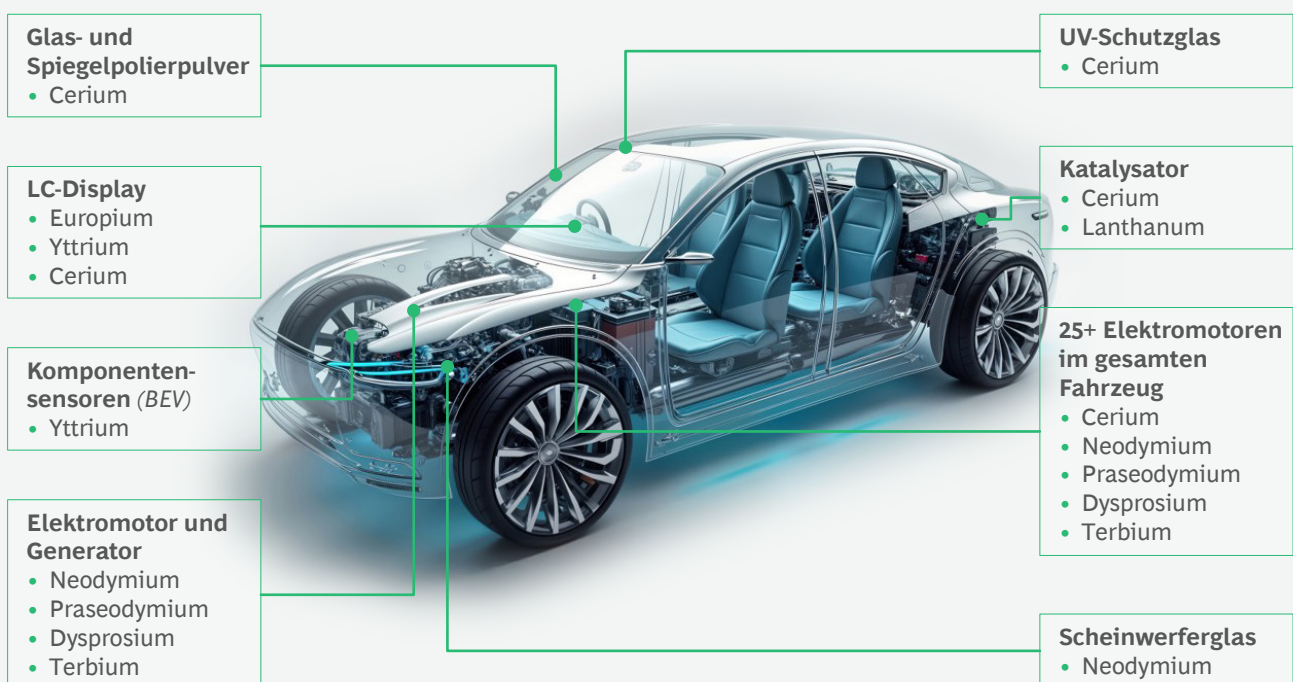
⁸² Annahmen im Rahmen der Potenzialberechnung für 2023: 36 % LFP/LMFP, 51 % NMC, 13 % andere; für 2045: 41 % LFP/LMFP, 41 % NMC, 18 % andere.

⁸³ Acea (2024).

⁸⁴ Europäische Kommission (2024).

Elektrofahrzeuge sind in zentralen Komponenten auf seltene Erden angewiesen

ABBILDUNG 21 | Seltene Erden in (B)EVs



Quelle: BCG-Analyse

E-Fahrzeugen trotz ambitionierter Ziele erheblich variiert. In Summe entsteht ein Umfeld, in dem die Industrie technologische Weiterentwicklung, internationale Wettbewerbsfähigkeit und wirtschaftliche Stabilität sowie Resilienz parallel sichern muss.

3.3.2 Status quo: Reparatur- und Verwertungsstrukturen sind etabliert, doch ca. 25 % der abgemeldeten Fahrzeuge gehen durch Nicht-EU-Exporte verloren

Segment auf einen Blick



Importquote von Batteriemetallen

~ 100 %



Bruttowertschöpfung durch Pkw-Reparatur

~ € 15 Mrd.



Materialbedarf Pkw-Produktion

~ 10,2 Mio. t

Die Automobilindustrie hat zentrale Elemente der Circular Economy bereits tief in ihre Prozesse integriert, beispielsweise durch ausgeprägte Reparaturstrukturen. Ein großer Ersatzteil- und Servicemarkt, getragen von Werkstätten, Teilehändlern und zertifizierten Demontagebetrieben, ermöglicht die Instandsetzung und Wiederverwendung zahlreicher Komponenten; der deutsche Reparaturmarkt wird auf ein jährliches Volumen von ca. 15 Mrd. Euro (im Jahr 2023) geschätzt.⁸⁵ Die Demontage von Fahrzeugen ist dabei bereits ein wirtschaftlich tragfähiges Geschäftsmodell, insbesondere durch den Handel mit gebrauchten Ersatzteilen. Lange Nutzungsdauern und die Wiederverwendung von Komponenten stärken die Kreislaufführung zusätzlich. Ein Großteil der Materialien geht am Ende des Fahrzeuglebenszyklus zurück in industrielle Kreisläufe, das gilt vor allem für Metalle wie Stahl und Aluminium.^{86,87} Bei Kunststoffen hingegen bleibt die Kreislaufführung deutlich begrenzt: Weniger als 20 % der ELV-Kunststoffe werden heute recycelt, und werkstoffgleiche Rückführungen in die Fahrzeugproduktion finden praktisch nicht statt, was

bis zu 250 kg Material pro Fahrzeug einer Kreislaufverwertung entzieht.⁸⁸

Regulatorische Vorgaben stellen die Circular Economy in den Fokus – doch eine fehlende Marktüberwachung bremst die Kreislaufwirtschaftsbemühungen im Mobilitätssektor. Die EU-Altfahrzeugverordnung soll durch Abfallende-Kriterien eine klarere Unterscheidung zwischen Gebraucht- und Altfahrzeugen vornehmen, Vorgaben für die Konstruktion von Neufahrzeugen definieren, Zielwerte für den Einsatz von Rezyklaten festlegen, die Rückverfolgbarkeit von Altfahrzeugen stärken und die Herstellerverantwortung ausweiten.⁸⁹ Ergänzend definiert die EU-Batterieverordnung ambitionierte Rückgewinnungsziele (etwa 90 – 95 % für Nickel und Kobalt sowie 50 – 80 % für Lithium) und führt erstmals Mindestanteile an recycelten Materialien für neue Traktionsbatterien ein, um die beschriebene Abhängigkeit von Nicht-EU-Importen zu verringern.⁹⁰ Trotz klarer regulatorischer Signale bestehen praktisch und im Hinblick auf eine Harmonisierung weiterhin Herausforderungen, etwa durch unterschiedliche nationale Auslegungen der ELV-Kriterien oder durch begrenzte Transparenz bzgl. der tatsächlichen Fahrzeug- und Materialströme sowie die damit verbundenen Dunkelziffern.

Rund 25 % der abgemeldeten Fahrzeuge gehen durch Nicht-EU-Exporte verloren. Nur bis zu 15 % der endgültig abgemeldeten Fahrzeuge⁹¹ werden heute als Altfahrzeuge im Inland verwertet. Etwa 60 % der abgemeldeten Fahrzeuge werden als Gebrauchtwagen in andere EU-Mitgliedstaaten exportiert, wo grundsätzlich eine Verwertung entsprechend der EU-Regulierung stattfindet. Etwa 25 % werden in Nicht-EU-Länder exportiert bzw. gelangen in Verwertungsstrukturen mit begrenzter Nachverfolgbarkeit. So verbleiben hochwertige Komponenten und wertvolle Rohstoffe wie Stahl, Aluminium, Kupfer oder Kunststoffe kaum im deutschen Kreislaufprozess. Dieser Verlust von Kreislaufpotenzialen wiegt umso schwerer, als Kupferpreise zuletzt historische Hochstände erreicht haben⁹² und auch Primärstahl und -aluminium in Folge zunehmender CO₂-Bepreisung unter dem EU-ETS perspektivisch deutlich teurer werden. Zudem begrenzen hohe Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen bisher die wirtschaftliche Wiederverwendung und das *Remanufacturing* vieler (sicherheitsrelevanter) Komponenten in Deutschland.

⁸⁵ Wirtschaftszweig: WZ08-452 (entspricht 56 Mrd. Euro Umsatz). Die Produktion von Kraftwagenteilen (WZ08-293, 24 Mrd. Euro BWS) sowie der Handel mit solchen (WZ08-453, 8 Mrd. Euro BWS) werden in dieser Studie nicht als zirkulär im engeren Sinne betrachtet, vgl. Destatis (2023b).

⁸⁶ UBA (2023).

⁸⁷ BMUKN und UBA (2023).

⁸⁸ VEA (2021)..

⁸⁹ Europäische Kommission (2025a).

⁹⁰ BEPA und BATT4EU (2023).

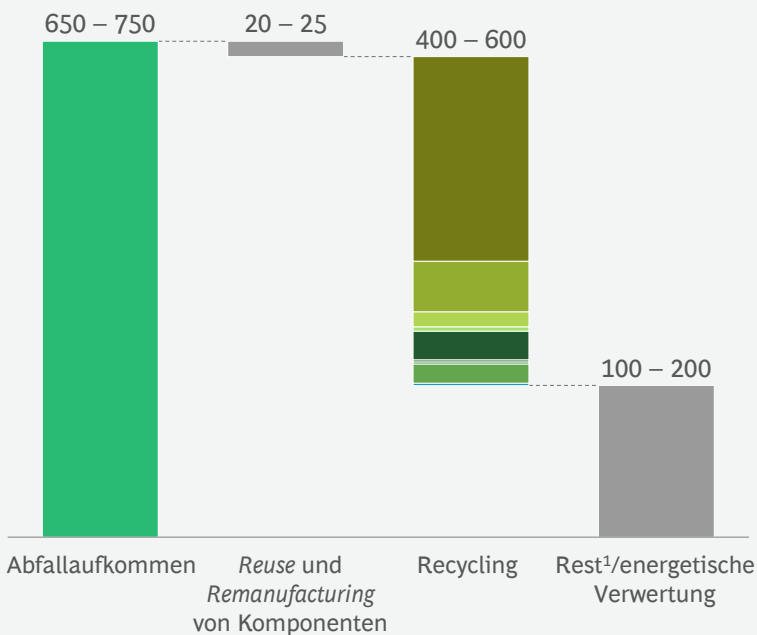
⁹¹ BCG-Analyse; insgesamt schwankt die Verbleibdifferenz über die Jahre erheblich (der Anteil im Jahr 2022 musste korrigiert werden und betrug laut UBA-Angaben letztlich nur 5 %). Endgültig abgemeldete Fahrzeuge entsprechen endgültig stillgelegten Fahrzeugen (Fahrzeuge, die meist über 15 Jahre alt, nicht straßentauglich und unterhalb der Abgasnorm 4 sind); vgl. UBA (2023).

⁹² Der Kupferpreis schwankte zwischen 2020 und 2024 um bis zu 2.500 Euro pro Tonne. Annäherung basierend auf LME-Preisen. Der Durchschnittspreis lag 2019 bei 5.350 Euro/Tonne, 2024 bei 8.450 Euro/Tonne, vgl. KME (2025), DERA (2026).

In Deutschland werden jährlich ~ 650 – 750 kt Fahrzeugmaterial verwertet

ABBILDUNG 22 | Materialaufkommen aus verwerteten Pkw in Deutschland

Materialaufkommen
(in kt, 2023)



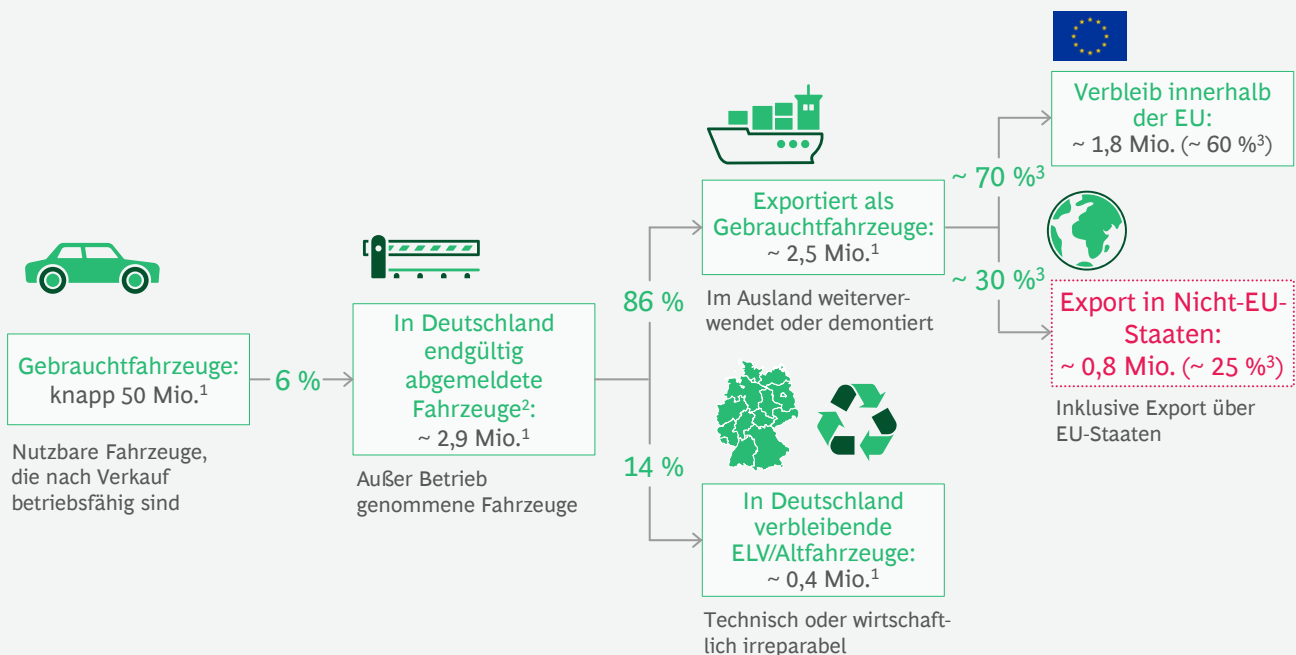
	Recycelter Anteil (2023)	Quellen
Stahl	80 – 90 %	World Economic Forum (2023)
Aluminium	80 – 90 %	IEA (2021) ² , European Aluminium
Kunststoff	< 20 %	World Economic Forum (2025)
Kupfer	40 – 50 %	European Copper Institute (2018)
Gusseisen	75 – 85 %	Annahme: Ähnlich zu Stahl
Zink	25 – 35 %	IEA (2021) ²
Flachglas	< 20 %	Annahme: Analog Kunststoffen
Andere	30 – 50 %	Annahme ³
Edelmetalle	5 – 15 %	Annahme ⁴
Batterie-materialien (Ni, Li, Co, Mn)	1 – 60 %	EU Battery Regulation, IEA (2021)

1. Rest inkludiert Abfälle aus Recycling-Prozessen sowie Batterie-Recycling, da keine Kapazitäten in EU 2. Keine autospezifischen Daten verfügbar 3. Häufig heterogen, Verbundstoffe 4. Schätzungsweise < 10 % des enthaltenen Silbers stofflich recycelt, Großteil verbleibt in Schredder-Rückständen oder wird mit Elektronikschrott exportiert
Quelle: BCG-Analyse

Rund 25 % der in Deutschland endgültig abgemeldeten Fahrzeuge werden in Nicht-EU-Staaten exportiert

ABBILDUNG 23 | Stoffströme von Gebrauchtfahrzeugen in Deutschland

(2021)



1. UBA 2021 2. Entspricht endgültig stillgelegten Fahrzeugen 3. Verteilung bezieht sich auf die finale Destination des Exports. Dunkelziffer der über EU-Staaten exportierten Fahrzeuge geht nicht aus den Daten des Umweltbundesamtes hervor, Angabe daher basierend auf Experteninterviews
Quelle: Experteninterviews; ifo Institut; UBA; Europäische Kommission; BCG-Analyse

3.3.3 Potenzial: Circular Economy stärkt Rohstoffresilienz, senkt den Materialbedarf und steigert die Bruttowertschöpfung

Remanufacturing und Recycling von Komponenten stehen im Zentrum der betrachteten Kreislaufhebel. Die Hebel adressieren unterschiedliche Wirkmechanismen und zeigen auf, inwieweit die Circular Economy der Rohstoffabhängigkeit entgegenwirken und zur Dekarbonisierung beitragen kann. Im Mobilitätssegment wurden insgesamt zehn potenzielle Kreislaufhebel identifiziert und qualitativ bewertet; für die quantitative Analyse werden jene Hebel fokussiert, die einen deutlichen Beitrag zur Reduktion des Import- und des Materialbedarfs leisten und dabei zusätzliche Bruttowertschöpfung in Deutschland generieren (vgl. Tabelle 1, grün hinterlegt). Die übrigen Hebel wurden insbesondere aufgrund negativer Effekte auf die Bruttowertschöpfung, bereits weitgehend etablierter Reparaturpraktiken, ihrer Einordnung als allgemeine Markt- bzw. Technologietrends oder einer separaten Betrachtung im Energiesegment depriorisiert.

Viele Fahrzeugkomponenten sind technisch sehr langlebig und grundsätzlich für eine Wiederaufbereitung geeignet, die im Durchschnitt ca. 85 – 88 % des Materialbedarfs eines Neuteils einspart.

Dennoch werden Reparaturen heute überwiegend mit Neuteilen durchgeführt – selbst dann, wenn deren volle Lebensdauer für die Restnutzung des Fahrzeugs nicht erforderlich ist. Daraus ergibt sich ein erhebliches *Remanufacturing*-Potenzial, insbesondere für robuste und wertintensive Bauteile wie Getriebe, Verbrennungsmotoren bzw. Elektronik bei EVs sowie Lenkungs- und Bremssysteme. Je nach Komponente benötigt ein wiederaufbereitetes Teil lediglich ca. 12 – 15 % des Materials eines Neuteils.⁹³ Der Einsatz wiederaufbereiteter Teile kann den absoluten Materialbedarf des Mobilitätssegments senken und die in den Bauteilen gebundene Energie- und CO₂-Intensität effizienter nutzen, sofern die Kompatibilität mit dem Fahrzeugbestand sichergestellt ist.

⁹³ Neu eingesetztes Material im Rahmen der Wiederaufbereitung vor allem für Teile mit hohem Verschleiß, z. B. Gummidichtungen oder Klebungen.

TABELLE 1 | Übersicht potenzieller Kreislaufhebel im Bereich Mobilität

#	Hebel	Beschreibung
1	Reuse und Remanufacturing von Komponenten	Durch Wiederaufbereitung und Wiederverwendung können Pkw-Komponenten länger genutzt werden, wodurch der absolute Materialbedarf sinkt.
2	Steigerung Recycling-Volumina (Pkw und Zug)	Vermehrtes Recycling (inkl. Demontage, Sortierung und Aufbereitung) erhöht die Verfügbarkeit von Rezyklaten (z. B. Stahl, Aluminium, Kupfer, Glas und Kunststoffe) als potenziellen Substituten für Primärmaterial in verschiedenen Anwendungen.
3	Steigerung Recycling-Volumina (Batterien)	Erhöhtes Batterie-Recycling erhöht die Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe wie Lithium, Nickel, Kobalt und weiterer Metalle und erlaubt den Abbau von Importabhängigkeiten.
4	Kleinere Fahrzeuge (Pkw)	Nach Berechnung der Bruttowertschöpfung aufgrund des negativen Beitrags ausgeschlossen.
5	Alternative Mobilitätsmodelle (Carsharing/ÖPNV)	Nach Berechnung der Bruttowertschöpfung aufgrund des negativen Beitrags ausgeschlossen.
6	Ausbau Repair-Modelle (Pkw)	Grund für Depriorisierung: Reparatur und Instandsetzung sind bereits breitflächig etabliert, es wird wenig Optimierungspotenzial unterstellt.
7	Additive Produktion (Pkw)	Grund für Depriorisierung: Einstufung als Markttrend ohne direkten Kreislaufcharakter.
8	Nutzung digitaler Technologien in Produktion (Pkw)	Grund für Depriorisierung: Einstufung als Markttrend ohne direkten Kreislaufcharakter.
9	Second-Life-Batterien	Analyse erfolgt im Rahmen des Energiesegments.
10	Design for Circularity	Grund für Depriorisierung: Produktgestaltung ist kein aktiver Hebel, bildet jedoch Voraussetzung für die priorisierten Hebel (Ausdetaillierung in Kapitel 4).

Reuse und *Remanufacturing* von Komponenten erschließen das größte Potenzial für direkte Materialeinsparungen und zusätzliche inländische Wertschöpfung

HEBEL 1 | *Reuse* und *Remanufacturing* von Komponenten



Je nach Pfad kann *Remanufacturing* die jährliche Bruttowertschöpfung um 2,0 bis 3,5 Mrd. Euro bis 2045 erhöhen, was im Ergebnis einer Verachtfachung bzw. Verdreizehnfachung gegenüber 2023 entspricht. Dieser Effekt wird erzielt, da in der Neuteilproduktion je nach Baugruppe nur ca. 20 % (Motoren bis 65 % (Getriebe, Lenkung) und bei Elektronik- und Fahrassistenzsystemen in Elektrofahrzeugen lediglich 15 – 20 % der Wertschöpfung in Deutschland verbleiben, während wiederaufbereitete Komponenten nahezu vollständig im Inland bearbeitet werden und damit eine inländische Wertschöpfungsquote von 100 % erreichen. Somit kann *Remanufacturing* den Materialbedarf im Mobilitätssegment bis 2045 um 200.000 bis 370.000 Tonnen gegenüber 2023 senken. Die dadurch vermiedene Neuproduktion würde bis 2045 zu deutlichen zusätzlichen CO₂-Einsparungen von 0,6 bis 1,3 Mio. Tonnen CO₂e im Vergleich zu 2023 führen, da die für Primärmaterialien typischen energie- und emissionsintensiven Herstellungsprozesse vermieden würden.

Case-Study 1: Die *Circularity Solution Suite* für Recycling und *Reuse* in der Bahnbranche

Mit seinen strukturellen Besonderheiten bietet der Bahnsektor einen attraktiven Anwendungsbereich für die Circular Economy. Die Bahnbranche in Deutschland ist geprägt von einer vergleichsweise langen Nutzungsdauer der Produkte bei einem gleichzeitig hohen Wert der Investitionsgüter. Dabei werden sowohl die Infrastruktur als auch die Schienenfahrzeuge in einem systematischen Prozess über den gesamten Lebenszyklus von in der Regel mehr als 30 Jahren gewartet und instand gehalten. Gleichzeitig gibt es für die Verwertung von ausgemusterten Schienenfahrzeugen keine vergleichbar klaren Vorschriften, wie sie beispielsweise mit der geplanten *ELV*-Regulierung die Automobilbranche betreffen. Dies macht die Bahnbranche zu einem attraktiven Anwendungsbereich für Strategien der Circular Economy.

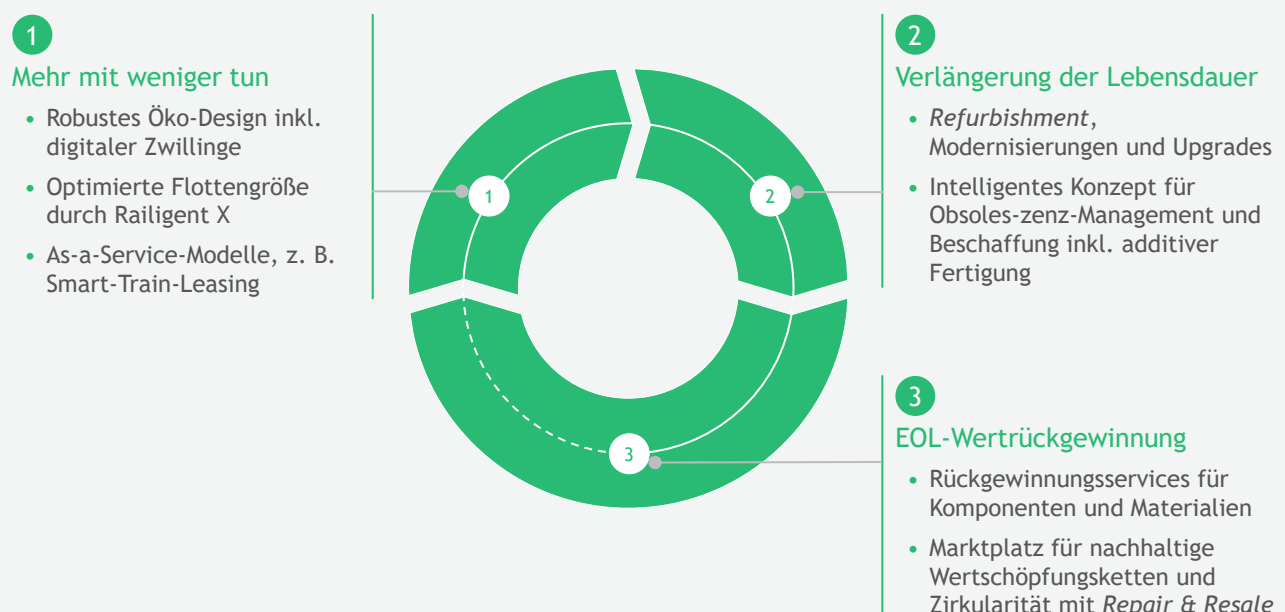
Die Siemens Mobility GmbH hat in diesem Zusammenhang gemeinsam mit einem Ökosystem aus Partnern eine „Circularity Solution Suite“ entwickelt. Mit einem gezielten „*Doing more with less*“-Ansatz in der Entwicklung von Fahrzeugen über Serviceangebote zur Verlängerung von Lebenszyklen bis hin zu einem wertoptimierten Management des Endes des Lebenszyklus werden vier Ziele verfolgt, deren Erreichung messbaren Mehrwert für die Branche erzeugen kann:

- Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit des europäischen Schienenverkehrs
- Erhöhung der Resilienz internationaler Lieferketten
- Reduzierung der Kosten der Transformation zu grünen Materialien
- CO₂-Reduzierung in der Lieferkette/Scope 3

Mit dem Rücklauf von ausgedienten Zugwagen eröffnen sich für den Bahnsektor weitere Wertschöpfungspotenziale für die Materialrückgewinnung. Betrachtet man das Ende des Lebenszyklus, gibt es zwei konkrete Maßnahmen, die den Mehrwert der Circular Economy für alle Beteiligten unmittelbar nutzbar machen: Zum einen lässt sich die Materialgewinnung aus dem Recycling von Fahrzeugen optimieren, was unmittelbare positive Effekte für die Resilienz von Lieferketten und die Nachhaltigkeit von Produkten und Komponenten hat. Zum anderen lassen sich attraktive Komponenten über entsprechende Plattformen einem Zweitmarkt zuführen. Eine Analyse der Fahrzeugflotten in Europa zeigt erhebliches Potenzial für die Umsetzung geschlossener Materialkreisläufe: Es ist davon auszugehen, dass in den kommenden fünf Jahren bis zu 900.000 Tonnen an Metallen (Stahl, Alu-

Die *Circularity Solution Suite* greift an mehreren Stellen des Wertschöpfungsprozesses zugleich

ABBILDUNG 24 | Ansatzpunkte der *Circularity Solution Suite*

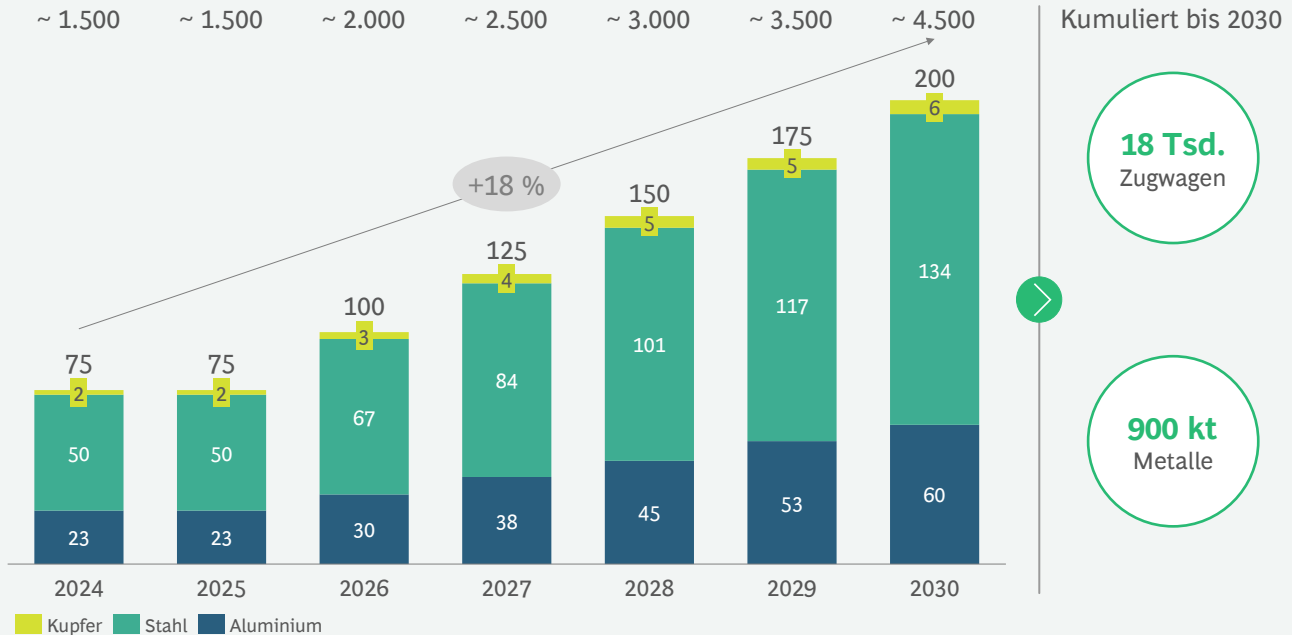


Quelle: Siemens

Rund 900 kt Kupfer, Stahl und Aluminium können durch ausgediente Zugwagen bis 2030 rückgewonnen werden

ABBILDUNG 25 | Metalle aus Rückläufen von Zugwagen

(in kt, bis 2030)



Quelle: Umweltbundesamt; BDI und BCG, Klimapfade; BCG-Analyse

minium und Kupfer) aus dem Recycling ausgemusterter Schienenfahrzeuge für die Industrie in Europa verfügbar werden und damit die wirtschaftlich attraktive Umsetzung hochwertiger Kreislaufmodelle ermöglichen.

Ergänzend zu Recycling-Ansätzen nimmt Siemens mit digitalen Lösungen entlang des gesamten Lebenszyklus die R-Strategien Repair und Reuse in den Fokus. Dazu wurde mit „MoBase“ ein Online-Marktplatz für Bahnprodukte und -dienstleistungen geschaffen, der Käufer und Verkäufer aus der Bahn- und Zulieferindustrie zusammenbringt. Auf der E-Commerce-Plattform können Kunden einfach und schnell Ersatzteile bestellen und somit Standzeiten von Fahrzeugen deutlich reduzieren. Darüber hinaus lassen sich gezielt Repair-Services bestellen, die es Betreibern von Schienenfahrzeugen erlauben, diese wirtschaftlich im Betrieb zu halten. Ein zusätzlicher Baustein, der dazu beiträgt, die Ressourceneffizienz deutlich zu erhöhen, ist das Resale-Modul auf der Plattform. Diese Kunden-zu-Kunden-Verkaufsfunktion ermöglicht es (u. a. auch Drittanbietern), überschüssige Materialien und Produkte anzubieten und weiterzuverkaufen.

Dieser Mehrwert lässt sich jedoch nur durch ein koordiniertes Ökosystem aus OEM, Betreibern, Recyclern und Rohstofflieferanten realisieren. Dabei bringt Siemens das notwendige Wissen über

Materialzusammensetzungen und Bauteilarchitekturen ein, der Betreiber der Fahrzeugflotten ermöglicht frühzeitigen und strukturierten Zugang zu Fahrzeugen am Ende des Lebenszyklus, und der Recycler REMONDIS mit dem Tochterunternehmen TSR macht eine hochwertige Demontage und Metallrückgewinnung möglich. Das Produkt ist erstmals ein End-to-End-Prozess, der hochwertige Materialien systematisch identifiziert, sicher sortiert und aufbereitet, womit die große Masse an Metallen sortenrein zurückgeführt wird. Dafür arbeiten im Rahmen des Ökosystems zwei große europäische Stahl- und Aluminiumhersteller an diesem geschlossenen Materialkreislauf. Das Ergebnis: Lieferketten werden gegenüber geopolitisch bedingten externen Schocks resilient, die Dekarbonisierung der Rohstoffproduktion wird vorangetrieben, und die Kosten lassen sich über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg optimieren.

Damit zeigt die Circularity Solution Suite, wie ein wirtschaftlich tragfähiger und industriell skalierbarer Kreislauf im Bahnsektor aussehen kann – vorausgesetzt, die Akteure setzen gemeinsam auf Daten, Standards und klare Rollen. Die kommenden Ströme am Ende des Lebenszyklus eröffnen ein einzigartiges Marktfenster, das Ressourcensouveränität, CO₂-Einsparungen und neue Wertschöpfungspotenziale vereint. Das kombinierte Modell aus Recycling, Repair und Reuse liefert dafür die überzeugendste Blaupause.

Recycling von Fahrzeugen und Batterien wird zum zentralen Hebel für Rohstoffresilienz, Materialbedarfsreduktion und zusätzliche Bruttowertschöpfung

Recycling gewinnt zunehmend an Bedeutung, da bis 2045 ca. 2,8 Mio. Pkw und 1.400 Züge ihr Lebensende erreichen und für die Verwertung verfügbar werden. Während *Remanufacturing* die noch weiter nutzbaren Komponenten abschöpft, adressiert Recycling all jene Teile, die zu alt oder beschädigt sind oder für die eine Aufarbeitung zu aufwendig wäre. Damit wird der überwiegende Teil der Fahrzeugmasse erschlossen. Angetrieben durch die verschärfte ELV-Regulierung, zum Beispiel in Kombination mit einem digitalen Verwertungsnachweis, werden in den Intensivierungs- und Maximierungspfaden die Nicht-EU-Exporte deutlich begrenzt, um eine kreislaufgerechte Verwertung im Inland sicherzustellen. Die Exportquote ins Nicht-EU-Ausland fällt von heute ca. 25 % auf 8 % bzw. 0 % (im Intensivierungs- bzw. Maximierungspfad), sodass sich die Gesamt-Exportquote im Maximierungspfad auf die verbleibenden 60 % EU-Exporte reduziert.

Im Vergleich zu heute würden sich daraus im Jahr 2045 zusätzliche industriell nutzbare Rezyklatmengen von 0,8 – 1,2 Mio. Tonnen ergeben.⁹⁴ Bei Wiedereinsatz der entstehenden Rezyklate – zum Beispiel in Interieur-Verkleidungen aus Kunststoff oder bei Karosseriebauteilen aus Aluminium, aber auch in anderen Segmenten – ergäbe sich im Jahr 2045 ein CO₂-Einsparpotenzial von weiteren 2,3 Mio. Tonnen CO_{2e} (Intensivierungspfad) bzw. 3,0 Mio. Tonnen CO_{2e} (Maximierungspfad) gegenüber dem Status quo. Zudem könnten die entstehenden Rezyklatmengen Deutschlands Importabhängigkeit signifikant reduzieren. Beispielsweise könnte bis 2045 die Importquote für seltene Erden um 20 – 50 % (Intensivierungs- bzw. Maximierungspfad gegenüber Basispfad) sinken. In Kombination mit dem *Reuse*- und dem *Remanufacturing*-Hebel würden die Importquoten insgesamt sogar um 22 % bzw. 53 % sinken.

⁹⁴ Unter Annahme der Erhöhung heutiger Recycling-Quoten, z. B. Stahl: heute 90 % auf 91 % (Intensivierungspfad) und 96 % (Maximierungspfad); Kunststoffe und Glas: heute 19 % auf 30 % (Intensivierungspfad) und 60 % (Maximierungspfad); Kupfer: heute 45 % auf 60 % (Intensivierungspfad) und 80 % (Maximierungspfad); seltene Erden: heute 0 % auf 25 % (Intensivierungspfad) und 60 % (Maximierungspfad); Aluminium: gleichbleibend 95 %; Mangan: gleichbleibend 30 %.

HEBEL 2 | Steigerung der Recycling-Volumina (Pkw und Zug)



Durch erhöhtes Recycling kann im Vergleich zu 2023 eine zusätzliche jährliche Bruttowertschöpfung von 1,5 – 2,3 Mrd. Euro entstehen; dafür müsste allerdings für die entsprechende Demontage- und Recycling-Infrastruktur gesorgt sein. Bei Annahme vollständig neu aufzubauender Strukturen könnten hier Investitionen in Höhe von 1,3 Mrd. Euro bis 2045 notwendig sein (Intensivierungspfad). Neben Investitionen in eine hochwertigere Aufbereitung von Stahlschrotten sind vor allem Aufwendungen in den von der Stahlindustrie angestrebten Ausbau von Elektrolichtbogenofen-(EAF-)Kapazitäten relevant, um diese Schrotte verarbeiten zu können. Auch im Aluminiumbereich sind Investitionen in die Elektrifizierung von Ofen- und Wärmetechnologien erforderlich.

Case-Study 2: TSR – Post-Konsumenten-Materialien als Meilenstein für eine nachhaltige Stahlproduktion

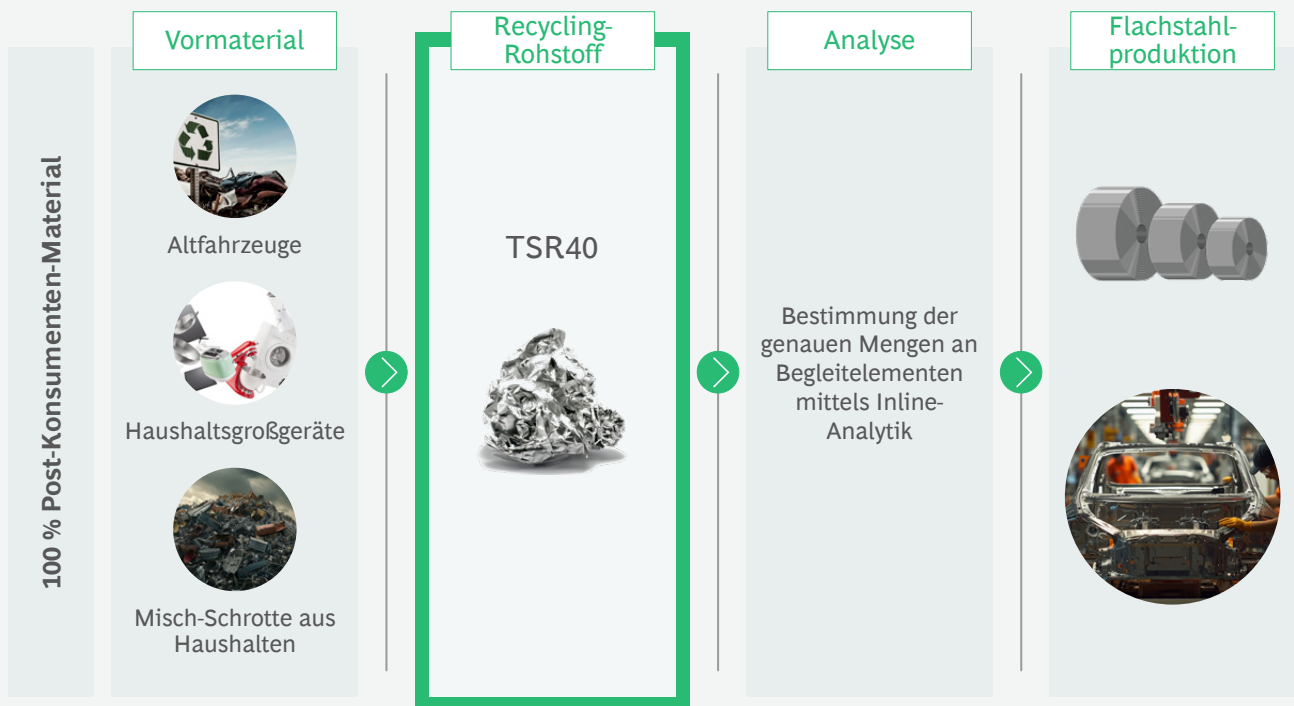
Die Dekarbonisierung der Stahlindustrie stellt eine der großen Herausforderungen der deutschen Industrie dar. Derzeit entfallen ca. 7 % der weltweiten Treibhausgasemissionen auf die Stahlproduktion. Gleichzeitig zählt Stahl zu den meistgenutzten Materialien in Deutschland. Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung wirksamer Innovationen für die Dekarbonisierung der Stahlproduktion von zentraler Bedeutung. Ein Beispiel hierfür ist TSR40, ein hochwertig aufbereiteter Recycling-Rohstoff auf Basis von Post-Konsumenten-Materialien, dessen Einsatz eine wirtschaftlich und ökologisch attraktive Alternative zu energieintensiven Reduktionsprozessen darstellt.

Der Einsatz von TSR40 ermöglicht die Nutzung komplexer Materialströme und kann leicht in bestehende Prozesse der Flachstahlproduktion integriert werden. Durch eine umfassende trockenmechanische Aufbereitung werden bei dem Verfahren zur Herstellung von TSR40 Störstoffe und unerwünschte Begleitelemente aus der Stahlfraktion entfernt; Inline-Analytik stellt eine konstante,

gleichbleibende Qualität sicher. Die dabei von der TSR Group hergestellten Materialien werden in einer Qualität bereitgestellt, die auch den Anforderungen anspruchsvollster Flachstahlqualitäten gerecht wird und damit die Rückführung in die Automobil- oder Haushaltsgeräteindustrie erlaubt. Damit wird ein Materialkreislauf ermöglicht, der zuvor überwiegend Anwendungen mit geringeren Qualitätsanforderungen vorbehalten war. TSR40 kann sowohl in der klassischen Hochofenroute als auch in Elektrolichtbogenöfen eingesetzt werden, und es bietet deutliche wirtschaftliche Vorteile. Durch die Nutzung von rückgewonnenen Materialien und bestehenden Anlagensstrukturen können kostenintensive Neu- und Umbauten vermieden werden, wie sie insbesondere bei Direktreduktionsanlagen erforderlich sind. Eine preisliche Einordnung auf europäischer Ebene unterstreicht den Kostenvorteil des Einsatzes von Recycling-Rohstoffen: Als Einsatzmaterial für die Stahlproduktion ist TSR40 bis zu 30 % günstiger als auf Basis von Wasserstoff hergestelltes direktreduziertes Eisen (DRI) bzw. heißbrikettiertes Eisen (HBI).

Als TSR40 können komplexe Post-Konsumenten-Ströme hochwertig in der Flachstahlproduktion zum Einsatz kommen

ABBILDUNG 26 | Recycling-Prozess von Stahl über TSR40



Quelle: TSR

Das Verfahren kann Vorteile für die gesamte Wertschöpfungskette bereithalten. TSR40 wird bereits heute im industriellen Maßstab an deutsche und europäische Stahlwerke geliefert. Ausgangspunkt ist hier die regionale Sammlung von Post-Konsumenten-Materialien, bei der über etablierte Sammelnetzwerke und enge Kooperation mit Industrie- und Entsorgungspartnern Altmittelströme lokal erfasst und der Aufbereitung zugeführt werden. Diese erfolgt bereits an den Standorten Duisburg, Hamburg und Amsterdam, zwei weitere Anlagen in Deutschland befinden sich in der Planung bzw. im Aufbau. Neben der TSR Group profitieren die involvierten Partner entlang der gesamten Wertschöpfungskette: Stahlhersteller erhöhen ihre Recycling-Anteile dank lokal verfügbarer Rohstoffe und senken Investitions- und Betriebskosten in der Flachstahlproduktion durch den Wegfall von energieintensiven Reduktionsprozessen. Gleichzeitig erhalten Industriabnehmer wie etwa die Automobilindustrie Zugang zu CO₂-reduzierten Materialien und resilienteren Lieferketten und vermindern ihre Abhängigkeit von volatilen Rohstoff- und Energiepreisen.

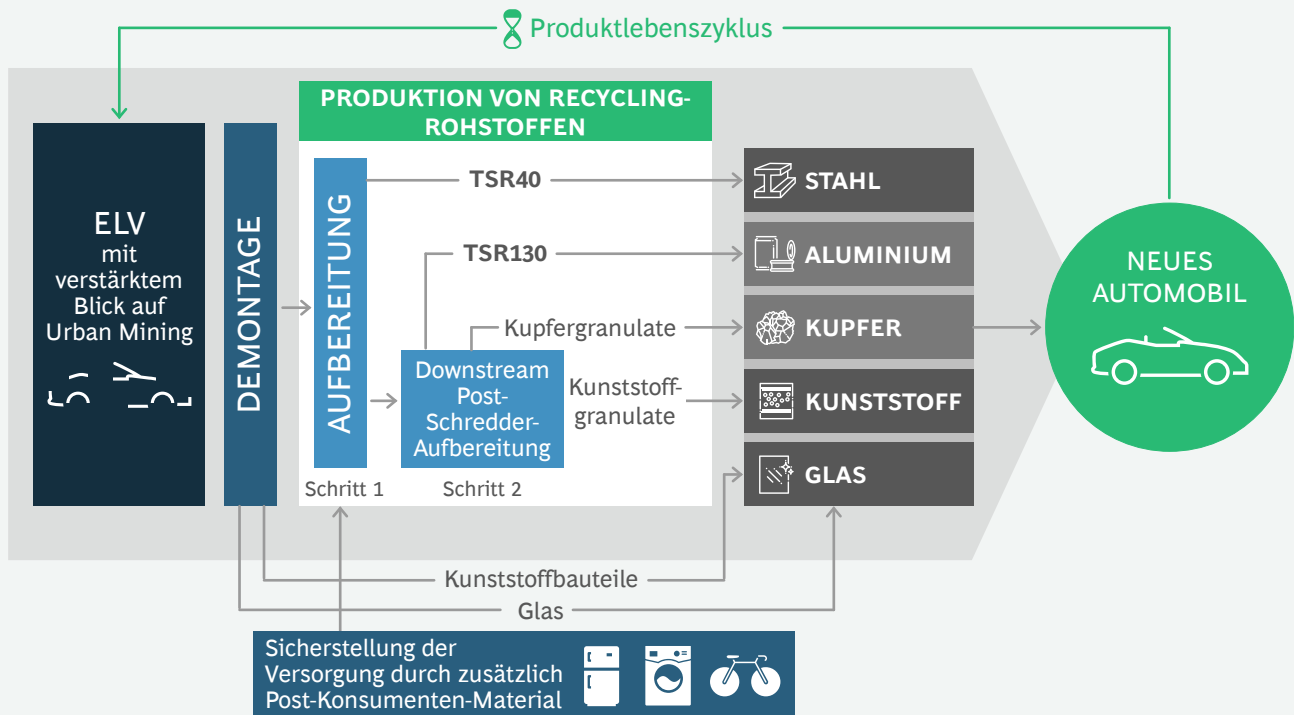
Durch den Einsatz von Recycling-Rohstoffen können ca. 1,6 Tonnen CO₂ je produzierte Tonne Stahl eingespart werden. Sowohl in der klassischen Hoch-

ofenroute als auch in der Elektrolichtbogenofenroute kann TSR40 als Substitut für Materialien wie Eisenerz genutzt werden. In den genannten Produktionsrouten sinkt der Energieverbrauch deutlich, da energieintensive Schritte wie Rohstoffabbau, aufwendige Aufbereitung und weite Transportwege entfallen. Durch das Bereitstellen von Recycling-Rohstoffen in hoher Qualität kann ein Wechsel von der emissionsintensiven Hochofenroute zu der emissionsärmeren Elektrolichtbogenofenroute durchgeführt werden. Die Output-Qualität erfüllt die hohen Anforderungen der Automobilindustrie und führt so zu einem erhöhten Rezyklateinsatz in der Produktion. Wird TSR40 anstelle von Primärrohstoffen in einer schrottbasierten Elektrolichtbogenofenroute eingesetzt, können pro eingesetzte Tonne TSR40 ca. 1,4 Tonnen Eisenerz eingespart werden. Gleichzeitig führt der Ersatz von Primärrohstoffen zu einer direkten Minderung um etwa 1,6 Tonnen CO₂ je produzierte Tonne Stahl, was einer Reduktion von ca. 69 % gegenüber der durchschnittlichen Emissionsintensität der Hochofenroute von 2,3 Tonnen CO₂ darstellt.⁹⁵ Mit den bereits in Betrieb befindlichen Anlagen sowie weiteren geplanten Standorten wird eine jährliche Produktionskapazität von bis zu 2,5 Mio. Tonnen TSR40 aufgebaut, wodurch diese Effekte weiter skaliert werden können.

⁹⁵ Blanco Perez et al. (2025).

TSR40 ermöglicht die Rückführung komplexer Post-Konsumenten-Schrotte in die Automobilindustrie

ABBILDUNG 27 | Wertschöpfungskette im Mobilitätssegment über TSR40



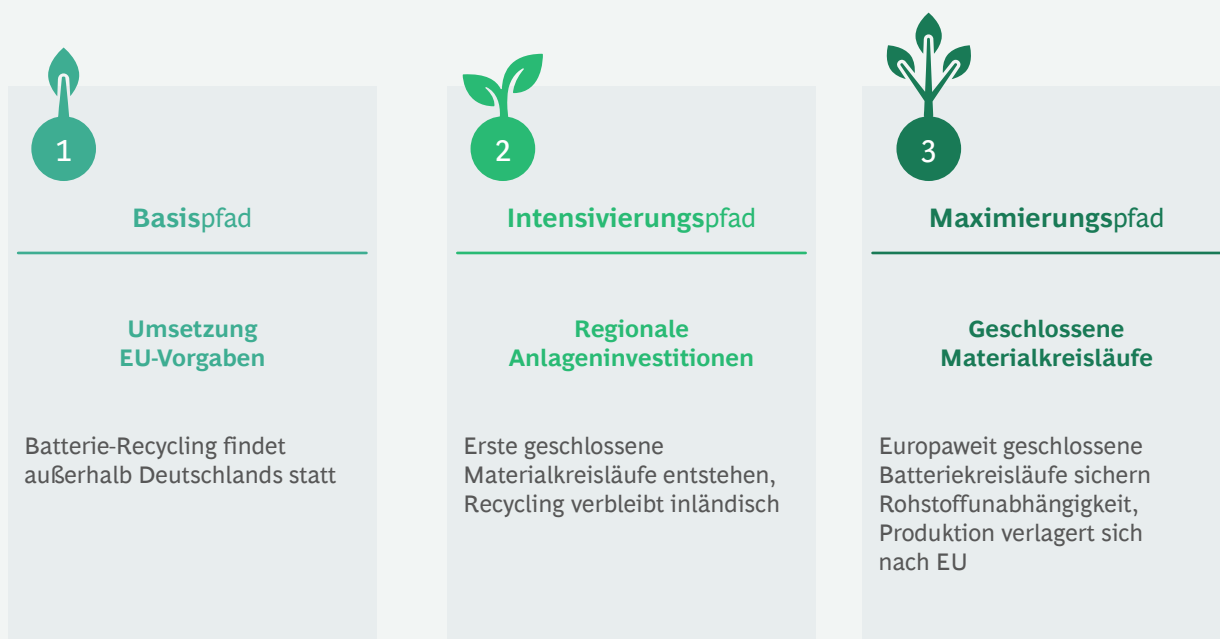
Quelle: TSR

TSR40 zeigt damit, wie Circular-Economy-Ansätze entlang der gesamten Wertschöpfungskette wirken und gleichzeitig zentrale Herausforderungen der Industrie adressieren können. In der Eisen- und Stahlindustrie, welche für rund sieben Prozent der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist, ermöglicht die gezielte Aufbereitung komplexer Post-Consumer-Materialien neben der Bereitstellung hoch-

wertiger Rezyklate auch Pfade zur Dekarbonisierung für sämtliche Partner in der Industrie. Insgesamt bündelt TSR die Reduktion von Energieverbrauch und Ressourcenabbau mit höherer Resilienz und macht so deutlich, dass substanzielle Emissionsminderungen in der Stahlindustrie bereits heute realisierbar sind, mit geringeren durchschnittlichen Kosten pro produzierter Tonne Stahl.

Das Beispiel TSR40 zeigt, wie Circular-Economy-Ansätze entlang der gesamten Wertschöpfungskette wirken und gleichzeitig zentrale Herausforderungen der Industrie adressieren können. In der Eisen- und Stahlindustrie, die für ca. 7 % der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist, ermöglicht die gezielte Aufbereitung komplexer Post-Konsumenten-Materialien neben der Bereitstellung hochwertiger Rezyklate auch Pfade zur Dekarbonisierung für sämtliche Partner in der Industrie. Der Einsatz von TSR40 führt in der Gesamtbetrachtung nicht nur zu

Einsparungen von Energie und Ressourcen, sondern auch zu einer Steigerung der Resilienz – und macht zudem deutlich, dass substanzielle Emissionsminderungen in der Stahlindustrie bereits heute realisierbar sind, mit geringeren durchschnittlichen Kosten je produzierte Tonne Stahl.



Batterie-Recycling wird zu einem der wichtigsten strategischen Hebel für eine höhere Versorgungssicherheit – mit dem Potenzial, Importe von Batteriematerial bis 2045 um 10 – 15 % zu reduzieren.⁹⁶

Wie einleitend beschrieben, sind Batterien ein Kernelement der Fahrzeugelektrifizierung, wobei die benötigten Materialien heute jedoch nahezu vollständig importiert werden, vorrangig aus China. Da Batteriematerialien wie Lithium, Nickel oder Mangan in Deutschland nicht abgebaut und nur sehr begrenzt verarbeitet werden können, der Bedarf hingegen durch den Anstieg der EV-Abdeckung in Deutschland steigt, ist auch langfristig keine Entspannung, sondern eine Zunahme der Importabhängigkeit zu erwarten. Umso wichtiger wird daher eine möglichst hohe und effiziente Rückgewinnung von Rezyklaten – insbesondere, da die jährlichen *End-of-Life* Mengen von Traktionsbatterien von heute nur wenigen Hundert Einheiten bis 2045 auf ca. 650.000 bis 800.000 anwachsen werden und damit substantielle Mengen für geschlossene Kreisläufe bereitstellen könnten.

Neben der konsequenten Sicherstellung von Rückläufen (wie unter Hebel 2 beschrieben) muss in moderne Aufbereitungs- und Raffinationskapazitäten investiert werden – im Intensivierungspfad sind schätzungsweise kumuliert knapp 1 Mrd. Euro bis 2045 erforderlich. Heute geht ein erheblicher Teil der Wertschöpfung verloren, weil die in Europa anfallende Schwarzmasse überwiegend exportiert und im Inland kaum hydrometallurgisch verarbeitet wird – obwohl die Metalle aus dem europäischen Fahrzeugbestand stammen. Zwar bauen einzelne Unternehmen bereits hydro- und pyrometallurgische Prozesse aus, doch für die Nutzung des vollen Potenzials ist eine strukturelle Erweiterung der Recycling-Landschaft unabdingbar. Den nötigen Investitionen könnte bis 2045 ein zusätzliches jährliches Bruttowertschöpfungspotenzial von 1,3 bis 1,6 Mrd. Euro gegenüberstehen (Intensivierungspfad bzw. Maximierungspfad). Um mittel- und langfristig vollständige Resilienz gegenüber der Importabhängigkeit zu erreichen, wäre nachgelagert zudem der Aufbau einer zusätzlichen Batteriezellfertigung in Deutschland (oder der EU) erforderlich – die dafür benötigten Mittel werden im Rahmen dieser Studie nicht quantifiziert.⁹⁷

⁹⁶ Im Intensivierungspfad und unter Annahme der Erhöhung heutiger Recycling-Quoten, z. B. Lithium: heute 1 % auf 80 % (Intensivierungs- und Maximierungspfad), Nickel: heute 60 % auf 95 % (Intensivierungs- und Maximierungspfad), Kobalt: heute 30 % auf 95 % (Intensivierungs- und Maximierungspfad).

⁹⁷ Auch ökonomische und ökologische Potenziale der Zellfertigung selbst wurden nicht quantifiziert.

Case-Study 3: PreZero – Batterie-Recycling als strategische Investition zur Rohstoffsicherung in Deutschland

Das Recycling von Batterien aus der Elektromobilität eröffnet Deutschland sowohl wirtschaftlich als auch strategisch Chancen. Wie bereits dargelegt, sehen sich Deutschland und Europa bei kritischen Metallen wie Lithium, Nickel und Kobalt einer zunehmenden Abhängigkeit ausgesetzt. Diese manifestiert sich unter anderem in massiven Preisschwankungen bei Lithium, dessen Preis seit 2022 zwischen 10.000 und mehr als 50.000 Euro pro Tonne lag. Gleichzeitig wird das Volumen der Batterierückläufe zwischen 2030 und 2045 rasant ansteigen. Prognostiziert wird ein Wachstum um den Faktor 50. Vor diesem Hintergrund bietet das Recycling von EV-Alt Batterien die Möglichkeit, Europas Rohstoffabhängigkeit signifikant zu reduzieren und zugleich eine jährliche Wertschöpfung in Milliardenhöhe am Standort Deutschland zu sichern.

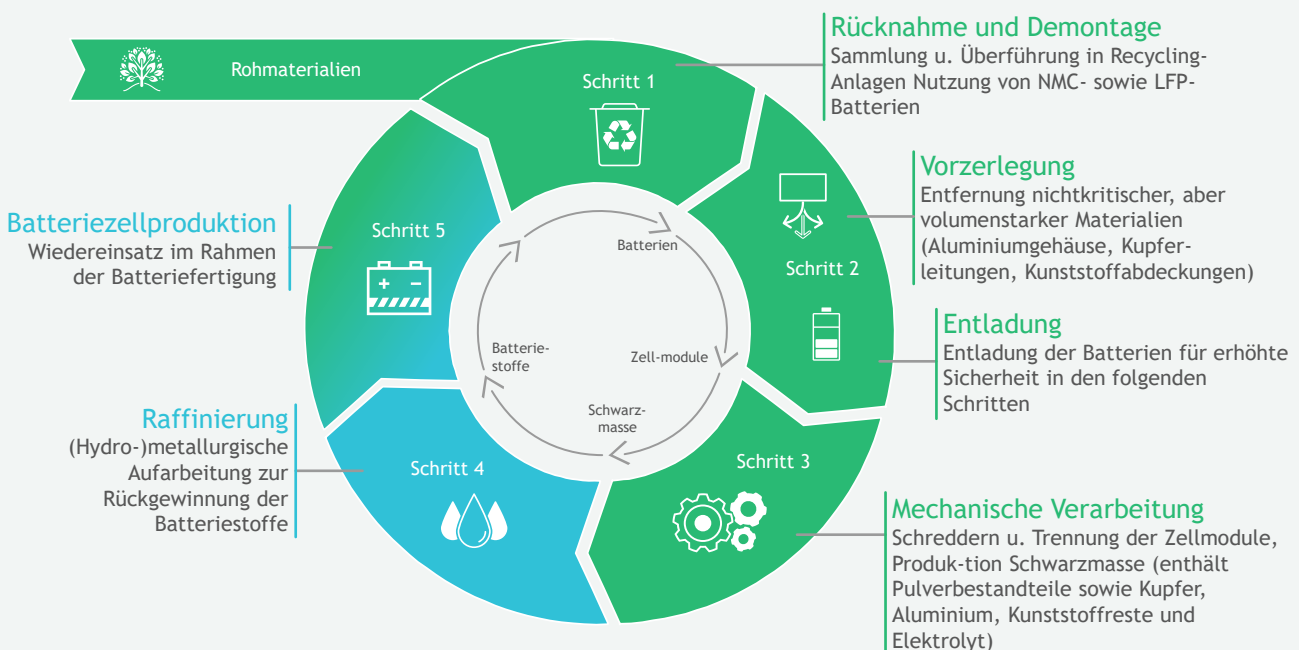
Derzeit befindet sich in Deutschland lediglich ein geringer Teil der Wertschöpfungskette. Die wertstiftenden Prozesse sind primär in Asien angesiedelt. Der Recycling-Prozess von EV-Alt Batterien beginnt mit der Rücknahme (Sammlung/Transport) und Demontage (Schritt 1) sowie der Vorzerlegung und Entladung (Schritt 2). Bisher lag der Fokus in Deutschland vor allem auf der mechanischen Verarbeitung (Schritt 3). Die dabei gewonnene Schwarzmasse – bestehend aus

metallhaltigen Pulvern, Kupfer, Aluminium, Kunststoffen und dem Elektrolyt – wird jedoch nahezu vollständig exportiert. Damit geht ein erheblicher Teil der Wertschöpfung verloren, da erst die anschließende Weiterverarbeitung die Rückgewinnung strategischer Metalle ermöglicht und so eine höhere Importunabhängigkeit schaffen würde.

Erste Anlagen in Deutschland markieren einen wichtigen Schritt zur weiteren Skalierung der mechanischen Verarbeitung in Europa. Ein wesentlicher Teil dieser Entwicklung ist die PreZero Battery Recycling GmbH am Standort Meppen (Niedersachsen). Die dortige Anlage nutzt ein CO₂-neutrales thermomechanisches Verfahren (Schritt 3), das eine Rückgewinnungsrate der Schwarzmasse von über 98 % erzielt. Nach der Bereitstellung der Zellmodule verarbeitet die Anlage aktuell jährlich bis zu 30.000 Tonnen EV-Alt Batterien, bei einer genehmigten Kapazität von insgesamt 60.000 Tonnen. Die Investition in diese Großanlage zur industriellen Skalierung ist ein entscheidender Schritt, um Deutschland als führenden Standort für die Wertschöpfung im europäischen Batterie-Recycling zu etablieren. Bereits heute erwirtschaften diese und ähnliche Anlagen Umsätze in zweistelliger Millionenhöhe. PreZero agiert dabei als

Batterie-Recycling: Deutschland mit Fokus auf mechanischer Verarbeitung

ABBILDUNG 28 | Prozessschritte des EV-Batteriekreislaufs



■ Findet in Deutschland statt ■ Findet weitgehend nicht in Deutschland statt (primär Asien)

zentraler Systempartner und gewährleistet einen Closed-Loop-Ansatz – von der gesetzeskonformen Rücknahme (Erfüllung von BattG/*Extended Producer Responsibility, EPR*) bis hin zur Rückgewinnung der Rohstoffe.

Um das volle Potenzial der Circular Economy zu erschließen, müssen die verbleibenden Elemente der Wertschöpfungskette konsequent nach Europa verlagert werden. Während sich ein europäisches Netzwerk für die Sammlung, Demontage und Entladung (Schritte 1 und 2) bereits im Aufbau befindet, steht der Aufbau der metallurgischen Verarbeitung (Schritt 4) sowie einer nennenswerten Batterieproduktion (Schritt 5) in Deutschland und Europa noch am Anfang. Er ist essenziell, um den Stoffkreislauf zu schließen. Um hier voranzukommen, sind strategische Kollaborationen mit hydrometallurgischen Anlagenbetreibern und Zellherstellern erforderlich. Ein langfristiges Bestehen im globalen Wettbewerb ist dabei an folgende Voraussetzungen gebunden:

- **Skalierung der Kapazitäten:** Ausbau weiterer mechanischer Verarbeitungsanlagen im Inland auf industrielle Größenordnungen von mindestens 30 bis 60 kt

- **Großinvestitionen in die Hydrometallurgie:** Bereitstellung von Investitionsvolumina in Höhe von ca. 500 Mio. Euro für den Aufbau von Kapazitäten zur Verarbeitung von 50 kt Schwarzmasse
- **Politische Flankierung:** Priorisierung des Standortausbaus durch optimierte Rahmenbedingungen für effiziente Transportprozesse sowie beschleunigte Genehmigungsverfahren
- **Industrielle Synergien:** Forcierung von Kooperationen zwischen der Automobil-, der Chemie- und der Entsorgungsindustrie, um geschlossene Kreisläufe operativ zu realisieren

Der Aufbau einer geschlossenen Batterie-Recycling-Wertschöpfungskette in Deutschland ist strategisch notwendig, und erste Schritte hin zu einer Wertschöpfungsverlagerung sind bereits getan. Das Recycling von Altbatterien verbindet Zirkularität mit Ressourcensouveränität und fungiert als zentraler Pfeiler für die Sicherung kritischer Rohstoffe in Europa. Durch gezielte Investitionen in die Verarbeitung der Schwarzmasse kann Deutschland vom reinen Exporteur von Recycling-Rohstoffen zum führenden Recycling-Technologie-Standort der EU aufsteigen.

Zusammenfassung: Kreislaufhebel stärken die Resilienz durch geringeren Importbedarf und steigern die Bruttowertschöpfung bei gleichzeitig sinkenden CO₂-Emissionen

Kreislaufhebel im Mobilitätssegment können im Intensivierungspfad die jährliche deutsche Wertschöpfung bis 2045 um ca. 4,8 Mrd. Euro gegenüber heute steigern. Durch den konsequenten Ausbau der betrachteten Kreislaufhebel könnten sich bis 2045 erhebliche zusätzliche Wertschöpfungspotenziale erschließen. Im Intensivierungspfad ist dies vor allem getragen durch Hebel 1 (*Reuse* und *Remanufacturing* von Pkw-Komponenten). Im Maximierungspfad würde sich das jährliche Potenzial gegenüber 2023 auf bis zu 7,3 Mrd. Euro erhöhen, da zusätzlich höhere Rücklaufmengen für Recycling erschlossen werden. Die Bruttowertschöpfungseffekte der Hebel 2 und 3 (Recycling von Pkw, Zügen und Batterien) fallen jedoch überwiegend segmentübergreifend an. Eine Wertschöpfungssteigerung durch erfolgreiche Umsetzung der Hebel kann jedoch nur gelingen, wenn die Wettbewerbsfähigkeit der Produkte sowohl gegenüber der Primärproduktion als auch im internationalen Vergleich sichergestellt wird.

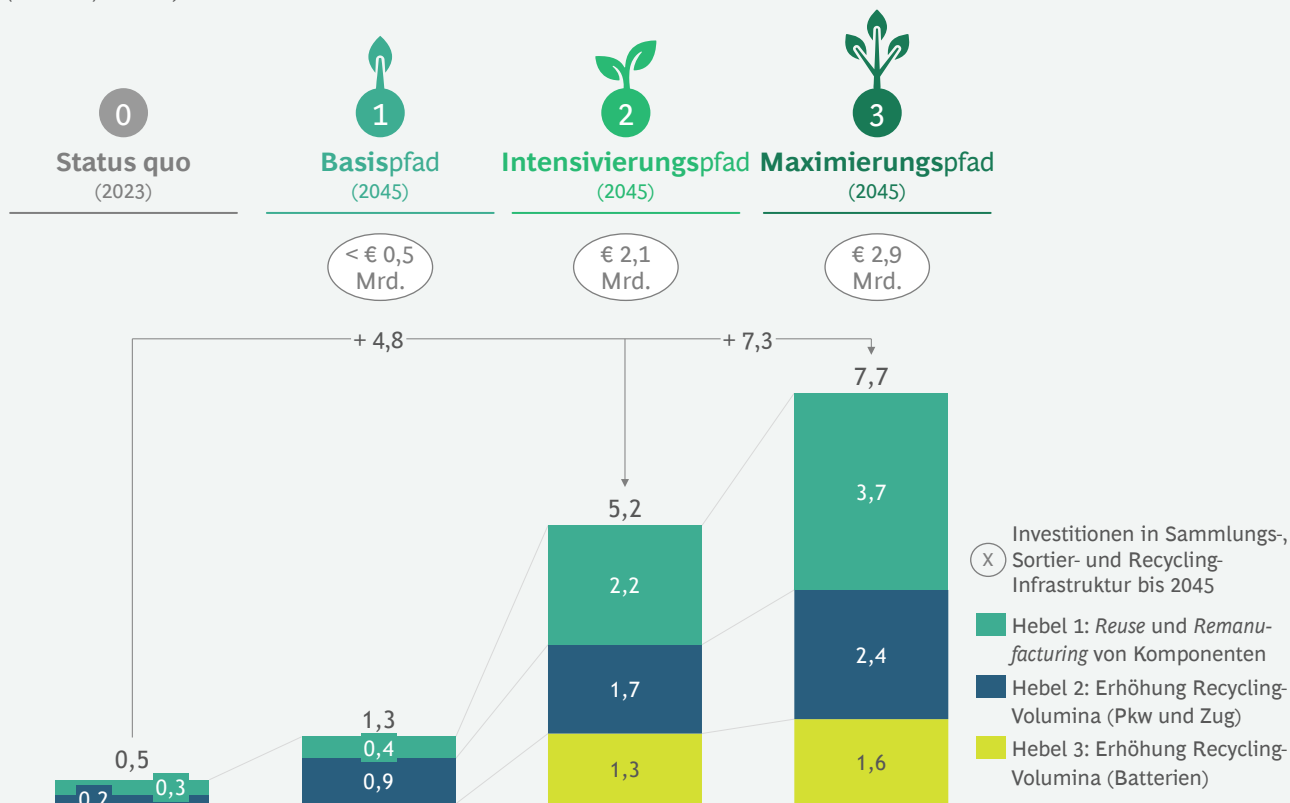
Weiterhin können substanzielle Effekte im Bereich Materialbedarfsreduktion und Einsparung von CO₂-Emissionen erreicht werden. Im Intensivierungspfad können *Reuse* und *Remanufacturing* von Pkw-Komponenten im Jahr 2045 den direkten Materialeinsatz im Mobilitätssegment um ca. 190.000 Tonnen gegenüber 2023 senken. Ergänzend ermöglichen Recycling-Hebel – insbesondere durch eine höhere Verfügbarkeit von Stoffströmen – gegenüber 2023 weitere 900.000 Tonnen an Rezyklaten, vor allem aus Stahl, Aluminium, Kupfer, Kunststoffen, Glas, seltenen Erden und ersten Batterierohstoffen, die überwiegend Primärmaterial ersetzen. Dies könnte im Jahr 2045 zu zusätzlichen CO₂-Einsparungen von ca. 4,1 Mio. Tonnen CO₂e im Vergleich zu heute führen.⁹⁸ Im Maximierungspfad würden diese Potenziale auf 370.000 Tonnen direkte Materialeinsparungen und auf 1,8 Mio. Tonnen an zusätzlicher Rezyklatverfügbarkeit steigen. Insgesamt könnten auf diese Weise im Jahr 2045 CO₂-Emissionen um bis zu 5,7 Mio. Tonnen CO₂e gegenüber 2023 reduziert werden.

⁹⁸ Rezyklate stehen segmentübergreifend zur Verfügung und würden nicht zwangsweise dem Mobilitätssektor zugeordnet werden.

Reuse und Remanufacturing mit dem höchsten Potenzial für BWS-Wachstum

ABBILDUNG 29 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Kreislaufhebel bis 2045

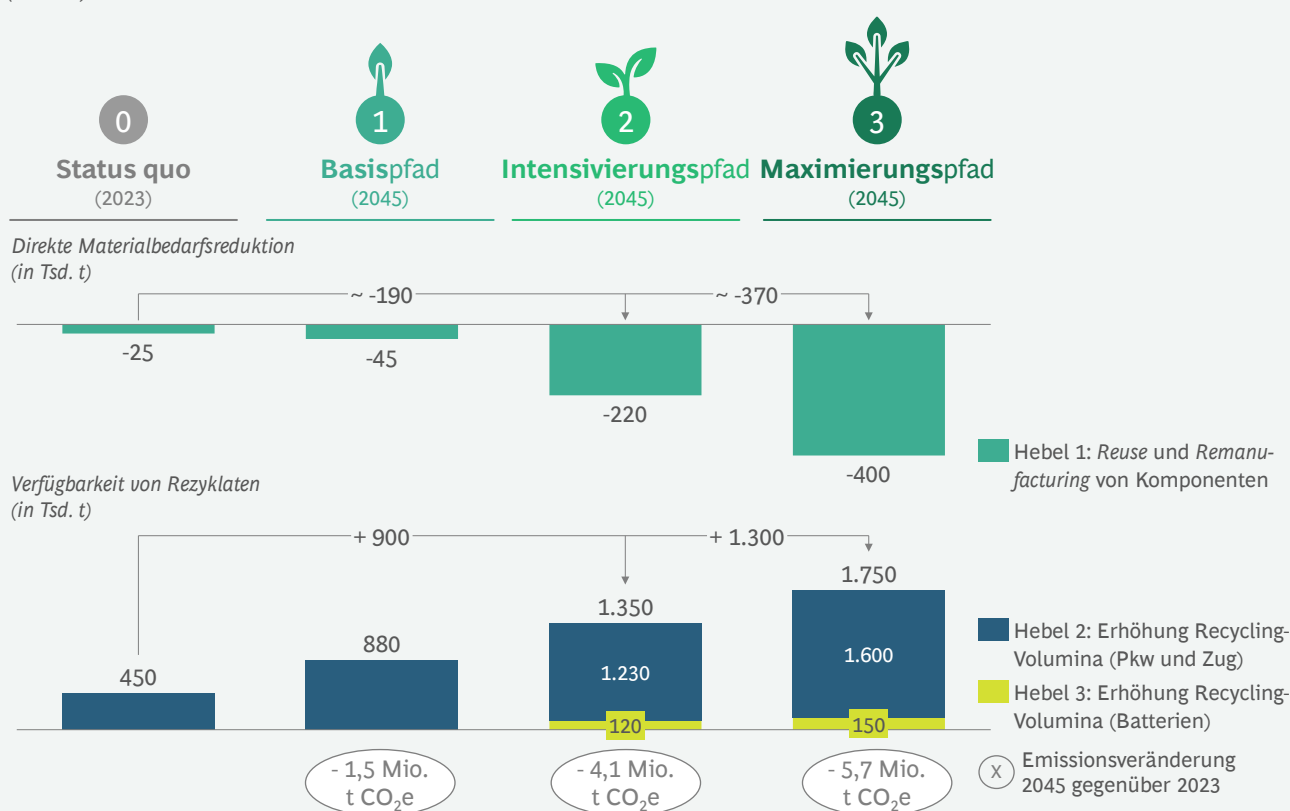
(in Mrd. €, nominal)



Gesamtheitliche Materialeffekte von über 1,5 Mio. t im Intensivierungspfad möglich

ABBILDUNG 30 | Materialbedarfsveränderung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2045

(in Tsd. t)



Zur Erschließung der Recycling-Potenziale sind gezielte Investitionen in moderne Vorbehandlungs-, Sortier- und Raffinationskapazitäten erforderlich. Im Intensivierungspfad beläuft sich der Bedarf bis 2045 kumuliert auf ca. 2,1 Mrd. Euro, im Maximierungspfad auf bis zu 2,9 Mrd. Euro, insbesondere für den Ausbau hydrometallurgischer Batterie-Recycling-Prozesse und hochwertiger Metall- und Kunststoffaufbereitungen. Diese Investitionen schaffen die Grundlage für stabile Rezyklatstoffströme, reduzieren langfristig Importabhängigkeiten (um 10 – 15 % bei Batteriemetallen und über 20 % bei seltenen Erden) und erhöhen die gesamtindustrielle Resilienz.

3.3.4 Barrieren: Zentrale Hürden für die Umsetzung der Kreislaufhebel im Mobilitätssegment

In welchem Umfang die Potenziale aus Remanufacturing, Fahrzeug-Recycling und Batterie-Recycling gehoben werden können, hängt maßgeblich davon ab, ob Markt-, Design- und Regulierungshürden überwunden werden. Im Segment sind zentrale Elemente der Circular Economy bereits verankert

(siehe Kapitel 3.3.2), zum Beispiel etablierte Reparaturstrukturen und Altfahrzeuge-Rücknahmesysteme. Zudem werden mit der Weiterentwicklung der EU-Altfahrzeugverordnung verschärfte Anforderungen eingeführt. Zahlreiche Neuerungen befinden sich jedoch noch im Hochlauf und müssen ihre Wirkung erst entfalten. Entsprechend bestehen bei der Erschließung zusätzlicher Potenziale weiterhin relevante Hürden. Hebelübergreifend stellen insbesondere die geringe Transparenz hinsichtlich des Fahrzeugverbleibs sowie die hohe Exportquote abgemeldeter Fahrzeuge ins Nicht-EU-Ausland eine Herausforderung dar: Wertvolle Rohstoffe werden auf diesem Wege dem europäischen Kreislauf entzogen. Digitale Verwertungsnachweise könnten hier einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung von Transparenz und Rückverfolgbarkeit leisten.

Beim Remanufacturing bremsen vor allem fehlende Skalierbarkeit und mangelnde Nachfrageanreize die Entwicklung. Rücklaufvolumina sind häufig zu niedrig und volatil, zudem erschweren logistische Komplexität sowie regulatorische Anforderungen im Zusammenhang mit der Abfallverbringung den Aufbau effizienter Prozesse. Gleichzeitig sind Werkstätten und Versicherer weiterhin primär auf Neuteile aus-

Herausforderungen vor allem im Verlust verwertbarer Abfallströme

ABBILDUNG 31 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Mobilitätssegment

	Verfügbarkeit		Verwertung		Nachfrage	
	A) Verlust verwertbarer Abfallströme	B) Begrenzte Kreislauf-verwertbarkeit	C) Limitierte Tech.-Reife und Verarbeitungskapazitäten	D) Strukturelle Kosten-nachteile	E) Unsichere Absatz-märkte	F) Ein-geschränkte Anwendbarkeit
Hebel 1: Reuse/ Remanufacturing	✗	~	~	○	~	~
Hebel 2: Steigerung Recycling-Volumina						
Stahl/Aluminium	✗	✗ ¹	○	○	~	✗
Kunststoffe	✗	~	○	✗	○	○
Andere (u. a. Kupfer)	✗	✗	○	~	~	~
Hebel 3: Steigerung Recycling-Volumina Batterien	✗	○	✗	✗	○	○

✗ Herausforderung trifft zu ○ Keine signifikante Herausforderung ~ Herausforderung trifft selektiv zu, z. B. für bestimmte Stoffströme oder Anwendungsfälle

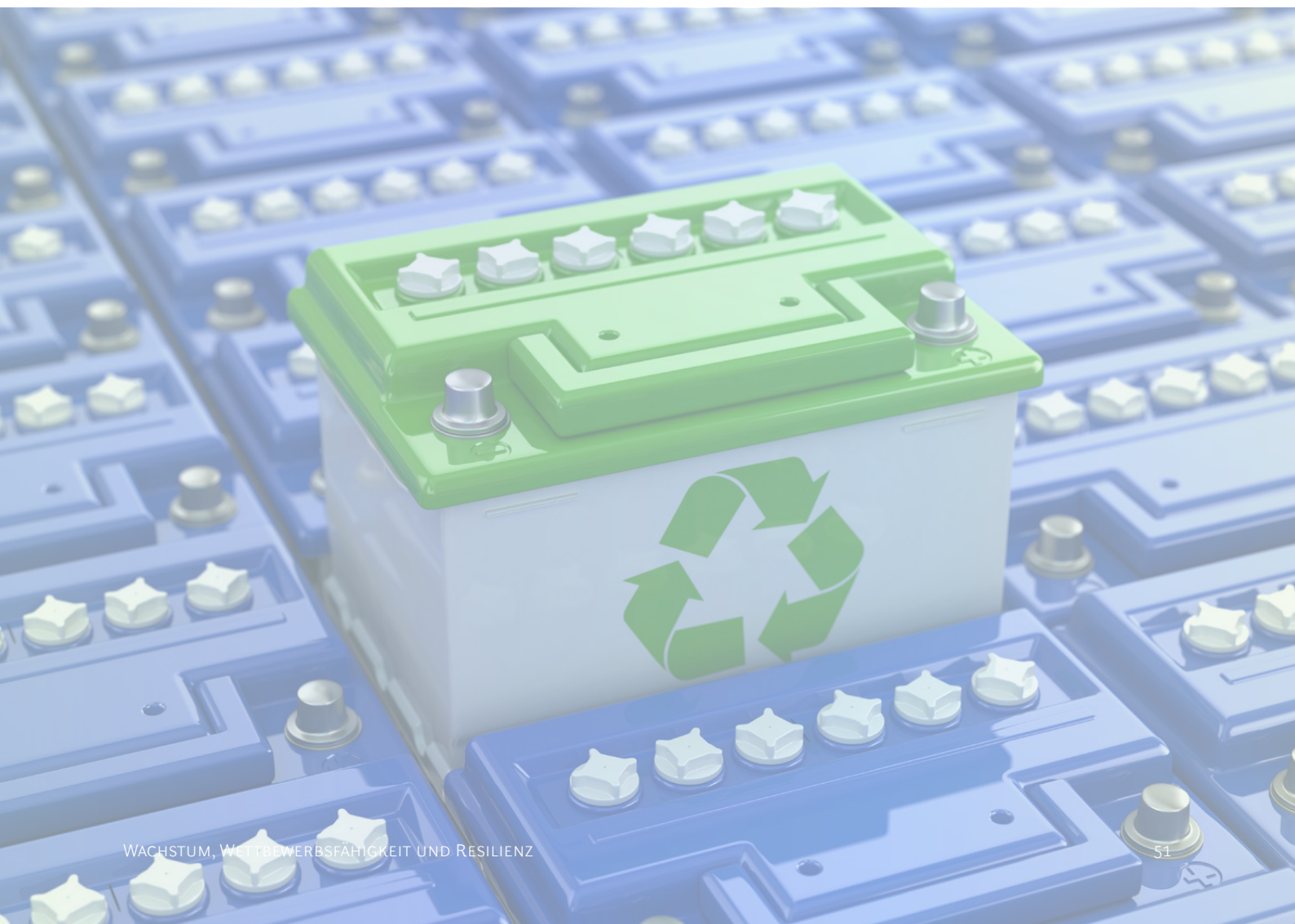
1. Aufgrund von Verunreinigungen, Legierungen, limitierter Sortenreinheit

gerichtet: *Remanufacturing* Teile werden in Freigaben, Garantien und Abrechnungslogiken nicht durchgängig gleichgestellt, und viele Komponenten sind konstruktiv nicht auf Wiederaufbereitung ausgelegt, was Demontage und Aufarbeitung verteuert. Auch können weitere regulatorische Vorgaben, etwa im Bereich der Typgenehmigung, die stärkere Anwendung von *Refurbishment* und *Remanufacturing* bremsen.

Im werkstofflichen und Batterie-Recycling begrenzen Verunreinigungen und mangelnde Sortenreinheit, fehlende wirtschaftliche Anreize und Infrastrukturdefizite den Beitrag dieser Verfahren zur Materialsubstitution. Hohe Sortier- und Reinigungskosten und historisch fehlender gesicherter *Feedstock* für hydrometallurgische Batterie-Recycling-Anlagen haben Investitionen gebremst. Neue Vorgaben zu Schwarzmasse Exporten ersetzen aber nicht den gezielten Ausbau der Infrastruktur. Für die stoffliche Verwertung von Magneten (seltene Erden) gibt es bislang kaum Anlagen, und weitere Technologieentwicklung ist erforderlich. Zudem weisen Rezyklate in einzelnen Stoffströmen weiterhin Kostennachteile gegenüber Primärmaterialien auf, die adressiert werden müssen.

Aus diesen Barrieren ergeben sich drei zentrale Handlungsfelder, um die Hebelpotenziale in der Mobilitätsbranche zu heben. Erstens muss zur Erhöhung der Verfügbarkeit und zur Sicherung einer verlässlichen Rohstoffbasis in Deutschland ein konsistenter Rahmen geschaffen werden⁹⁹, der das *Design for Circularity* stärkt und den Export verwertbarer Fahrzeuge begrenzt. Grundlage dafür sollten präzisere Abfallkriterien sowie digitale und rechtssichere Verwertungsnachweise sein. Zweitens gilt es, parallel dazu die Nachfrage nach *Reuse*-, *Remanufacturing*- und Recycling-Lösungen gezielt zu stärken, etwa durch geeignete Anreizmechanismen und regulatorische Vorteile, ohne die Wettbewerbsfähigkeit des Mobilitätssegments oder einzelner Akteure zu gefährden. Und drittens müssen Metallschrottaufbereitungs- und insbesondere Batterie-Recycling-Kapazitäten gefördert, ausgebaut und technologisch weiterentwickelt werden.

⁹⁹ Dies ist mit der EU-Altfahrzeugverordnung geplant. Die Wirksamkeit der ergriffenen Maßnahmen wird sich in den kommenden Jahren zeigen.



3.4 Maschinenbau: Segment mit großen Wachstumschancen

Zusammenfassung

- Durch *Remanufacturing* und *Refurbishment* können Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau ihre Kostenposition stärken, neue Märkte erschließen, Margen um über 5 Prozentpunkte steigern und ihre Rohstoffabhängigkeit reduzieren.
- Eine stärkere Adressierung der wachsenden Märkte für Anlagen (im Sinne von Recycling-Technologie) und Software für die Circular Economy, die im Jahr 2045 global > 150 Mrd. Euro umfassen werden, ermöglicht die Circular Economy in anderen Segmenten.
- Barrieren liegen vor allem in Unternehmensprioritäten, zudem im regulatorisch herausfordernden Umfeld für Verwerter, mit Rückwirkungen auf Technologiehersteller.

3.4.1 Kontext: Maschinenbau unter Innovations- und Kostendruck, gleichzeitig mit Schlüsselrolle für Transformationsthemen

Segment auf einen Blick

	Exportquote	84 %
	Umsatzrückgang im Jahr 2024 (nominal)	-3 %
	Bruttowertschöpfungsanteil der deutschen Industrie	11 %

Der Maschinenbau zählt zu den tragenden Säulen der deutschen Industrie und hat eine Schlüsselrolle bei Transformations- und Zukunftsthemen.

Mit ca. 170 Mrd. Euro¹⁰⁰ Bruttowertschöpfung, einem Umsatz von 370 Mrd.¹⁰¹ und einer Exportquote von etwa 84 %¹⁰² trägt er entscheidend zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Volkswirtschaft bei. Er ist ein wesentlicher Enabler für die Digitalisierung industrieller Wertschöpfung, für die Dekarbonisierung energie-

und emissionsintensiver Prozesse sowie für den Ausbau einer leistungsfähigen Circular Economy. Diese Themenfelder eröffnen erhebliche Wachstums- und Differenzierungschancen, da sie weltweit adressiert werden und hohe Investitionsbedarfe erzeugen. Damit wird der Maschinenbau nicht nur zum Lieferanten von Technologien, sondern zum strategischen Gestalter industrieller Transformation – in einem Spannungsfeld aus hohen Chancen und zunehmenden Herausforderungen

Der Maschinenbau befindet sich in einem Spannungsfeld aus Innovations- und Kostendruck, bei einer zunehmenden Rohstoffabhängigkeit:

(1) Jahrzehntlang war der Maschinenbau von stabilen Märkten und planbaren, inkrementellen Innovationszyklen geprägt. Dieses Umfeld bricht zunehmend auf, die Branche steht damit vor einem klaren Paradigmenwechsel: Automatisierung, Softwareintegration und KI verändern die technologische Basis fundamental. Kontinuierliche Optimierung genügt nicht mehr – erforderlich sind kürzere Entwicklungszyklen, technologische Sprünge und die schnelle Überführung neuer Ansätze in marktfähige Lösungen.

(2) Der internationale Wettbewerb – insbesondere durch chinesische Anbieter mit wachsender technologischer Kompetenz und Überkapazitäten – verschärft den Preis- und Margendruck erheblich. Deutsche Unternehmen stehen vor der Notwendigkeit einer konsequenten Kostenorientierung, von Effizienzsteigerungen in Produktion und Personal sowie der Implementierung von *Design-to-Cost*-Ansätzen. Gleichzeitig verschieben sich Exportmärkte zulasten traditionell starker deutscher Positionen.

(3) Der Maschinenbau ist zunehmend von geopolitischen Entwicklungen betroffen, insbesondere durch die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen wie Kupfer für elektrische Antriebe und Verkabelung oder seltenen Erden für Permanentmagnete. Gleichzeitig liegt der materialeitige Bedarf im Vergleich zu anderen Industriesektoren insgesamt auf einem moderaten Niveau, da ein großer Teil der Wertschöpfung auf Forschung und Entwicklung, Ingenieurleistungen, Software und Automatisierungstechnik entfällt.

¹⁰⁰ Wirtschaftszweig: WZ08-28, 128 Mrd. Euro sowie verbundene Services (Reparatur, Installation, Handel, Vermietung): 50 Mrd. Euro, vgl. Destatis (2023b).

¹⁰¹ Wirtschaftszweig für Produktion: WZ08-28; verbundene Services (Reparatur, Installation, Handel, Vermietung) mit zusätzlich knapp 190 Mrd. Euro Umsatz, vgl. Destatis (2023b). Abweichende Branchenberichte (z. B. VDMA) verzeichnen 255 Mrd. Euro.

¹⁰² VDMA (2025a).

3.4.2 Status quo: Maschinenbau mit unerschlossenem Potenzial und Hebelwirkung

Zirkuläre Geschäftsmodelle sind heute erst in begrenztem Umfang etabliert – trotz ihres strategischen Potenzials für Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und Marginsteigerung. Der niedrige Reifegrad von *Remanufacturing* und *Refurbishment* zeigt sich am heutigen Umsatzanteil: In nahezu allen Segmenten liegt *Remanufacturing* unter 5 % – mit wenigen Ausnahmen.¹⁰³ Pumpen(system)hersteller (6 % *Remanufacturing*- bzw. 11 % *Refurbishment*-Anteil) zählen traditionell zu den Vorreitern: Das Segment eignet sich dafür besonders gut, weil Pumpen und ähnliche Komponenten modular aufgebaut, standardisiert und langlebig sind und sich deshalb einfach zerlegen, prüfen und mit geringem Aufwand wiederaufarbeiten lassen. Im Subsegment der Abfall- und Recycling-Technik (5 % bzw. 5 %) sind *Refurbishment*- und *Remanufacturing*-Ansätze bislang vor allem bei mobilen Zerkleinerungsanlagen etabliert, sie gewinnen jedoch zunehmend auch bei stationären Systemen wie Ballenpressen an Bedeutung. Im Großanlagenbau (6 % bzw. 12 %) beziehen sich die Angaben meist auf die Überholung einzelner Komponenten oder spezifischer Teilsysteme, nicht

einer ganzen Großanlage. Typische Beispiele sind die Generalüberholung von Antriebssträngen, Pumpenaggregaten oder Steuerungskomponenten. Auffallend gering sind dagegen die Werte für Baumaschinen und Baustoffanlagen (2 % bzw. 4 %); bei der isolierten Betrachtung von Baumaschinen liegt der Anteil jedoch bei 10 %. Insgesamt wird deutlich: *Remanufacturing* und *Refurbishment* tragen bislang nur wenig zum Umsatz im Maschinenbau bei – trotz einzelner Segmente mit spürbarer Dynamik sowie erster skalierbarer Anwendungsfälle (siehe Case-Study 5: ANDRITZ Kaiser).

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Blick auf die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe. Nur 13 % der Unternehmen haben bereits Maßnahmen zur Rückgewinnung seltener oder strategisch relevanter Materialien etabliert. Weitere 18 % befinden sich in einem frühen Umsetzungsstadium, während ca. 70 % bislang keine entsprechenden Aktivitäten gestartet haben. Dabei geht es vor allem um Materialien wie seltene Erden, Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer, Aluminium, Wolfram, Titan sowie verschiedene Edelmetalle. Darüber hinaus besteht häufig eine erhebliche Abhängigkeit von kritischen Komponenten, in denen diese Materialien verarbeitet sind – etwa von Magneten,

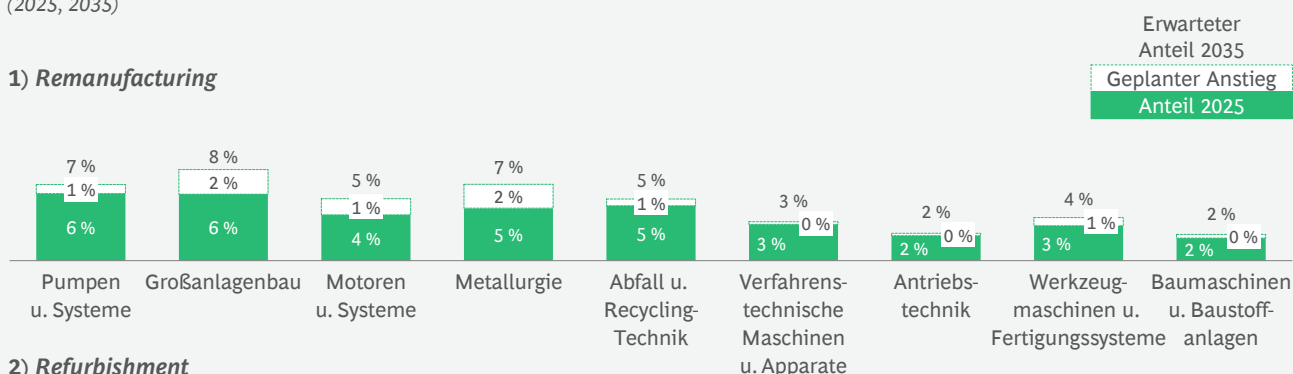
¹⁰³ Die Ergebnisse basieren auf einer Umfrage unter 150 Maschinenbau-Unternehmen im Rahmen dieser Studie.

Zirkuläre Geschäftsmodelle trotz starker Unterschiede zwischen Sub-segmenten noch nicht flächendeckend im Maschinenbau verankert

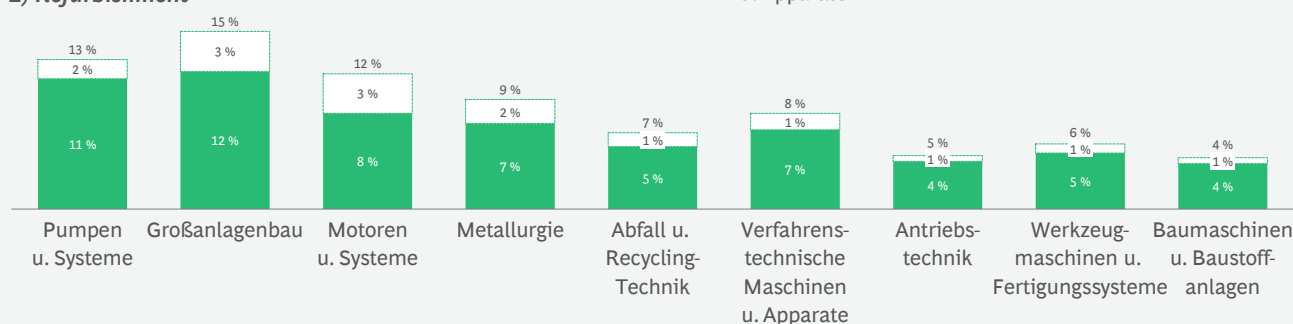
ABBILDUNG 32 | Umfrageergebnisse: Anteil am Gesamtumsatz durch *Remanufacturing*/*Refurbishment*

Anteil am Gesamtumsatz
(2025, 2035)

1) *Remanufacturing*



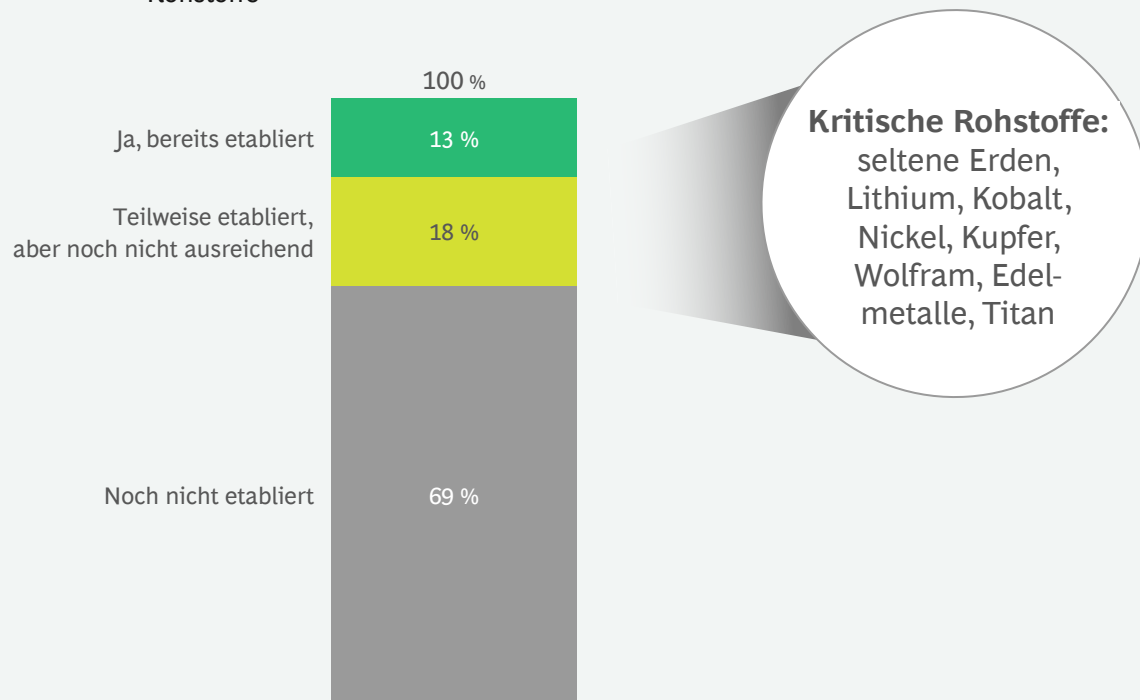
2) *Refurbishment*



Quelle: Umfrageergebnisse auf Basis der Befragung von 150 Maschinenbau-Unternehmen im Rahmen dieser Studie

Nur jedes siebte Unternehmen hat bereits Maßnahmen zur Rückgewinnung kritischer Rohstoffe etabliert

ABBILDUNG 33 | Umfrageergebnisse: Anteil etablierter Maßnahmen zur Rückgewinnung kritischer Rohstoffe



Quelle: Umfrageergebnisse auf Basis der Befragung von 150 Maschinenbau-Unternehmen im Rahmen dieser Studie

Batteriemodulen oder hochlegierten Antriebselementen. Angesichts der aktuellen geopolitischen und marktseitigen Entwicklungen gewinnt der Aufbau robuster Strategien zur Rückgewinnung, Substitution und Kreislaufführung dieser Rohstoffe zunehmend an Bedeutung, um Versorgungssicherheit, Kostenstabilität und Resilienz im Maschinenbau langfristig zu stärken.¹⁰⁴

Obwohl einzelne Unternehmen bereits erfolgreiche Angebote im Zusammenhang mit *Remanufacturing*, *Refurbishment* oder Rückgewinnung von kritischen Materialien etabliert haben, ist die industrielle Breite noch nicht erreicht. Zirkuläre Geschäftsmodelle stehen damit an einem frühen Entwicklungspunkt – mit hoher ökonomischer Relevanz, aber bislang unzureichender Durchdringung. Die Skalierung dieser Modelle ist zentral, um Wertschöpfungspotenziale zu heben, Rohstoffabhängigkeiten zu reduzieren und die Wettbewerbsfähigkeit des Maschinenbaus langfristig zu stärken.

¹⁰⁴ Die Ergebnisse basieren auf einer Umfrage unter 150 Maschinenbau-Unternehmen im Rahmen dieser Studie.

Case-Study 4: Wilo – Zirkularität als Schlüsselstrategie für seltene Erden

Seltene Erden sind für die deutsche Industrie eine Frage der Strategie. Wie bereits in vorangegangenen Kapiteln ausgeführt, sind die Metalle vor allem in der Elektronik sowie dem Fahrzeug- und Maschinenbau essenziell und werden heute größtenteils in China gewonnen und verarbeitet. Gleichzeitig gehen sie im Standard-Recycling von Elektroprodukten verloren, da bestehende Prozesse nicht auf ihre Rückgewinnung ausgelegt sind. Angesichts der großen Abhängigkeit von Importen aus dem Ausland bietet die Rückgewinnung und Wiederverwendung seltener Erden die Chance, Resilienz aufzubauen und Emissionen zu reduzieren.

Über Jahre hinweg hat Wilo ein zirkuläres Modell entwickelt, das seltene Erden effizient auffängt.

Als Wassertechnologiekonzern entwickelt Wilo unter anderem Pumpensysteme, deren Permanentmagnetmotoren wiederum auf seltene Erden angewiesen sind. Vor diesem Hintergrund finden sich zirkuläre Ansätze bei Wilo durchweg im Wertschöpfungskreislauf wieder:

- **Design for Recycling:** Schon bei der Entwicklung seiner ersten Hocheffizienzpumpe Ende der 1990er-Jahre hat Wilo darauf geachtet, Produkte nicht nur energieeffizient, sondern auch Recycling-gerecht zu konstruieren.
- **Sammelstellen:** Wilo hat in Kooperation mit Fachhandwerksbetrieben, Großhändlern und OEM-Partnern aus dem SHK-Bereich (Sanitär, Heizung, Klima) ein Sammelsystem im deutschen Markt integriert, um die Rückgabe von Altpumpen so einfach wie möglich zu gestalten. Dazu gehören inzwischen 660 Sammelstellen, Tendenz steigend.
- **Wiederverwendung:** Dank der Sammelstellen und der Recycling-gerechten Konstruktion können Seltenerd-magnete aus Altpumpen ohne Schäden demontiert und teilweise direkt wieder in neue Pumpen verbaut werden.
- **Recycling:** Nicht wiederverwendete Altmagnete werden dem Recycling-Prozess zugeführt. Hierzu wurde mit dem Wilo-Partner Heraeus und dem Fraunhofer IWKS ein Recycling-Verfahren entwickelt, um aus alten Permanentmagneten hochwertiges Magnetpulver herzustellen.
- **Magnetherstellung:** Dank hoher Fertigungstiefe am Standort Dortmund und einer hauseigenen Magnetproduktion kann Wilo das recycelte Magnetpulver in den Fertigungsprozess einfließen lassen.

Die Ergebnisse der ersten Jahre zeigen große Fortschritte in Sachen Resilienz und Emissionsreduktion. Bei den Konsumentinnen und Konsumenten erfreut sich das Sammelprogramm von Wilo großer Beliebtheit: Während der Konzern im Startjahr 2022 noch Pumpen mit einem Gesamtgewicht von 20 Tonnen sammeln konnte, ist das Volumen 2025 auf ca. 140 Tonnen angestiegen, was einer Anzahl von Pumpen im fünfstelligen Bereich entspricht. Zusätzlich wurden seit 2022 bereits 30.000 Magnete aus Altpumpen zerstörungsfrei demontiert und neu verbaut. Darüber hinaus wurden mehrere Tonnen an Altmagneten für die Produktion von Neumagneten zu Pulver verarbeitet – ein Verfahren, das CO₂-Emissionen im Vergleich zur Neuproduktion um 80 % senkt.

Die zentralen Herausforderungen liegen für Wilo in den rechtlichen Rahmenbedingungen:

Unzureichend aufeinander abgestimmte Regularien können Herstellern den Einstieg in die Circular Economy erschweren, wenn sie wie zum Beispiel die EU-Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (*Waste from Electrical and Electronic Equipment [WEEE] Directive*) in den EU-Mitgliedsländern unterschiedlich umgesetzt werden. Um die Skalierung und Übertragbarkeit zirkulärer Ansätze voranzutreiben, hat Wilo gemeinsam mit dem Fraunhofer IML, der TH Köln und weiteren Partnern das vom Projektträger Jülich geförderte Forschungsprojekt „E² Cycle“ gestartet, mit dem Ziel, das bestehende Rücknahmekonzept logistisch zu optimieren und auf andere Produkte in der SHK-Branche zu übertragen.

Mit dem Projekt macht Wilo deutlich, dass Hersteller eine Schlüsselrolle beim Aufbau von Rückgewinnungssystemen einnehmen können. Durch die Kombination aus Recycling-gerechtem Design, der Einbindung der Endkonsumenten und Investitionen in die eigene Weiterverarbeitung kann es gelingen, seltene Erden dauerhaft im Kreislauf zu halten, Emissionen zu reduzieren und gleichzeitig Abhängigkeiten zu verringern.

3.4.3 Potenzial: Kreislaufhebel erschließen neue Märkte

Drei Kreislaufhebel für den Maschinenbau bilden ein kohärentes System: Die Hebel 1 und 2 adressieren die Umsetzung zirkulärer Geschäftsmodelle innerhalb des Maschinenbaus und bei seinen Kunden. Hebel 3 ermöglicht stoffliche Verwertung in anderen Segmenten. In ihrer Gesamtheit positionieren die drei Hebel die Circular Economy als zentrales Wachstumsfeld des Maschinenbaus und eröffnen neue Markt-, Erlös- und Skalierungspotenziale.

Zirkuläre Geschäftsmodelle erschließen neue Märkte und steigern Margen um über 5 Prozentpunkte

Obwohl *Remanufacturing* und *Refurbishment* erst punktuell etabliert sind, zeigt sich ein deutliches wirtschaftliches Potenzial für Unternehmen. Ein wesentlicher Vorteil von *Remanufacturing*- und *Refur-*

bishment-Modellen liegt für 26 % der im Rahmen dieser Studie befragten Maschinenbauer in der stärkeren Kontrolle der Strukturen des Ersatzteil- und Servicegeschäfts: Sind Unternehmen enger in diese eingebunden, erschwert das den Marktzugang für Wettbewerber in besonders profitablen Segmenten. Dies zeigt sich beispielsweise bei Industrierobotern: Durch *Remanufacturing* können Hersteller zentrale Komponenten im eigenen Service- und Ersatzteilgeschäft halten und Drittanbieter effektiv vom margenstarken Ersatzteil- und Servicegeschäft ausschließen. Gleichzeitig bieten diese Modelle attraktive Margenpotenziale: Mehr als 5 Prozentpunkte¹⁰⁵ höhere EBITDA-Margen sind möglich, da die Preisabschläge im Vergleich zur Neuproduktion gering ausfallen (ca. 30 % bei *Remanufacturing*, ca. 40 % bei *Refurbishment*), während die Materialkosten aufgrund der Wiederverwendung bestehender Komponenten erheblich reduziert werden können. Darüber hinaus erschließen *Remanufacturing* und *Refurbishment* (nach Aussage von 21 % der Befragten) neue Kundensegmente – insbesondere preissensible Kunden sowie Märkte mit geringerer Kaufkraft. Ebenso können diese Strategien eingesetzt werden, um Liefer-

¹⁰⁵ Laut Survey 6 Prozentpunkte bei *Remanufacturing*, 11 Prozentpunkte bei *Refurbishment*.

TABELLE 2 | Übersicht potenzieller Kreislaufhebel im Segment Maschinenbau

#	Hebel	Beschreibung
1	<i>Remanufacturing</i> und <i>Refurbishment</i> von Anlagen	Verlängerung der Nutzungsdauer von Komponenten und Anlagen: Aufarbeitung einer alten Komponente oder Anlage für die Weiternutzung zum Verkauf (<i>Refurbishment</i>) bzw. Bereitstellung einer neuen Komponente oder Anlage auf Basis alter Bestandteile zum Verkauf (<i>Remanufacturing</i>)
2	Upgrades für Circular-Economy-Anforderungen	Upgrades, die neue technische und digitale Anforderungen der Circular Economy adressieren: Physische ¹⁰⁷ und digitale Upgrades im Zusammenhang mit Predictive Maintenance, digitalen Zwillingen oder Produktpässen schaffen Transparenz hinsichtlich Zustand, Nutzung und Materialzusammensetzung.
3	Anlagen für die Circular Economy	Sortier-, Aufbereitungs-, Demontage- und Recycling-Technologien für den deutschen Markt und den Export: Sie schaffen die technischen Voraussetzungen, Materialien hochwertig zurückzugewinnen und wieder in industrielle Prozesse einzuspeisen. ¹⁰⁸
4	Recycling von Maschinen und Komponenten	Grund für Depriorisierung: Potenzial insbesondere im Vergleich zu Hebel 3 begrenzt durch die geringe Materialintensität vieler Maschinenbauprodukte sowie bereits etablierte und weitgehend ausgeschöpfte Stoffströme
5	Sharing- und Leasingmodelle (PaaS)	Potenzial entsteht dadurch, dass Produktionskapazitäten flexibel geteilt und nutzungsbasiert eingesetzt werden können, wodurch Investitionshürden sinken und Auslastung, Liquidität sowie Geschwindigkeit steigen. Gleichzeitig ermöglicht das Modell neue Geschäfts- und Erlöslogiken über den gesamten Lebenszyklus von Anlagen, verteilt Risiken auf mehrere Akteure und erhöht so Resilienz und Effizienz im industriellen Ökosystem. ¹⁰⁹ Grund für Depriorisierung: Der Ansatz ist derzeit nur begrenzt auf den gesamten Maschinenbau übertragbar. Entsprechend ist das gesamtwirtschaftliche Potenzial limitiert; zudem kann ein Rückgang klassischer Investitionen negativ auf die Bruttowertschöpfung wirken.
6	Design for Circularity (DfC) und Modularität	Grund für Depriorisierung: Kein aktiver Hebel, aber Voraussetzung für Hebel 1 und 2 (siehe Kapitel 4).

¹⁰⁶ Beispielsweise Fähigkeit materialverarbeitender Maschinen, Rezyklate besser zu verarbeiten (Druckgussmaschinen für Kunststoffe).

¹⁰⁷ Für Abfallströme Zement und Beton, Metalle, Holz, Papier, Kunststoffe sowie E-Waste modelliert.

¹⁰⁸ VDMA (2024).



engpässe oder Kapazitätsgrenzen zu überbrücken, was die Angebotsflexibilität erhöht (genannt von 13 % der Befragten). Vor diesem Hintergrund bleibt der Kannibalisierungseffekt auf das Neugeschäft begrenzt.¹⁰⁹

Für die langfristige Entwicklung im Intensivierungspfad wird angenommen, dass sich der Anteil von *Remanufacturing* und *Refurbishment* gegenüber dem heutigen Anteil (siehe Abb. 32) bis 2045 verdoppelt. Hierfür sind jedoch eine höhere Skalierung und eine ambitioniertere Marktdurchdringung nötig. Unter diesen Annahmen könnte der deutsche Maschinenbau über *Remanufacturing* und *Refurbishment* bis 2045 jährlich 17 – 19 Mrd. Euro Umsatz generieren. Damit entsteht ein struktureller Vorteil für den Standort Deutschland: Ein größerer Teil der Wertschöpfung verbleibt im Inland, da *Remanufacturing*./*Refurbishment*-Prozesse arbeits- und technologieintensiver sind und wesentlich mehr Bearbeitungsschritte lokal erfolgen.¹¹⁰ Das würde die deutsche

Bruttowertschöpfung um 10 Mrd. Euro p. a. gegenüber 2023 steigern. Gleichzeitig können der mit der Neuproduktion von Anlagen verbundene Materialeinsatz sowie die Emissionen reduziert werden – um ca. 30.000 t p. a. bzw. um ca. 100.000 t CO₂ p. a., also in dem Umfang, in dem es zu einer Substitution durch zirkuläre Alternativen kommt.

¹⁰⁹ Auf Basis des Surveys wurde in den Berechnungen angenommen, dass aktuell 10 % des *Remanufacturing*./*Refurbishment*-Umsatzes Umsätze aus Neuproduktion verhindern.

¹¹⁰ Im Gegensatz dazu basiert Neuproduktion häufig auf importierten Vormaterialien und damit auf Wertschöpfung im Ausland.

Case-Study 5: ANDRITZ Kaiser – *Remanufacturing* als Wachstums- und Dekarbonisierungshebel im Maschinenbau

Der Maschinenbau steht heute vor der doppelten Herausforderung, Innovationszyklen zu beschleunigen und gleichzeitig Wertschöpfung gegenüber wachsender Konkurrenz abzusichern. Wie bereits dargelegt, sieht sich das Segment mit einer rapiden Entwicklung technologischer Anforderungen konfrontiert, andererseits üben Wettbewerber aus dem internationalen Umfeld sowie Rohstoffabhängigkeiten weiteren Margendruck aus. ANDRITZ Kaiser agiert in diesem Spannungsfeld mit einem Ansatz, der mit Hilfe von künstlicher Intelligenz sowohl Nutzungsdauern verlängert als auch zusätzliche Absatzpotenziale erschließt.

Kern dieses Ansatzes ist ein *Remanufacturing*-Angebot, das bestehende Presseninstallationen wirtschaftlich aufwertet und Obsoleszenz vermeidet. Als Teil der ANDRITZ-Gruppe stellt ANDRITZ Kaiser Stanz- und Umformautomaten für die Bearbeitung von Metallkomponenten im Industriemaßstab für Kunden in der Automobil-, Beschlags- und Elektronikindustrie her. Die Komponenten sind in der Regel sehr langlebig und bleiben ihren Kunden oft 30 Jahre lang erhalten – angepasst an die jeweils spezifischen Bedürfnisse und eng eingegliedert in die individuellen Prozesse. Weil aber auch sie irgendwann an ihre Grenzen kommen, bietet ANDRITZ Kaiser umfassende *Remanufacturing*-Lösungen für alte Stanzautomaten an. Dabei werden die Maschinen auseinandergenommen, Komponenten ausgetauscht und neue Bedienoberflächen eingesetzt. Das Ergebnis ist ein im Grunde völlig neues Produkt, das jedoch den Kern der Maschine beibehält. Daraus ergeben sich für Kunden erhebliche Einsparungen, da Neuanschaffungen und teure Anpassungen an bestehende Produktionsabläufe vermieden werden können. Darüber hinaus benötigt dieses Angebot eine enge Kundenbindung und fördert sie zugleich, was wiederum die Wettbewerbsfähigkeit für ANDRITZ Kaiser stärkt.

Das Unternehmen nutzt neueste Technologien, um Herausforderungen beim *Remanufacturing* überwinden zu können. Für das *Remanufacturing*-Angebot für ANDRITZ Kaiser liegt eine zentrale Hürde vor allem in der begrenzten Nachvollziehbarkeit teils sehr alter Systeme und Prozesse. Dabei macht das Unternehmen von künstlicher Intelligenz Gebrauch, um Stanzen und Altprozesse so genau wie möglich abzuleiten und zu optimieren und *Remanufacturing* und andere Kundendienste auszubauen.

Der Ansatz von ANDRITZ Kaiser ist im industriellen Maßstab etabliert und erzielt klare Effekte sowohl auf wirtschaftlicher als auch auf materialseitiger Ebene. Bereits heute machen *Remanufacturing*-Lösungen gemeinsam mit Kundendienst, Service und Ersatzteilen etwa 25 – 30 % des Umsatzes der ANDRITZ-Tochter aus. So wurden bereits über 30 Maschinen in einer wirtschaftlichen Größenordnung von über 25 Mio. Euro neu aufbereitet und wieder eingesetzt. Insgesamt macht ANDRITZ Kaiser so deutlich, wie *Remanufacturing* im Maschinenbau als zusätzlicher Absatzweg zum Kerngeschäft gleichzeitig Kundenbindung, Wettbewerbsfähigkeit und Kreislaufwirkung erzeugen kann.

Software und Anlagen ermöglichen Circular Economy und können im Jahr 2045 eine globale Marktgröße von über 150 Mrd. Euro erreichen

Upgrades und die Integration entsprechender Software befähigen Maschinen und Anlagen dazu, zirkuläre Anforderungen zu erfüllen. Perspektivisch rückt dabei zunehmend die Integration zusätzlicher Software in den Vordergrund, die neue zirkuläre Geschäftsmodelle ermöglicht. Im Bereich zirkulärer Wertschöpfung lassen sich zwei Arten von Software unterscheiden: Die erste umfasst spezifische Software für zirkuläre Geschäftsmodelle, die Transparenz hinsichtlich des gesamten Produktlebenszyklus herstellt – etwa Lebenszyklusanalytik, Rückverfolgbarkeitslösungen, Rückführungslogistik und Recycling-Management. Der digitale Produktpass (*Digital Product Passport, DPP*) ist ein regulatorisch definierter Spezialfall innerhalb dieser Rückverfolgbarkeitslösungen. Die zweite Kategorie umfasst Fernüberwachung und prädiktive Instandhaltung, also Anwendungen, welche die Wartung, das Ersatzteil- und Bestandsmanagement sowie die Serviceprozesse optimieren und die Nutzungsdauer von Maschinen verlängern.

Softwarelösungen zur Ermöglichung zirkulärer Geschäftsmodelle gewinnen an Bedeutung.

Remote Monitoring und prädiktive Instandhaltung sind bereits heute in vielen Segmenten breit etabliert. *Predictive-Maintenance*-Systeme und IoT-Sensorintegration gelten als zentrale Bestandteile moderner Service- und Betriebsmodelle und werden eingesetzt, um Ausfallzeiten zu reduzieren und Nutzungsdauern zu verlängern. Ihre hohe Relevanz spiegelt sich sowohl im heutigen Einsatz als auch in den Zukunftserwartungen wider. Demgegenüber befindet sich Software für zirkuläre Geschäftsmodelle – etwa digitale Zwillinge, LCA-/Produktpass-Software und Rückverfolgbarkeitslösungen – in einem wesentlich früheren Entwicklungsstadium. Ihre Nutzung ist bisher weniger verbreitet, gleichzeitig zeigen die sehr hohen Zukunftserwartungen, dass Unternehmen hier einen erheblichen Bedeutungszuwachs erwarten. Diese Lösungen sind entscheidend, um Materialflüsse transparent zu machen, regulatorische Anforderungen wie den *DPP* zu erfüllen und neue zirkuläre Geschäftsmodelle zu ermöglichen.¹¹¹

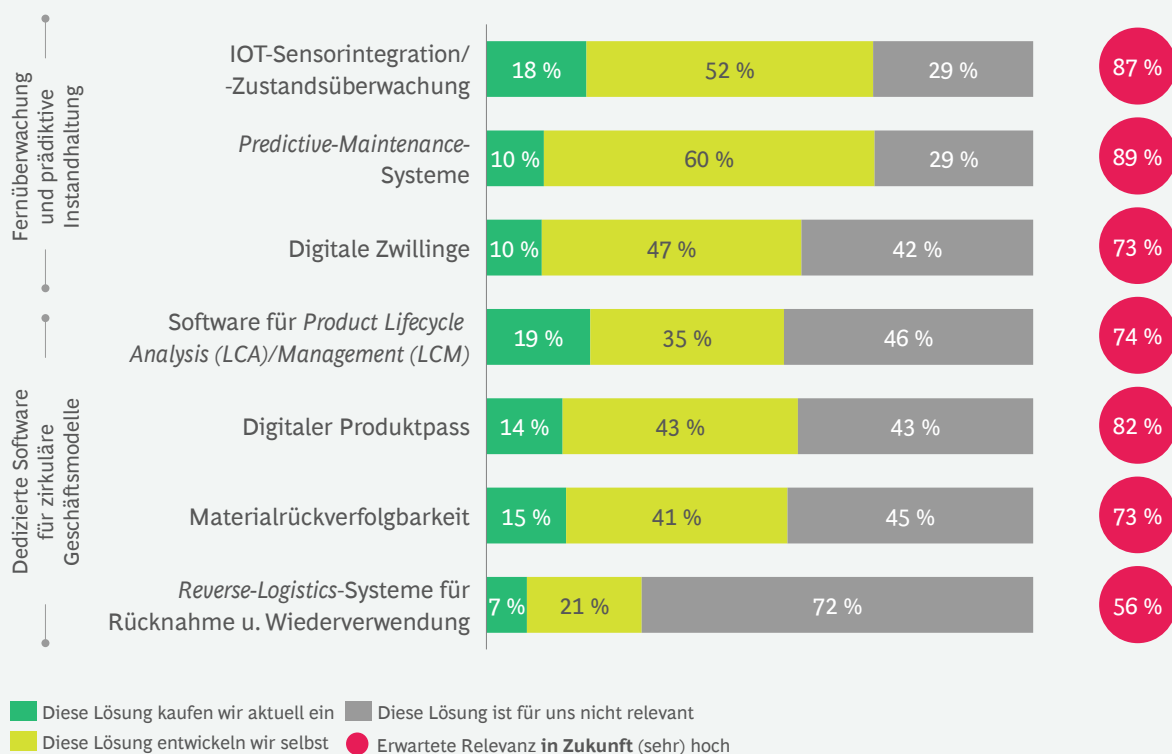
¹¹¹ Die Ergebnisse basieren auf einer Umfrage von 150 Maschinenbau-Unternehmen im Rahmen dieser Studie.

HEBEL 2 | Upgrade für Circular-Economy-Anforderungen



Relevanz dedizierter Software für zirkuläre Geschäftsmodelle steigt deutlich an

ABBILDUNG 34 | Umfrageergebnisse: Relevanz von Software im Kontext zirkulärer Geschäftsmodelle



Quelle: Umfrageergebnisse auf Basis der Befragung von 150 Maschinenbau-Unternehmen im Rahmen dieser Studie

Der globale Softwaremarkt im Kontext zirkulärer Geschäftsmodelle könnte bis 2045 auf ca. 21 Mrd. Euro anwachsen.¹¹² Laut Prognose gibt es im Zuge der Marktetablierung ein besonders starkes Wachstum bis 2030, danach verläuft die Entwicklung weiterhin positiv, wenn auch mit abflachender Dynamik. Als Teil davon entsteht ein globaler DPP-Softwaremarkt von ca. 2,5 Mrd. Euro bis 2045, der maßgeblich durch regulatorische Vorgaben und steigende Transparenzanforderungen entlang der Lieferketten getrieben wird. Für Deutschland bedeutet dies Wertschöpfungspotenzial: Bei einem auf 30 % anwachsenden Marktanteil könnte bis 2045 jährlich ein Umsatz von ca. 6 Mrd. Euro erzielt und die jährliche Bruttowertschöpfung um 3 Mrd. Euro gesteigert werden (Intensivierungspfad).¹¹³ Die direkten Effekte auf Material- und CO₂-Einsparungen bleiben begrenzt, wirken jedoch als entscheidende Enabler auf der zweiten Ebene, indem sie die Grundlage für effiziente Kreislaufmodelle schaffen.

Wachsende Abfallströme¹¹⁴ und steigende Verwertungsambitionen könnten weltweit zu erheblichen Investitionen von jährlich mehr als 130 Mrd. Euro in Sortier- und Recycling-Anlagen führen. Das jährliche Recycling-Volumen in Europa würde bereits im Basispfad bis 2045 um jährlich 240 Mio. Tonnen bzw. um 40 % ansteigen. Dabei wird angenommen, dass die aktuellen Sammel- und Recycling-Quoten weitergeführt werden bzw. in Stoffströmen steigen, wo regulatorisch Ziele gesetzt sind.¹¹⁵ In den Intensivierungs- und Maximierungspfaden würde dieses jährliche Volumen aufgrund ambitionierterer Sammel-, Sortier- und Verwertungsquoten um 530 – 810 Mio. Tonnen wachsen. Diese Entwicklung würde kumuliert bis 2045 allein in Europa zu Investitionen in Sortier- und Recycling-Technologie von 100 Mrd. Euro (Basispfad) bis 210 Mrd. Euro (Maximierungspfad) führen¹¹⁶ – mit jährlichen Wachstumsraten von ca. 6 – 9 % und damit einem erheblichen Wachstumspotenzial innerhalb eines stagnierenden europäischen Maschinenbaumarktes. Eine zentrale Rolle

¹¹² BCG-Analyse auf Basis von Verdantix (2023) sowie FMI (2025).

¹¹³ Inklusive Hardware-Upgrades ein Umsatzpotenzial von 8,5 Mrd. Euro und ein BWS-Potenzial von 4 Mrd. Euro.

¹¹⁴ Kumuliert bis 2045, exklusive Bio-Abfall (biogene Träger nicht im Scope dieser Studie).

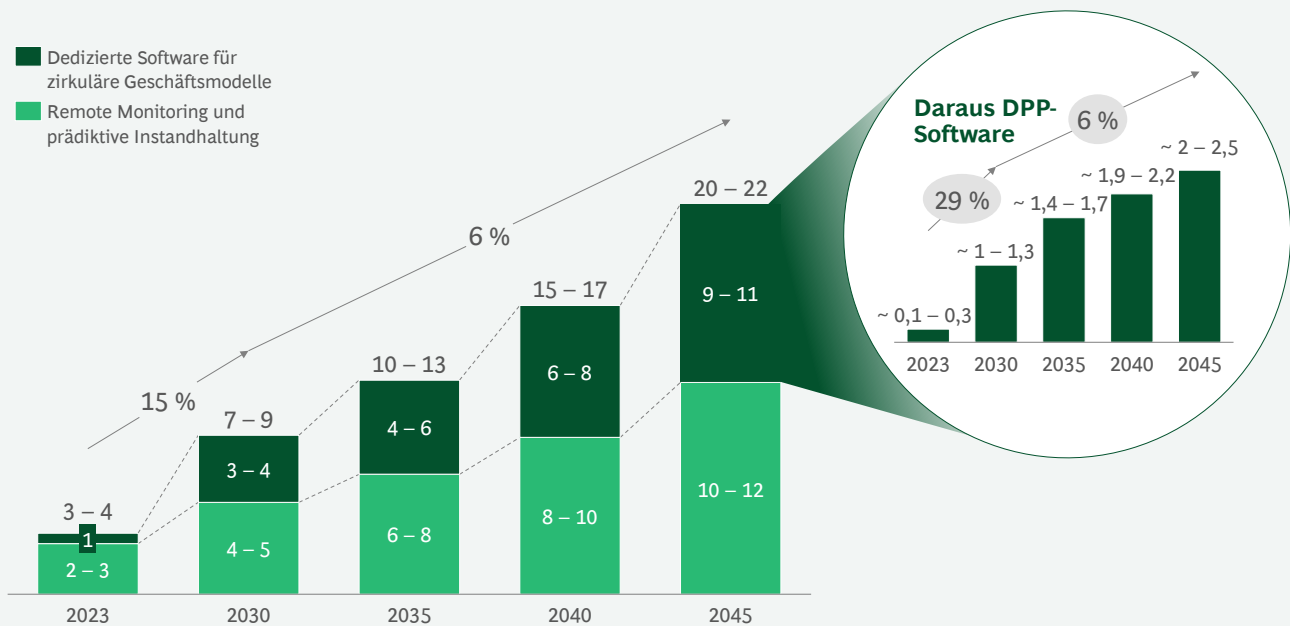
¹¹⁵ Bspw. PPWR für Plastik und Papier, EU-BatterieVO für Batteriemetalle.

¹¹⁶ Zusätzliche Investitionen global (exklusive Europa) von über 1,1 Billionen Euro bis 2045.

Softwaremarkt zur Ermöglichung zirkulärer Geschäftsmodelle steigt bis 2030 stark, DPP entspricht 3 – 10 % des Marktes

ABBILDUNG 35 | Globaler Softwaremarkt für zirkuläre Geschäftsmodelle

Globaler Markt
(in Mrd. €)



Quelle: Verdantix 2023; Future Market Insights 2024; Coherent Market Insights 2024; BCG-Analyse

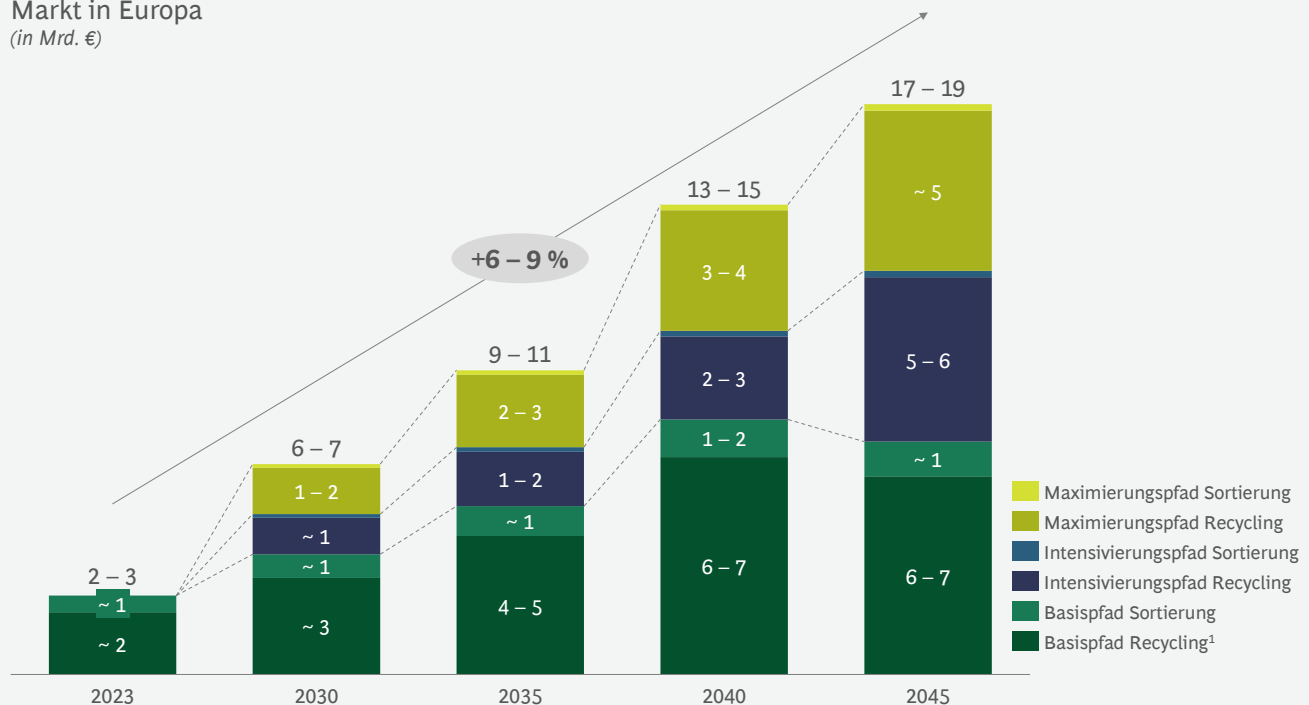
HEBEL 3 | Anlagen für die Circular Economy



Verneunfachung des Marktes für Sortierungs- und Recycling-Technologie im Maximierungspfad mit Wachstum von bis zu 9 % pro Jahr erwartet

ABBILDUNG 36 | Marktgröße für Sortierungs- und Recycling-Technologie in Europa

Markt in Europa
(in Mrd. €)



1. Unter der Annahme, dass der Großteil der hydrometallurgischen Verarbeitung von Batterien weiterhin außerhalb Europas stattfindet
Quelle: WBCSD; BCG-Analyse

spielen dabei auch Recycling-Anlagen für *Green-Tech*-Produkte: Bis 2045 ist mit erheblichen jährlichen Rücklaufmengen zu rechnen, darunter mehr als 1,3 Mio. Tonnen Photovoltaikmodule, 0,8 Mio. Tonnen Windkraftanlagen und 0,6 Mio. Tonnen Batterien aus Mobilitäts- und Speichieranwendungen.

Gleichzeitig verschärft sich der internationale Wettbewerb spürbar. Deutsche Hersteller im Bereich Recycling- und Sortiertechnik hielten 2021 einen Weltmarktanteil von ca. 12 %¹¹⁷; verzeichneten aber bis 2024 einen jährlichen Umsatzrückgang um 1 %¹¹⁸, weshalb im Basispfad von stagnierenden Umsätzen und damit einem sinkenden Marktanteil ausgegangen wird. Um das entstehende Wertschöpfungspotenzial zu sichern und Marktanteil (zurück) zu gewinnen, ist es daher zentral, die Innovationsführerschaft auszubauen und technologische Differenzierung aktiv voranzutreiben.

Das Umsatz- und Bruttowertschöpfungspotenzial aus der Produktion von Sortier- und Recycling-Technologie bis 2045 ist erheblich:

Im Intensivierungspfad läge das Umsatzpotenzial für das Subsegment des deutschen Maschinenbaus bei 13 – 14 Mrd. Euro, im Maximierungspfad bei 14 – 15 Mrd. Euro.¹¹⁹ Höhere Verwertungsquoten in Europa und die Stärkung des deutschen Marktanteils im globalen Wettbewerb¹²⁰ würden damit bis 2045 gegenüber 2023 zusätzliche Wertschöpfung von jährlich 7 Mrd. Euro (Intensivierungspfad) bis 8 Mrd. Euro (Maximierungspfad) ermöglichen. Dieser Hebel führt nicht unmittelbar zu einer Reduktion des Materialeinsatzes oder der direkten CO₂-Emissionen des Maschinenbaus. Im Gegenteil – durch die zusätzliche Produktion neuer Sortier- und Recycling-Anlagen entsteht zunächst sogar ein leicht erhöhter Ressourcen- und Energiebedarf. Das indirekte Wirkungspotenzial, das durch die Anlagen ermöglicht wird, ist jedoch um ein Vielfaches größer.¹²¹

¹¹⁷ Rückgang um 3 % zwischen 2011 und 2021, vgl. ASA et al. (2024).

¹¹⁸ EUWID Recycling und Entsorgung (2024).

¹¹⁹ 2023 ca. 2,6 Mrd. Euro, im Basispfad für 2045 ca. 4,0 Mrd. Euro.

¹²⁰ Steigerung des Marktanteils um 10 % im Intensivierungs- und Maximierungspfad angenommen.

¹²¹ Um Doppelzählung zu vermeiden, wird dieses indirekte Potenzial nicht im Rahmen des Maschinenbausegments quantifiziert, sondern in dem Segment, das den jeweiligen Stoffstrom verursacht, der in diesen Anlagen recycelt wird.

Wichtig ist, dass das ausgewiesene Potenzial wesentlich von der erfolgreichen Skalierung neuer Technologien abhängt. Viele der heute verfügbaren Verfahren stoßen an technische Grenzen – etwa das mechanische Recycling von Kunststoffen oder Textilien, das in seiner Qualität und Materialbreite limitiert ist. Auch der Einsatz von Post-Konsumenten-Stahlschrotten in der Flachstahlproduktion ist heute in den meisten Fällen weiterhin limitiert. Um höhere Verwertungsquoten und damit eine deutliche Ausweitung des Materialkreislaufs zu erreichen, sind technologische Weiterentwicklungen sowie der Markthochlauf innovativer Sortier- und Recycling-Lösungen erforderlich. Beispiele sind fortgeschrittene KI-gestützte Sortiersysteme zur Trennung komplexer Mehrschichtkunststoffe oder neue Aufbereitungsverfahren zur Rückgewinnung von Post-Konsumenten-Stahlschrott (siehe Case-Study 2: TSR). Die strukturierte Bewertung in Exkurs 7 („Recycling-Technologien und Sortiertechnologien – heute und in Zukunft“) zeigt deutliche Unterschiede zwischen Materialien und Technologien: Während einige Verfahren bereits eine hohe Technologiereife aufweisen und kurzfristig skalierbar sind, bestehen bei anderen Verfahren erhebliche technische Hürden, etwa hinsichtlich der Sortiergenauigkeit, der Reinheit, der Prozessstabilität oder des Energiebedarfs. Insgesamt hat das Segment damit

einen wesentlichen Einfluss darauf, ob Rezyklate künftig kostengünstig und wettbewerbsfähig hergestellt werden können – etwa durch Automatisierung und den Einsatz von künstlicher Intelligenz.

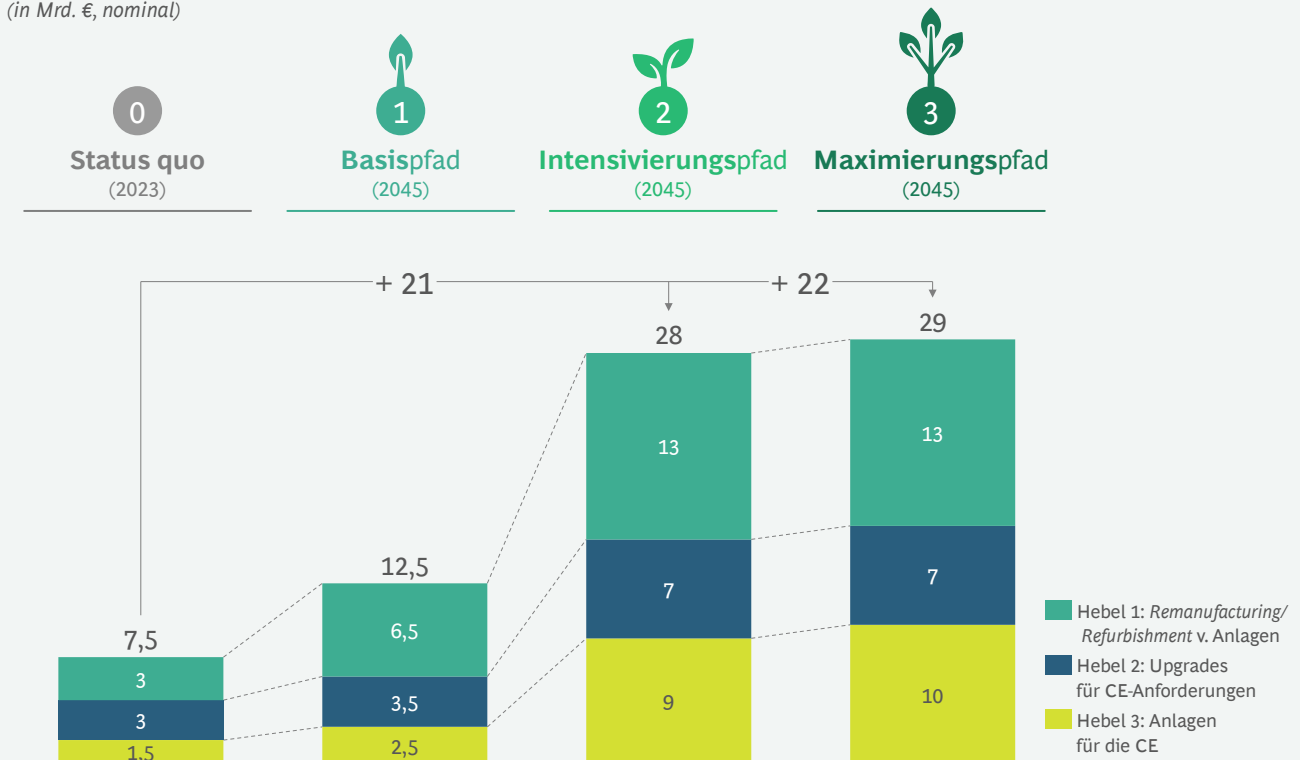
Zusammenfassung: Das Maschinenbausegment könnte durch Kreislaufhebel bis 2045 den jährlichen Umsatz um ca. 30 Mrd. Euro und die deutsche Bruttowertschöpfung um über 20 Mrd. Euro steigern

Die Modellierung zeigt ein deutliches Wachstum der Märkte, die durch Anwendung zirkulärer Hebel erschlossen werden können. Damit steigt auch das Bruttowertschöpfungspotenzial erheblich – um jährlich 21 – 22 Mrd. Euro gegenüber 2023. Getrieben wird dieser Effekt durch die Skalierung von *Remanufacturing*- und *Refurbishment*-Modellen (Hebel 1), die Kommerzialisierung von Software für die Circular Economy (Hebel 2) sowie den Hochlauf von Anlagen für die Circular Economy (Hebel 3). Damit zeigt sich die Circular Economy als wesentliches Wachstumsfeld für den Maschinenbau, das zugleich die zirkuläre Transformation weiterer Segmente ermöglicht.

Starkes Wachstum wäre dabei nicht mit einem proportionalen Anstieg des Materialeinsatzes und der CO₂-Emissionen verbunden. Diese nehmen lediglich in moderatem Umfang zu, primär infolge zusätzlicher Produktionskapazitäten im Rahmen von Hebel 3. Der indirekte Nachhaltigkeitseffekt fällt jedoch deutlich größer aus: Durch höhere Verwertungsquoten, verlängerte Nutzungsdauern sowie den Ersatz primärer Materialien entstehen substanzielle Einsparungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

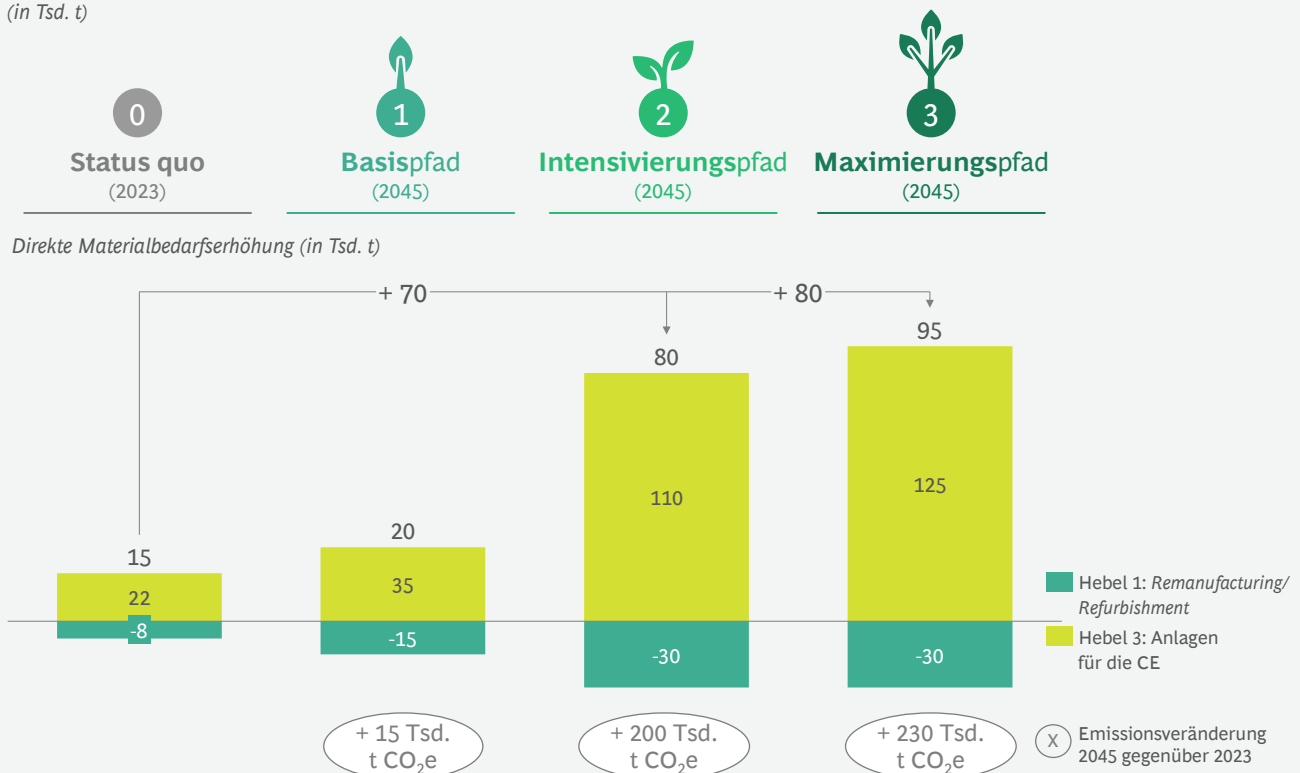
Im Maschinenbausegment können € 21 – 22 Mrd. an zusätzlichem BWS-Potenzial erzielt werden

ABBILDUNG 37 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Kreislaufhebel bis 2045
(in Mrd. €, nominal)



Gesamtheitliche leichte Materialbedarfserhöhung vor allem durch Anlagen für die Circular Economy

ABBILDUNG 38 | Materialbedarfsveränderung in den Pfaden nach Segment bis 2045
(in Tsd. t)



3.4.4 Barrieren: Interne Strukturhemmnisse und externe Unsicherheiten bremsen die Umsetzung zirkulärer Hebel

Bei der Nutzungsdauerverlängerung durch *Remanufacturing* und *Refurbishment* liegen Hemmnisse weniger in externen Vorgaben, sondern primär in strategischen Prioritäten und kulturellen Mustern der Unternehmen. Der Fokus richtet sich weiterhin stark auf Neumaschinen und neue Technologie, sodass *Remanufacturing* und *Refurbishment* häufig als nachrangig betrachtet werden – unabhängig von ihrer technischen Machbarkeit. Zusätzlich wirken strukturelle und regulatorische Faktoren: Abfallrechtliche Vorgaben (etwa zu Rücknahme und Transport¹²²) sowie wenig ausgeprägtes Design for Circularity reduzieren Verfügbarkeiten und erschweren die Wiederaufbereitung. Insgesamt zeigt sich, dass interne Faktoren – darunter auch limitierte Verarbeitungskapazitäten – den Hauptteil der Hemmnisse ausmachen. Verstärkt werden sie durch externe Gegebenheiten wie rechtliche Unsicherheit oder zögerliche Kundenakzeptanz. Der Maschinenbau verfügt technisch bereits über viele Voraussetzungen für zirkuläre Wertschöpfung, ihre Umset-

zung bleibt jedoch nicht selten an strukturellen oder organisatorischen Stolpersteinen hängen.

Hinsichtlich des Wachstums im Bereich Anlagen zur Ermöglichung der Circular Economy bestehen die zentralen Herausforderungen weniger für die Hersteller von Technologie, sondern primär für deren Betreiber. Diese sehen sich für einige Stoffströme mit hohen Betriebskosten, unzureichender Auslastung, einer oftmals schwachen Umsetzung bestehender Vorgaben, geringer Zahlungsbereitschaft sowie unsicheren Absatzmärkten für Rezyklate konfrontiert. Solche Betreiberhürden begrenzen die Nachfrage nach neuen Technologien und haben damit eine unmittelbare Rückwirkung auf die Hersteller – etwa durch verzögerten Markthochlauf, geringere Skaleneffekte und eine insgesamt vorsichtigeren Investitionsbereitschaft. Ergänzend erschweren variierende technologische Reifegrade und die begrenzte Kreislauffähigkeit einzelner Materialströme die wirtschaftliche Einführung neuer Lösungen. Damit bestimmen die Rahmenbedingungen auf Betreiberseite maßgeblich die Geschwindigkeit, mit der Technologien skaliert werden können.

¹²² Die Einstufung als Abfall, insbesondere als Gefahrgut (z. B. aus der EU-Abfallrahmenrichtlinie oder der EU-Abfallverbringungsverordnung), wirkt unmittelbar auf Transport- und Nachweispflichten und kann die Sammlung gebrauchter Komponenten stark erschweren..

Herausforderungen für alle drei Hebel vor allem in begrenzter Verwertbarkeit und unsicheren Absatzmärkten

ABBILDUNG 39 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Maschinenbausegment

	Verfügbarkeit		Verwertung		Nachfrage	
	A) Verlust verwertbarer Abfallströme	B) Begrenzte Kreislauf-verwertbarkeit	C) Limitierte Tech.-Reife u. Verarbeitungskapazitäten	D) Strukturelle Kosten-nachteile	E) Unsichere Absatz-märkte	F) Einge-schränkte Anwendbarkeit
Hebel 1: Remanuf. / Refurbishment	✗	✗	~	○	~	○
Hebel 2: Upgrades für CE-Anforderungen	○	✗	~	○	~	~
Hebel 3: Anlagen für die Circular Economy	~	~	✗	✗	✗	○

✗ Herausforderung trifft zu ○ Keine signifikante Herausforderung ~ Herausforderung trifft selektiv zu, z. B. für bestimmte Stoffströme oder Anwendungsfälle

Quelle: BCG-Analyse

Daraus ergeben sich zentrale Handlungsfelder

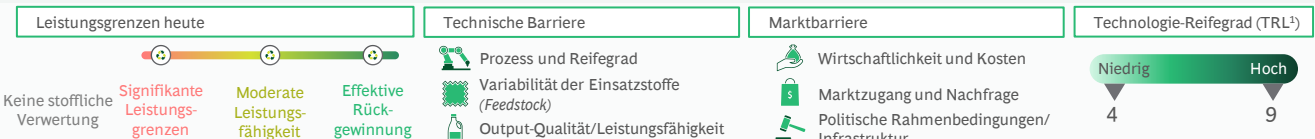
für den Maschinenbau: Zunächst müssen in den Unternehmen selbst Prioritäten und Anreizstrukturen angepasst und zirkuläre Lösungen aktiv im Portfolio verankert werden, was zugleich eine Veränderung der Unternehmenskultur erfordert. Zweitens sind gleichzeitig Incentives für die Wiederverwendung zu entwickeln und regulatorische Hürden abzubauen – insbesondere was Transport- und Rücknahmevorschriften für Komponenten sowie die Anwendung des Stoffrechts bei Anlagen betrifft. Drittens sollten Vorgaben zu digitalen Produktpässen proportional und wirkungsorientiert umgesetzt werden, sodass für Unternehmen ein klarer Nutzen entsteht. Und viertens sind auf der Verwertungsseite eine gezielte Regulierung und Incentivierung zur Etablierung von Märkten, ein verlässlicher Vollzug sowie die Förderung von Technologiereife und Verarbeitungskapazitäten nötig, um die Wirtschaftlichkeit für Betreiber zu erhöhen und damit auch Technologiehersteller zu unterstützen.



Exkurs 7: Recycling- und Sortiertechnologien – heute und in Zukunft

Recycling-Technologien

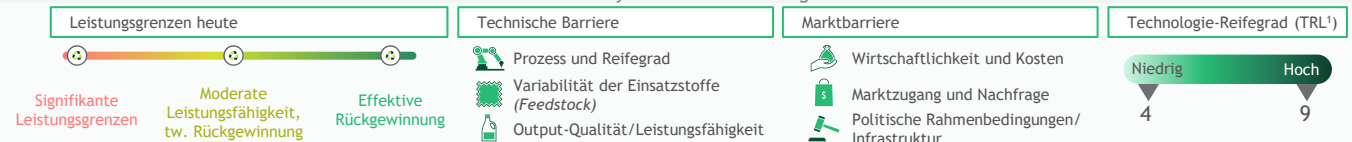
	Heutige Technologie	Aktuelle Leistungsfähigkeit u. Grenzen	Aufkommende Technologie	Beschreibung	Zentrale technische Barriere	Zentrale Marktbarriere	TRL	
Anorganisch								
Beton	Betonabfälle	Brechen und Sieben	Gute Zuschlagstoffrückgewinnung, Restmörtel verschlechtert Qualität	Zementleim-/Mörtelablösung (Paste Liberation)	Mörtelentfernung zur Wiederherstellung der Festigkeit	Mörtelablösung ohne Schädigung der Gesteinskörnung schwierig	Normen beschränken Einsatz von Recycling-Zuschlagstoffen im Tragwerk	5 - 7
	Gemischte Bau- und Abbruchabfälle	Zementöfen/Substitution	Etabliert, aber gemischte Stoffströme reduzieren Prozessgleichmäßigkeit	Erweiterte Trockenaufbereitung (Advanced Dry Recovery)	Sensor- und Luftstromtrennung von Mineralien vor dem Ofen	Heterogene Feinfraktionen reduzieren Effizienz	Hohe Opex bei langen Transportwegen	8
Metalle	Eisen und Edelstahl	EAF und BOF	Hohe Schrottakzeptanz; Cu-/Sn-Verunreinigungen limitieren Yields	Hybride H ₂ -DRI-Konzepte	Kombination aus wasserstoffbasierter DRI und hydrometallurgischer Raffination	Kontinuierliche Schrottreinheitskontrolle erforderlich	Hohe Kosten für Wasserstoff und erneuerbaren Strom	6 - 7
	Aluminium	Pyrometallurgie	Ausgereift; Beschichtungen u. Rückstände senken Yields	Green Leaching (umweltfreundliche Laugung)	Metallgewinnung über umweltverträglichere Laugungs-Chemikalien	Korrosion und Reagenzien-Rückführung erschweren Skalierung	Chemikalien erhöhen Kosten trotz hoher Sekundärpreise	6 - 7
	Kupfer und gemischte NE-Metalle	Pyrometallurgie	Ausgereift; heterog. Einsatzstoffe senken Rückgewinnung	Hybride pyro-/hydrometallurgische Raffination	Kombination aus Schmelzen und hydrometallurgischer Reinigung	Variable Schrottqualität destabilisiert Betrieb	Hohe Investitionen; Erträge stark gehaltsabhängig	8 - 9
	Seltene Erden/Magnete	Hydro- und Pyrometallurgie	Beschichtungen und Oxidation erschweren Magnet-Grade	Direkt-Recycling NdFeB (Short Loop, Magnet-zu-Magnet)	Entmagnetisierung, Pulverisierung (H ₂) und Resinterung zu neuen Magneten	Heterog. Legierungen u. Beschichtgn. erschweren konstante Magneteigensch.	Geringe Rücklaufmengen, hohe Demontage-/Logistikkosten	5 - 6
EV-Batterien	NMC/NCA	Hydro- und Pyrometallurgie	Hohe Metallrückgewinnung; jedoch Lithiumverluste und hoher Chemikalien- und Wasserbedarf	Direkt-Recycling	Regeneration von Kathoden ohne Auflösen	Pack-/Zellheterogenität erschwert konstante Qualität	OEM-Kontrolle limitiert Feedstock-Zugang	6
	LFP		Green Leaching (umweltfreundliche Laugung)	Li-Rückgewinnung mit organischen Säuren	Selektive Lithium-Extraktion weiter anspruchsvoll	Regulat. Druck zur Li-Rückgewinnung, aber hohe Kosten	6	
Organisch (I/II)								
Holz	Clean Timber/Pallets	Mechan. Recycling und Reuse	Reuse bewährt, aber arbeitsintensiv	Lokale Trockenfaseraufbereitung (Local Dry Fiber)	Lokales Zerkleinern, reduzierte Transportwege	Zuverlässigkeit dezentraler Trocknung nicht bewiesen	Niedrige Primärholzpreise untergraben Wirtschaftlichkeit	8
	Holzwerkstoffe (Engineered Wood)	Mechanisches Recycling (limitiert)	Recycling möglich, aber Harze behindern Fasertrennung	Niedrigviskoses Lignin-Öl	Umwandlung von Harzabfällen in Bindemittel	Lösungsmittelkorrosion und -management	Unsichere Nachfrage nach Sekundärbindern; hohe Capex	4 - 5
				Biomasse-Fraktionierung (mit ionischen Liquids)	Trennung von Cellulose, Hemicellulose und Lignin	Wirtschaftl., sichere Lösungsmittelrückgewinn. unbewiesen	Verunreinigter Feedstock limitiert Plattenqualität	6 - 7
	Minderwertiges/kontaminiertes Holz	Verbrennung/Mitverbrennung	Zuverlässige Energienutzung, keine stoffliche Kreislaufführung	Pyrolyse	Umwandlung von Altholz in Bio-Öl	Teerbildung bei Skalierung schwer beherrschbar	Politische Anreize bestimmen Kraftstoffabnahme	8 - 9
				Vergasung	Erzeugung von Synthesegas oder H ₂	Verunreinigung destabilisiert Syngas	Langfrist. Gas-/H₂-Abnahmeverträge	8 - 9
				Aktivkohleherstellung	Umwandlung von Char in Filter-/Adsorptionskohle	Unsichere Skalierung wegen Porenstruktur	Unreife Märkte	4 - 5
Papier	Verpackungspapiere	Mechanisches Faser-Recycling	Faserdegradation über Zyklen	Dry Pulping	Wasserarme, energieeffiziente Aufbereitung	Kürzere oder beschädigte Fasern	Hohe Capex und fehlende Standardisierung	7
	Gemischte u. Verbundpapiere	Hydrapulping	Teilweise/geringe Rückgewinnung, niedrigwertige Reststoffe	Biomasse-Fraktionierung (mit ionischen Liquids)	Auflösung von Cellulose, Lignin, Farben, Beschichtungen	Geschlossener Lösungsmittelkreislauf nicht belegt	Begrenzte Abnahmemärkte für Verbundfraktionen	6 - 7
Ligninbasiertes Repulping				Nutzung von Lignin zur Lockerung und Trennung von Fasern	Inkonsistente Ligninchemie und Prozessintegration	Fehlende Standards behindern Skalierung	8	



1. TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips, 2: Anwendungsbeschreibung, 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit, 4: Versuchsaufbau im Labor, 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung, 6: Prototyp in Einsatzumgebung, 7: Prototyp im Einsatz, 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich, 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

		Heutige Technologie	Aktuelle Leistungsfähigkeit u. Grenzen	Aufkommende Technologie	Beschreibung	Zentrale technische Barriere	Zentrale Marktbarriere	TRL
Organisch (II/II)								
Bio-Abfall	Organische Abfälle	Kompostierung	Bewährt, dominierende organische Abfallbehandlung in Europa	BSF-Biokonversion (Black Soldier Fly)	Insekten wandeln Lebensmittelabfälle in Protein/Kompost um	Biosicherheit und Feuchtekontrolle bleiben komplex	Fehlende Standards, begrenzte Marktstruktur für Kompost	5 - 6
		Anaerobe Vergärung	Bewährt u. skalierbar, aber empfindlich ggü. Einsatz-Variabilität	Enzymatische Fermentation	Umwandlung von Zuckern in Ethanol oder Kompost	Verunreinigungen reduzieren Fermentationserträge	Erlöse abhängig von volatiler Biokraftstoffpolitik	4 - 5
	Feuchte Reststoffe	Anaerobe Vergärung	Effektiv, aber hoher Wassergehalt senkt Yields	Hydrothermale Verflüssigung (HTL)	Umwandlung feuchter Abfälle in Bio-Rohöl	Korrosions- und Fouling-Risiken bei Hochdruckbetrieb	Unsichere Märkte für HTL-Bio-Öl	5 - 6
	Klärschlamm/Rückstände	Anaerobe Vergärung	Komplexe Chemie begrenzt Phosphorrückgewinnung	Mehrstoff-Konversion (Vergasung)	Vergasung v. Schlamm zur Rückgewinnung von H ₂ , C, Phosphor	Pilotierbarkeit und Skalierung nicht nachgewiesen	Unreifer Markt	6 - 7
Synthetisch inkl. natürlicher Fasern								
Textilien	Baumwolle	Mechanisches Recycling	Faserverkürzung und Färbung begrenzen T2T-Recycling	Faserstoff-Recycling (Pulp Recycling)	Auflösung von Baumwolle zu neuer Zellstofffaser	Entfernung v. Farbstoffen u. Erhaltung von Faserlängen weiter anspruchsvoll	Begrenzte Markenakzeptanz und hohe Betriebskosten	5 - 7
	Polyester	Mechanisches Recycling	Technisch recycelbar, aber kein echtes T2T	Chemische Depolymerisation	Spaltung von PET zu neuen Fasern	Additive und Farbstoffe erschweren Reinigung	Bottle-grade rPET verdrängt Textilnachfrage	6 - 7
	Mischgewebe	Mechanisches Recycling	Keine skalierte Trennung, Einsatz in niedrigwertigen Anwend.	Lösungsmittelbasierte Auflösung u. Hydrothermalverfahren	Trennung von Baumwolle und Polyester	Unreife Technologie u. energieintensiver Prozess	Wenige Abnehmer für recycelte Mischgewebe	4 - 5
Kunststoffe	PET-Flaschen	Mechanisches Recycling	Hohe Recyclg.-Quote, aber Additive/Labels senken Reinheit	Chemische Depolymerisation	Spaltung von PET zu Virgin-Monomeren	Aufrechterhaltung d. chemischen Monomerqualität komplex	Hoch energieintensiver Prozess	7 - 8
	HDPE	Mechanisches Recycling	Weit verbreitet, Additive reduzieren Qualität und Wert	Dissolution (lösungsmittelbasierte Auflös.)	Reinigung d. Polymers mit Erhaltung der Polymerintegrität	Lösungsmittelmgmt. im industriellen Maßstab schwierig	Hohe Stückkosten ohne regulatorischen Pull	4 - 5
	LDPE-/LLDPE-Folien		Dünn, verschmutzt, schwer sortier- und recycelbar	Pyrolyse	Umwandlung gemischter Polyolefine in Crack-Feedstock	Additive, Feuchtigkeit u. Mischkunststf. stören Crack-Prozess	Niedrige Yields, instabile Qualitäten	7 - 8
	PP	Mechanisches Recycling	Additive, Pigmente, Gerüche reduzieren Qualität und Wert	Dissolution (lösungsmittelbasierte Auflös.)	Reinigung d. Polymers mit Erhaltung der Polymerintegrität	Lösungsmittelmgmt. im industriellen Maßstab schwierig	Fragmentierte PP-Ströme begrenzen Feedstock-Sicherheit	4 - 5
	PS	Mechanisches Recycling	Häufig geschäumt; erschwert Sortierung, Waschen, Schmelzen	Chemische Depolymerisation	Umwandlung zu Styrol-Monomer	Verunreinigungen limitierend, komplexe Vorbehandlung nötig	Fragmentierter Feedstock und unsichere Nachfrage	6 - 8
	PC	Mechanisches Recycling	Kaum Monomaterial; Blends und Additive senken Qualität	Chemische Depolymerisation	Umwandlung zu BPA- und Carbonat-Zwischenprodukten	Gemischte Ströme und PC/ABS-Blends begrenzen Reinheit	Keine separate Sammlung und begrenzte Nachfrage	6 - 8
	PVC	Mechanisches Recycling und Verbrennung	Chlor u. Additive verursachen Korrosion, erschweren Recycling	Dechlorierung	Entfernung von Chlor für sichereres Recycling	Anlagen- und energieintensiv	Strenge Standards beschränken Einsatz von Recycling-PVC	4 - 5
	PU	Mechanisches Recycling und Glykolyse	Vorwiegend flexible Schäume; Output meist niedrigwertig	Fortgeschrittene PU-Depolymerisation	Spaltung von PU unter Einsatz von Diolen bei hoher Temperatur	Additive und Heteroatome reduzieren Yields	Fragm. Feedstock u. unsichere Nachfrage begrenzen Skalierung	5 - 7
Andere								
Rest-Abf.	Nicht recycelbarer Hausmüll	Mitverbrennung/Deponie	Weit verbreitet, schließt jedoch keine Stoffkreisläufe	Waste-to-H ₂ (Entrained-Flow-Vergasung)	Hochtemperatur-Vergasung zur Erzeugung von Synthesegas u. H ₂	Zusammensetzung von Siedlungsabfällen destabilisiert Betrieb	Hohe Capex und unsichere H ₂ -Abnahmeökonomie	6 - 7
	Rest-Klärschlamm	Mitverbrennung/Deponie	Keine Rückgewinnung von Nährstoffen, insb. Phosphor (P)	Mono-Klärschl.-Verbrennung mit Phosphorrückgew.	Rückgewinnung von P aus Aschen durch separate Verbrennung	Schwankende Aschequalität und Schwermetalle	Düngerecht/Produktzulassung und Abnahme als Engpass	8

Hinweis: Viele Nischen- oder kleinere Materialströme sind in dieser Analyse nicht berücksichtigt

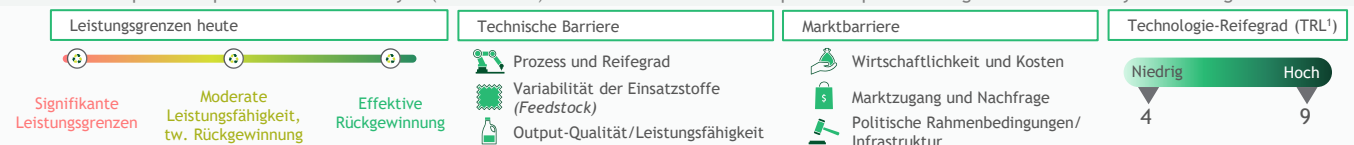


1. TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips, 2: Anwendungsbeschreibung, 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit, 4: Versuchsaufbau im Labor, 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung, 6: Prototyp in Einsatzumgebung, 7: Prototyp im Einsatz, 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich, 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

Sortiertechnologien

		Heutige Technologie	Aktuelle Leistungsfähigkeit u. Grenzen	Aufkommende Technologie	Beschreibung	Zentrale technische Barriere	Zentrale Marktbarriere	TRL
Anorganisch								
Beton	Bewehrter u. gemischter Beton	Siebung/ magnetische Trennung	Effektiv, aber Bewehrungsstahl, Mauerwerk limitieren Genauigkeit	Multisensorik-Sortierung (NIR ¹ + VIS ² + KI)	Verbesserte, sensorbasierte Zuschlags-sortierg.; hochwertige Wiederverwendung	Staub und Partikelgrößenvariationen beeinträchtigen die optische Genauigkeit	Hohe Capex; günstige Primärzuschläge könnten Akzeptanz senken	5 - 7
	Betonfeinfraktionen	Deponierung/ niedrigwertige Nutzung	Zementpaste wird derzeit nicht vom Sand getrennt	Intelligente Zerkleinerung (Smart Crusher)	Selektive Zerkleinerung zur Freisetzung von Zementpaste	Häufige Wechslung von Verschleißteilen, Qualität der Paste variiert	Hohe Instandhaltungskosten; unreifer Markt	7
Metalle	Gemischte Eisen- und NE-Metalle	Magnetische Trennung	Sehr hohe Effizienz bei der Trennung	Komplementäre Tech. NIR ¹ -/LIBS ³ -/XRF ⁴ -Legierungssortierung Dichtemedienflotation-LIBS ³ -XRF ⁴ -Kombination Komplementäre Technologie	Legierungsklassifizierung mittels Laser- und Röntgenverfahren	Beschichtungen und Heterogenität reduzieren Genauigkeit	Marktvolatilität begrenzt Renditen	8 - 9
		Wirbelstromabscheider und tw. manuelle Sortierung	Legierungsmischungen u. Fehlsortierung von Feinfraktionen; gemischter Metall-Output ("Zorba")		Kombination aus Dichte- u. spektroskopischer Sortierung zur Erhöhung der Metallreinheit	Skalierung von Dichtemedien komplex	Fragmentierte Materialquellen	8
EV-Batt.	NMC/NCA/ LFP	Manuelle Demontage u. magnet. Trennung	Gefährlich, langsam und teuer, da Packs nicht standardisiert sind	KI-gestützte Demontage und induktive Sortierung	Chemie-Identifikation durch Roboter; sichere Rückgewinnung der Metalle	Designheterogenität und thermische Risiken begrenzen Automatisierung	OEM-Kontrolle limitiert konsistenten Feedstock-Zugang	5 - 6
Organisch								
Papier u. Holz	Mischfaser-Komposite	Luft-/ ballistische Trennung	Implementiert, kann Papierqualitäten und Lamine jedoch nicht unterscheiden	KI und NIR ¹ -Klassifikation	Erkennung v. Laminen u. Beschichtungen unter kontrollierten Bedingungen durch KI	Genauigkeit sinkt bei Feuchte, hoher Geschwindigkeit oder Verunreinigung	Hohe Capex, begrenzte Preisprämien für hochwertig sortiertes Material	8
	Mixed/ Treated Wood	Manuelle/ NIR-optische Sortierung	Fehlklassifiziert beschichtetes/feuchtes Holz; MDF ungelöst	Röntgen-/XRT ⁵ -Sortierung	Erkennung von Beschichtungen und Harzen über Dichtekontrast	Kalibrierung komplex; Dichte- und Beschichtungsvariabilität	Niedriger Wiederverkaufswert für Sekundärholzfractionen	7
Bio-Abf.	Organischer Haus-/ Lebensmittelabfall	Mechanische Aufbereitung (MBT)	Tw. Kontaminantenentfernung; Restkunststoffe können verbleiben	Enzymatische Vorbehandlung	Beschleunigung der Hydrolyse u. Trennung von Kontaminanten durch Enzyme	Aufrechterhaltung der Enzymaktivität bei variablem pH-Wert und Feuchte	Hohe Prozesskosten; begrenzte Verwertung von Gärresten	5 - 6
Synthetisch inkl. natürlicher Fasern								
Textilien	Baumwolle/ Polyester/ Mischgewebe	Manuelle/ NIR-optische Sortierung (minimal automatisiert)	Skalierbar; aber schlechte Erkennung von beschichteten Textilien und Blends	KI und optische Sortierung (visuell und spektral)	Zuverlässige Identifikation und Sortierung von Textilien mittels KI und NIR	Komplexe spektrale Überlagerungen über Fasern und Farbstoffe	Unreifer EPR-Mechanismus und niedriger Materialwert	6 - 7
Kunststoffe	Gemischte Kunststoffe	NIR-optische Sortierung	Präzise für starre Kunststoffe, limitiert bei Folien, Schwarz und Multilayern	KI-Robotersortierung u. Hyperspektrale Bildgebung	Erkennung von Polymer, Farbe und Morphologie	Hoher Modell-Trainingsaufwand für vielfältige Verpackungsformate	Hohe Capex; ROI abhängig von Verpackungsstandardisierung	6 - 7
		Luft-/ ballistische Trennung	Kosteneffektiv, aber Feuchte reduziert die Leistung	Digitale Wasserzeichen	Ermöglichung von Polymer-Rückverfolgbarkeit durch unsichtbare Codes	Kamerakalibrierung und hochauflösende Bildgebung herausfordernd	Markenakzeptanz erforderlich; globale Vorgaben fehlend	5 - 6
	Auto-kunststoffe	Manuelle Entfernung, Schwimm-Sink-Trennung und NIR	Schlechte Polymer-trennung; viele Kunststoffe werden als ASR deponiert	KI-gestützte Demontage sowie optische und fortgeschrittene Spektroskopie	Identifikation und Trennung von Kunststoff-Untergruppen nach dem Schreddern	Variabilität von Polymeren und Additiven über Fahrzeuge hinweg	Wirtschaftlichkeit unsicher; politischer Push erforderlich	4 - 5

1. Nahinfrarotspektroskopie 2. Sichtlicht-Analyse (VIS-Sensorik) 3. Laserinduzierte Plasmaspektroskopie 4. Röntgenfluoreszenzanalyse 5. Röntgentransmission



1. TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips, 2: Anwendungsbeschreibung, 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit, 4: Versuchsaufbau im Labor, 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung, 6: Prototyp in Einsatzumgebung, 7: Prototyp im Einsatz, 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich, 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

3.5 Bauwesen: Kreislaufhebel zur Steigerung der Materialeffizienz und zum Erhalt der Materialwerte

Zusammenfassung

- Der durchschnittliche Materialeinsatz pro geschaffene Wohnung könnte durch Kreislaufhebel um 2 % sinken, denn durch effiziente Sanierungen im Bestand könnten bis 2045 jährlich **11.000** zusätzliche Wohnungen entstehen – bei nur **1,3 Mio. Tonnen** zusätzlichem Materialbedarf.
- Höhere Recycling-Quoten für Aluminium und Stahl sowie die verstärkte Nutzung von Betonabfällen (Brechsand) in der Zementherstellung könnten die Bruttowertschöpfung um bis zu **2,8 Mrd. Euro** steigern und bis zu **79 Mio. Tonnen Rezyklat** bis 2045 verfügbar machen – was auch zusätzliche CO₂-Einsparungen zur Folge hat.
- Für die Umsetzung sind vor allem eine konsequente und verbesserte Sortierung von Bauabfällen am Abfallentstehungsort sowie eine erhöhte Transparenz hinsichtlich der verbauten Materialien erforderlich.

3.5.1 Kontext: Investitionsbedingte Wachstumsimpulse und bestehende zirkuläre Strukturen prägen das Bausegment

Das Bauwesen¹²³ weist einen hohen absoluten Materialbedarf auf und trägt damit wesentlich zur rohstoffbezogenen Ausgangslage Deutschlands bei. Das Segment erwirtschaftete 2023 eine Bruttowertschöpfung von 181 Mrd. Euro und bildet die physische Grundlage für Wohnen, Mobilität, öffentliche Versorgung und wirtschaftliche Aktivität.¹²⁴ Die Wertschöpfung¹²⁵ konzentriert sich dabei im Kern auf den Hochbau (26 Mrd. Euro¹²⁵), den Tiefbau (24 Mrd. Euro¹²⁶), die Baustellenarbeit und Bauinstallation (117 Mrd. Euro¹²⁷) sowie die Baustoffindustrie (14 Mrd. Euro¹²⁸). Die gesamtwirtschaftliche Bedeutung des Bauwesens reicht jedoch weit über diese Kennzahlen hinaus, da der Bau von Infrastruktur und

Wohngebäuden ein systemkritischer Bestandteil der nationalen Transformationspfade ist. Der jährliche Materialbedarf¹²⁹ beträgt ca. 521 Mio. Tonnen¹³⁰ und umfasst vor allem große Mengen mineralischer Primärrohstoffe (z. B. Sand und Kies). Das Segment hat zudem einen hohen Anteil am deutschen Abfallaufkommen und ist zugleich aufgrund erheblicher Emissionen aus der Primärproduktion von Zement und Stahl von hoher Relevanz für die nationale CO₂-Bilanz. Die meisten Materialtransporte erfolgen innerhalb Deutschlands, Abhängigkeiten von Importen oder Exporten spielen daher im Vergleich zu anderen Segmenten eine geringere Rolle.

Aufgrund seines hohen absoluten Materialeinsatzes ist das Bauwesen eng in bestehende Stoffstromkreisläufe eingebunden. Das Bausegment stellt bereits heute einen wesentlichen Absatzmarkt für mineralische Rohstoffe der Circular Economy dar. Zugleich fällt in der Bauwirtschaft wie erwähnt ein erheblicher Anteil des mineralischen Abfallaufkommens an, der – soweit technisch und regulatorisch möglich – auf etablierten Verwertungswegen genutzt wird und zu hohen absoluten Verwertungsmengen beiträgt. Die hohe Lebensdauer von Gebäuden und Verkehrsbauwerken verleiht dem Segment zusätzliche strukturelle Bedeutung, da Entscheidungen zu Bauweisen, Materialstandards und Technologien den zukünftigen Ressourcenbedarf, die Emissionsentwicklung sowie realisierbare Effizienz- und Kreislaufpotenziale langfristig bestimmen.

Das Sondervermögen für Infrastruktur und Klimaneutralität erhöht die Bedeutung ressourceneffizienter Bau- und Materialkonzepte und bietet die Chance, bestehende zirkuläre Wertschöpfungsansätze langfristig zu verankern. Die im Jahr 2025 beschlossenen Investitionsmittel von 500 Mrd. Euro sollen über mehrere Jahre substanzielle Impulse für Verkehr, Gebäude sowie Energie- und Digitalinfrastruktur setzen. Damit zielen sie darauf ab, zusätzliche wirtschaftliche Dynamik im Bau- und Infrastruktursektor zu entfalten.¹³¹ Dies gilt auch für den Wohnungsbau, der trotz ambitionierter politischer Zielsetzungen – etwa des früher ausgegebenen Ziels von jährlich 400.000 neuen Wohnungen – hinter den angestrebten Fertigungszahlen zurückbleibt. Ergänzend soll ein geplantes Infrastruktur-Zukunftsgesetz durch schnell-

¹²³ In dieser Studie wird unter Bauwesen/Bausegment die Bauwirtschaft (Hoch- und Tiefbau, einschließlich Baustellenarbeit und Bauinstallation) sowie die zugehörige Baustoffindustrie verstanden.

¹²⁴ Energieinfrastruktur wird in diesem Kapitel explizit nicht betrachtet; eine vertiefte Betrachtung und Analyse erfolgt in Kapitel 3.6.

¹²⁵ Wirtschaftszweig: WZ08-41, vgl. Destatis (2023b).

¹²⁶ Wirtschaftszweig: WZ08-42, vgl. Destatis (2023b).

¹²⁷ Wirtschaftszweig: WZ08-43, vgl. Destatis (2023b).

¹²⁸ Wirtschaftszweige: WZ08-233; -235; -236; -237; -239, vgl. Destatis (2023b).

¹²⁹ Im Sinne von Materialverbrauch (= direkter Materialeinsatz minus Exporte).

¹³⁰ BCG-Analyse auf Basis von Eurostat (2025a).

¹³¹ Bundesministerium der Finanzen (2026). Um langfristige Planungssicherheit für die Bauwirtschaft zu gewährleisten, bleibt es wichtig, die Substitution/Verdrängung regulärer Haushaltsmittel zu verhindern und frühzeitig eine Verstetigung der Investitionsfinanzierung über das Auslaufen des Sondervermögens hinaus sicherzustellen.

lere Genehmigungsverfahren und digitalisierte Planungsprozesse die Umsetzung dieser Investitionen unterstützen.¹³² Diese Rahmenbedingungen bestimmen für die kommenden Dekaden maßgeblich sowohl den Materialeinsatz als auch die Erneuerungs- und Sanierungsbedarfe (bzw. -möglichkeiten) sowie die damit verbundenen Emissionen und Stoffströme im Bausegment.¹³³

3.5.2 Status quo: Hohe Material- und Abfallströme in Kombination mit hohen Verwertungsquoten

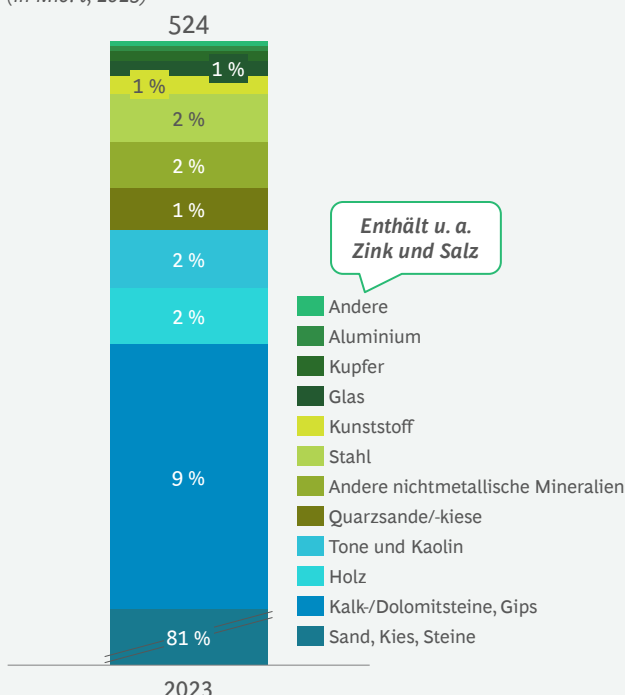
Segment auf einen Blick

	Bruttowertschöpfung	11 % der BWS der deutschen Industrie
	CO₂e-Emissionen	~ 65 Mio. t CO ₂ e (~ 7% der Emissionen in DE)
	Verwertungsquote mineralischer Bauabfälle	90,4 % wurden umweltverträglich verwertet

Sand und Kies stellen über 80 % des Materialbedarfs im Bausegment

ABBILDUNG 40 | Materialbedarf im Bausegment

Materialbedarf
(in Mio. t, 2023)



Quelle: Eurostat; DERA

Aufgrund seines hohen Anteils an Materialeinsatz, Abfallaufkommen und emissionsintensiver Baustoffherstellung ist das Bausegment ein zentraler Betrachtungsgegenstand der Circular

Economy: Mit ca. 50 % des massebezogenen Rohstoffbedarfs entfällt der größte Teil des nationalen Materialeinsatzes auf Bauaktivitäten im Hochbau und Tiefbau. Entsprechend entsteht auch der größte Anteil des mineralischen Abfallaufkommens im Zusammenhang mit Bau-, Rückbau- und Erdarbeiten.¹³⁴ Die Baustoffindustrie (als Teil des Bausegments) ist außerdem für einen substanziellen Anteil der nationalen Treibhausgasemissionen verantwortlich, insbesondere über die Herstellung zentraler Baustoffe wie Zement und Stahl. Je nach Systemgrenze entfallen etwa 7 % der deutschen Treibhausgasemissionen auf die Herstellung (inkl. Baustoffproduktion), Errichtung und Modernisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden.¹³⁵ Daneben gehört das Bausegment mit ca. 11 % der Bruttowertschöpfung der deutschen Industrie und über 2,5 Mio. Beschäftigten zu den wichtigsten und arbeitsintensivsten Wirtschaftssektoren Deutschlands.¹³⁶

Materialeinsatz und Abfallaufkommen umfassen vor allem Boden und Steine. Insgesamt entfielen

2023 ca. 524 Mio. Tonnen Materialbedarf auf das Segment¹³⁷, dominierend waren Sand und Kies sowie weitere mineralische Rohstoffe wie Kalkstein und Gips (insgesamt 497 Mio. Tonnen). Weitere Materialien wie Metalle (insb. Stahl, Aluminium und Kupfer, 11 Mio. Tonnen), Holz (10 Mio. Tonnen), Glas (3 Mio. Tonnen) und Kunststoffe (3 Mio. Tonnen) spielen trotz geringerer Mengen eine wichtige Rolle für hochwertige Kreisläufe (Abbildung 40). Daneben wurden 2022 etwa 208 Mio. Tonnen mineralische Bauabfälle erfasst, die sich überwiegend aus Boden und Steinen sowie aus weiteren mineralischen Abfällen aus Bau-, Umbau- und Erhaltungsmaßnahmen wie Bauschutt und Straßenaufbruch zusammensetzten.¹³⁸

Die Verwertung mineralischer Bauabfälle erfolgt über verschiedene Pfade, die sich je nach Materialfraktion und Anwendung unterscheiden. Insgesamt liegt die heutige Verwertungsquote bei ca. 90 %. Dieser hohe Anteil kommt vor allem dadurch zustande, dass der größte Teil des Abfallaufkommens aus Boden und Steinen besteht, die überwiegend direkt verwertet werden, etwa im Rahmen von Verfüllmaßnahmen im überflüssigen Bergbau oder im Deponeibau. In Summe machte die „sonstige Verwertung“

¹³² Bundesregierung (2025).

¹³³ Dehio et al. (2025).

¹³⁴ Fraunhofer (2024).

¹³⁵ Bezieht sich auf Baustoffindustrie, Bauwirtschaft und Lieferketten weiterer Zulieferer, inklusive direkter Emissionen der Bauwirtschaft, vgl. BBSR (2020).

¹³⁶ Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (2026).

¹³⁷ BCG-Analyse auf Basis von Eurostat (2025a).

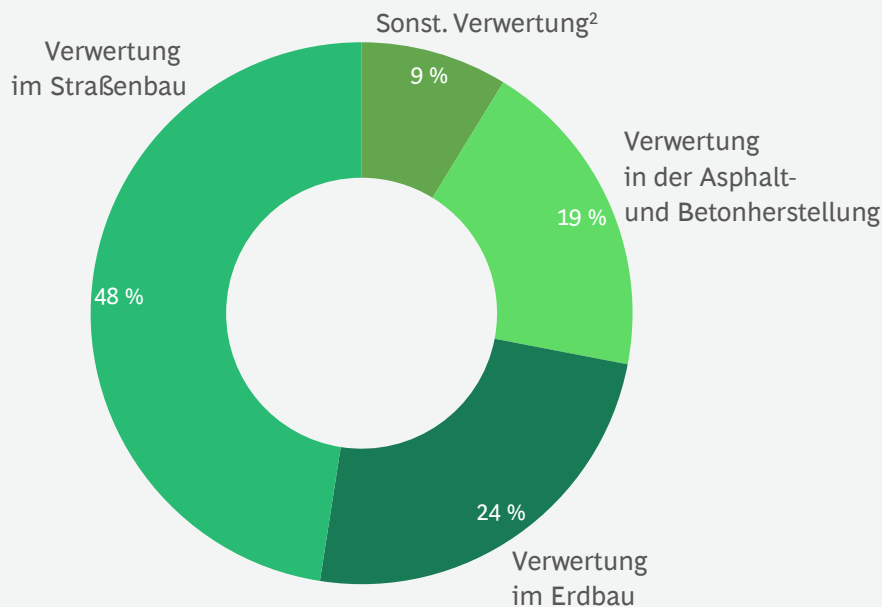
¹³⁸ Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (2024).

Ein Großteil der Recycling-Baustoffe kommt im Tiefbau zum Einsatz

ABBILDUNG 41 | Verwertung Recycling-Baustoffe¹

Verwertung

(in %, 2022, Recycling-Baustoffe insgesamt: 75 Mio. t)



1. Als Recycling-Baustoffe werden Gesteinskörnungen bezeichnet, die durch Aufbereitung mineralischer Bauabfälle hergestellt werden 2. Anwendung überwiegend im Deponiebau
Quelle: Kreislaufwirtschaft Bau, Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2022

in Verfüllmaßnahmen oder im Deponiebau im Jahr 2022 etwa 54 % der Verwertungswege des mineralischen Abfallaufkommens aus. Andere mineralische Abfallfraktionen, insbesondere Bauschutt und Straßenabruch, werden in größerem Umfang aufbereitet und zu Recycling-Baustoffen verarbeitet. Die Verwertung der Recycling-Baustoffe (siehe Abbildung 41) belief sich 2022 auf etwa 75 Mio. Tonnen (ca. 36 % des mineralischen Abfallaufkommens). Diese Recycling-Baustoffe dienen als Substitute für Gesteinskörnungen und werden überwiegend im Straßenbau (48 %) und Erdbau (24 %), aber auch in der Asphalt- und Betonherstellung verwendet (19 %).¹³⁹ Eine aufkommende Verwertungsmöglichkeit ist dabei der Einsatz von Brechsand aus Betonabfall in der Zementherstellung.¹⁴⁰ Dieser Einsatz kann zur Reduktion des Klinkerfaktors um bis zu 20 %¹⁴¹ beitragen und damit unmittelbar den CO₂-Fußabdruck der Zementproduktion senken.

Bei Betrachtung der im Jahr 2022 benötigten Gesteinskörnungen wird allerdings auch deutlich, dass heute nur etwa 13 % des Bedarfs durch Recycling-Materialien

gedeckt werden und damit auch bei insgesamt hoher Verwertungsquote der Einsatz von Primärrohstoffen bestimmend bleibt.¹⁴²

Die heutigen Strukturen der Verwertung sind das Ergebnis technischer, regulatorischer und marktlicher Rahmenbedingungen, die den Einsatz mineralischer Rohstoffe der Circular Economy steuern. Maßgeblich sind dabei insbesondere bautechnische Anforderungen an Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Qualität, umweltbezogene Vorgaben zum Schutz von Boden und Grundwasser sowie die Einhaltung geltender Regelwerke (z. B. die Ersatzbaustoffverordnung) für den Einsatz in technischen Bauwerken. Gleichzeitig wirken eine absehbar hohe Bautätigkeit, unter anderem im Wohnungsbau, sowie ein erheblicher Erhaltungs- und Modernisierungsbedarf der Infrastruktur auf Materialmärkte und Baustoffversorgung. In diesem Zusammenhang können bereits heute Engpässe bei der Bereitstellung von Sand und Kies oder anderen mineralischen Rohstoffen auftreten, die vor allem auf langwierige Genehmigungsverfahren und

¹³⁹ Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (2024).

¹⁴⁰ VDZ (2022).

¹⁴¹ Höffgen et al. (2022).

¹⁴² Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (2024).

fehlende Abbaulizenzen zurückzuführen sind.¹⁴³ Vor diesem Hintergrund wird die Verwertung von Bauabfällen als eine Alternative betrachtet, deren Einsatz nicht isoliert, sondern unter Berücksichtigung von technischer Eignung, rechtlichen Anforderungen und regionaler Verfügbarkeit erfolgen muss.

3.5.3 Potenzial: Effizienter Ressourceneinsatz im Wohnungsbau und Ausbau des Baustoff-Recyclings

Die zwei identifizierten Kreislaufhebel zielen auf eine effizientere Ressourcennutzung (Hebel 1) sowie auf einen Ausbau des Baustoff-Recyclings ab (Hebel 2). Das vorangegangene Kapitel hat gezeigt, dass die Verwertung mineralischer Bauabfälle bereits heute in hohem Maße etabliert ist und mit Verwertungsquoten von ca. 90 % ausgeprägte zirkuläre Strukturen aufweist, insbesondere durch Verfüllung von Bodenaushub und den Einsatz von Rezyklaten im Tiefbau. Gleichzeitig ist das Bauwesen durch eine hohe Lebensdauer von Bauwerken und Anlagen gekennzeichnet, wodurch Materialströme langfristig gebun-

den werden. Kreislaufhebel, die auf grundlegende Veränderungen von Bauweisen abzielen – etwa mit Blick auf eine spätere Wiederverwendung von Bauteilen –, entfalten ihre Wirkung überwiegend langfristig und werden bis 2045 voraussichtlich nicht in vollem Umfang wirksam; sie werden daher im Folgenden nicht betrachtet. Vor diesem Hintergrund und in Anbetracht der hohen Verwertungsquote im Tiefbau fokussieren die im Weiteren dargestellten Kreislaufhebel vor allem eine effizientere Ressourcennutzung im Hochbau sowie eine Ausweitung des Baustoff-Recyclings, insbesondere durch verbesserte Sortierung und technologische Fortschritte in der Aufbereitung. Hebel 1 adressiert die Wohnungsknappheit durch materialeffizientere Bereitstellung von Wohnraum und den verstärkten Einsatz von Sanierungsmaßnahmen, während Hebel 2 zusätzliche Potenziale im Baustoff-Recycling beschreibt.

¹⁴³ BGR und DERA (2020).

TABELLE 3 | Übersicht potenzieller Kreislaufhebel im Bereich Bauwesen

#	Hebel	Beschreibung
1	Sanierung von Wohnungen	Sanierungsarbeiten bei bisherigem Leerstand zur Steigerung der Wohnungsverfügbarkeit als materialeffiziente Maßnahme zur Bereitstellung von Wohnraum
2	Steigerung der Recycling-Volumina von Baustoffen	Erhöhung der Baustoff-Recycling-Volumina durch verbesserte Sortierung sowie technologischen Fortschritt in der Verarbeitung
3	Bau kleinerer Wohnungen	Neubauwohnungen mit geringerer durchschnittlicher Größe zur materialeffizienten Bereitstellung einer höheren Anzahl an Wohnungen (bei Annahme gleicher verfügbarer Fläche). <i>Grund zur Depriorisierung: Greift tief in etablierte Wohngewohnheiten ein und setzt eine verhaltensbezogene Anpassung der Wohnungsnachfrage voraus.</i>
4	Ausbau von Co-Working-Spaces	<i>Grund zur Depriorisierung: Hebel könnte zu einem Rückgang des Neubaus führen, mit dem Ergebnis einer signifikanten Bruttowertschöpfungsreduktion.</i>
5	Wiederverwendung von Bauteilen	<i>Grund zur Depriorisierung: Hohe Kannibalisierung der deutschen Primärproduktion bei vergleichsweise geringen Importen und damit Bruttowertschöpfungs-negativ (Substitution vor allem inländischer und nicht ausländischer Wertschöpfung); bei historischen Bauweisen schwer realisierbar und Hebeleffekt bis 2045 kaum wirksam, da die Lebensdauer der heute neu errichteten Gebäude über diesen Zeitraum hinausreicht.</i>
6	Einsatz von Fertigbauhäusern	<i>Grund zur Depriorisierung: Größter Nutzen des Hebels – eine vereinfachte Dekonstruktion und mögliche Wiederverwendung der Bauteile – bis 2045 kaum wirksam, da die Lebensdauer der heute neu errichteten Gebäude über diesen Zeitraum hinausreicht.</i>
7	Einsatz naturbasierter/regenerativer Materialien	<i>Grund zur Depriorisierung: Einsatz regenerativer Materialien kannibalisiert bestehende Industrien (z. B. Beton und Stahl) und hat damit volkswirtschaftlich einen Bruttowertschöpfungs-negativen Effekt.</i>

Sanierung im Bestand erschließt das größte Potenzial für materialeffiziente Bereitstellung von Wohnraum

Sanierung stellt einen zentralen Hebel zur Steigerung der Materialeffizienz im Wohnungsbau dar und hat bereits heute große Bedeutung. Eine umfassende Sanierung benötigt im Durchschnitt ca. 42 % des Materials eines vergleichbaren Neubaus, was absolut etwa einem Materialbedarf von 114 Tonnen für eine durchschnittliche Wohnung entspricht.¹⁴⁴ Dadurch ließen sich im Intensivierungspfad jährlich knapp 11.000 zusätzliche Wohnungen schaffen¹⁴⁵ (zum Vergleich: heute insgesamt ca. 295.000 Wohnungen pro Jahr aus Sanierung und Neubau, wovon ca. 32.000 auf Sanierungen entfallen¹⁴⁶). Durch die 11.000 zusätzlichen Wohnungen entstünde ein jährlich hinzukom-

mender Materialeinsatz von ca. 1,3 Mio. Tonnen. Durch die Erhöhung des Sanierungsanteils bei der Schaffung **neuen Wohnraums** könnte der durchschnittliche Materialeinsatz je **zusätzliche Wohnung** bis 2045 um 2 % reduziert werden. In Summe bedeutet dieser Hebel aber nicht nur eine Erhöhung der Materialeffizienz, sondern auch ein gesteigertes Bruttowertschöpfungspotenzial im Jahr 2045: Durch die erhöhte Bauaktivität und den erhöhten absoluten Materialeinsatz würde sich im Intensivierungspfad ein zusätzliches Bruttowertschöpfungspotenzial von 3,5 Mrd. Euro im Jahr 2045 ergeben (im Vergleich zum heutigen Niveau).

Im Maximierungspfad wird dieser Ansatz zusätzlich ausgeweitet: Rund 30 % des jährlichen Gebäudeabrisses in Deutschland gehen auf technische Mängel wie Brandschutzdefizite oder veraltete Tragstrukturen

¹⁴⁴ Bei Annahme von 273 Tonnen Materialeinsatz für den Neubau einer durchschnittlichen Wohnung von 100 qm, vgl. DGNB (2025).

¹⁴⁵ Im städtischen Raum (große kreisfreie Großstädte, kleine und mittlere kreisfreie Großstädte, städtische Kreise) stehen derzeit ca. 700 Tsd. Wohnungen seit mehr als zwölf Monaten leer; im ländlichen Raum (ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen, dünn besiedelte ländliche Kreise) ca. 350 Tsd. Kreise mit erhöhten Leerstandsquoten bei gleichzeitig wachsender Bevölkerungsdynamik finden sich nicht nur in städtischen Gebieten, sondern vor allem in Westdeutschland auch in ländlichen Regionen, vgl. BBSR (2024) auf Basis von Zensusdaten. Im Intensivierungspfad wird davon ausgegangen, dass bis 2045 etwa 380 Tsd. der 1,1 Mio. über zwölf Monate lang leerstehenden Wohnungen durch Sanierung wieder bewohnbar gemacht werden können, ohne Neubau zu verdrängen.

¹⁴⁶ Destatis (2026a).

¹⁴⁷ Fraunhofer ISI, FU Berlin und Öko-Institut (2023).

HEBEL 1 | Sanierung von Wohnungen



zurück, die durch gezielte Nachrüstung behoben werden könnten.¹⁴⁷ In der Praxis ist die Ertüchtigung dieser Bauteile jedoch häufig mit hohen Kosten verbunden, sodass die Sanierungskosten das Niveau eines Neubaus erreichen oder sogar überschreiten können. Daher wird dieses Ausmaß an Bestandserhaltung ausschließlich im Maximierungspfad berücksichtigt. Durch entsprechende Sanierungsmaßnahmen könnten mit einem zusätzlichen Materialeinsatz von ca. 650.000 Tonnen pro Jahr etwa 6.000 weitere Wohnungen erhalten werden – zusätzlich zu den im Intensivierungspfad beschriebenen 11.000 Wohnungen. Dies entspricht zusammen ca. 6 % der fertiggestellten Wohnungen im Jahr 2023 – bei einem zusätzlichen Materialbedarf von jährlich nur 1,9 Mio. Tonnen (entspricht 2,5 % des Gesamtmaterialbedarfs im Wohnungsbau im Jahr 2023). Die zusätzliche Aktivität im Bausegment könnte einen Bruttowertschöpfungszuwachs von ca. 4,2 Mrd. Euro ermöglichen (Maximierungspfad im Vergleich zum heutigen Niveau). Insgesamt wird so ein Wohnraumausbau erreicht, der sowohl den Ressourcenbedarf als auch die „*embodied emissions*“ relativ reduziert.

Exkurs 8: Bau kleinerer Wohnungen – ein Gedankenexperiment

Der Bau kleinerer Wohnungen¹⁴⁸ würde es ermöglichen, bei gleichbleibender Gesamtwohnfläche mehr Wohnungen zur Verfügung zu stellen und Material damit noch effizienter einzusetzen.

Heute beträgt die durchschnittliche Wohnfläche neu fertiggestellter Wohnungen knapp 100 m².¹⁴⁹ Bei geringeren durchschnittlichen Wohnungsgrößen im Neubau könnten bei gleicher Gesamtfläche entsprechend mehr Wohneinheiten realisiert werden. Eine Reduktion der Wohnungsgröße um 10 % entspräche ca. 33.000 zusätzlichen Wohnungen – also 327.000 statt 294.000 Einheiten im Jahr 2045. Unter Annahme einer Erhöhung des relativen Materialbedarfs je Quadratmeter (hier angenommen: +0,25 % infolge zusätzlicher Innenwände, Küchen oder Sanitärbereiche) ergäbe sich ein zusätzlicher Materialbedarf von ca. 2 Mio. Tonnen im Jahr 2045. Der durchschnittliche Materialeinsatz pro geschaffene Wohnung würde dadurch im Jahr 2045 um 7 % sinken.¹⁵⁰ Zusätzlich dazu könnte durch den erhöhten Materialeinsatz eine Bruttowert-

schöpfung von 3,1 Mrd. Euro im Jahr 2045 (Maximierungspfad) erreicht werden. Der Bau kleinerer Wohnungen könnte einerseits vom Staat als Auftraggeber für die von ihm vergebenen Bauvolumina unmittelbar umgesetzt werden, andererseits bestünde die Möglichkeit, den Bau kleinerer Wohneinheiten in der Privatwirtschaft durch geeignete Anreiz- oder Förderinstrumente zu unterstützen und damit Angebots- und Nachfrageentscheidungen indirekt zu beeinflussen. Beim Bau kleinerer Wohnungen liegen die zentralen Herausforderungen weniger in der baulichen Realisierbarkeit als vielmehr in gesellschaftlich verankerten Wohnstandards sowie in planerischen und regulatorischen Rahmenbedingungen. Da dieser Ansatz tief in etablierte Wohngewohnheiten eingreift und eine verhaltensbezogene Anpassung der Wohnungsnachfrage voraussetzt, wird er im Rahmen dieser Studie keinem der betrachteten Pfade zugeordnet – wenngleich darauf hingewiesen wird, dass hierdurch eine Steigerung der deutschen Bruttowertschöpfung möglich wäre.

¹⁴⁸ Umfasst ebenso Einfamilienhäuser oder Einzimmerapartments.

¹⁴⁹ Destatis (2026a).

¹⁵⁰ Hier wird eine isolierte Betrachtung des Baus kleinerer Wohnungen angenommen, die erhöhte Materialeffizienz durch Hebel 1 ist nicht berücksichtigt.

Anpassung der Rahmenbedingungen je Materialfraktion, um den verbleibenden Bau- und Abbruchabfall möglichst vollständig zu verwerten

HEBEL 2 | Steigerung der Recycling-Volumina von Baustoffen



Im Fokus stehen Materialgruppen, die mengen- oder wertmäßig einen signifikanten Anteil an Bau- und Abbruchabfällen ausmachen.

Beton, Stahl, Aluminium, Glas, Holz und Kunststoffe prägen die Primärrohstoffabhängigkeit des Sektors und bestimmen maßgeblich seinen CO₂-Fußabdruck. Je nach Materialfraktion bestehen unterschiedliche Herausforderungen: Bei Beton erschweren beispielsweise Schadstoffbelastungen einen höheren Verwertungsanteil, während bei anderen Fraktionen vor allem unzureichende Sortierung und mangelnde Sortenreinheit problematisch sind. Aufs Ganze gesehen, ist die heutige Sortierquote bereits hoch; sie muss aufgrund der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) bei Betreibern von Vorbehandlungsanlagen mindestens 85 % erreichen. Im Folgenden wird eine moderate Verbesserung der Sortiertechnologie bis 2045 angenommen, die in höherer Verwertbarkeit von Baustoffen resultiert.

Die heutigen Recycling-Quoten sind hoch, im Intensivierungspfad können in ausgewählten Stoffströmen jedoch zusätzliche Potenziale erschlossen werden. Bereits ca. 94 % der Aluminium- und Stahlabfälle werden in Kreisläufen

geführt.^{151,152,153} Durch bessere Sortierung könnte im Intensivierungspfad ein zusätzliches Potenzial von 4 Prozentpunkten realisiert werden, dies entspricht knapp 300.000 Tonnen im Jahr 2045 (Intensivierungspfad vs. Basispfad). Als mengenmäßig zweitgrößter Abfallstrom steht Beton häufig im Mittelpunkt der Debatten rund um Baustoff-Recycling. Beinahe 95 % der Beton-Bauabfälle werden als Recycling-Gesteinskörnung in Straßenbau, Erdbau oder Asphaltherstellung eingesetzt, während 5 % deponiert werden. Ein erhöhtes Kreislauf- und Dekarbonisierungspotenzial besteht insbesondere darin, dass Zementsteinreste bzw. Betonbrechsand als Klinkerersatz in der Zementproduktion dienen können. Dieser Ansatz wird bereits in begrenztem Umfang umgesetzt und dürfte bis 2045 zunehmend an wirtschaftlicher Attraktivität gewinnen, da CO₂-intensiver Primärklinker infolge steigender ETS-Bepreisung teurer wird und perspektivisch über den Kosten von Recycling-Material liegen könnte. Bei Ausschöpfung der chemisch maximal möglichen Zuzuschungsquote könnten knapp 6 % des Betonabfalls in der Zementherstellung eingesetzt werden (entspricht Annahmen im Intensivierungspfad).

¹⁵¹ EAA und TU Delft (2022).

¹⁵² Cristobal Garcia et al. (2024).

¹⁵³ Bergische Universität Wuppertal (2023).

Case-Study 6: Heidelberg – von der Deponie zu neuen Kreisläufen durch Brechsand in der Zementproduktion

Trotz hoher Recycling-Quoten von Bauabfällen bleibt die Zementproduktion Emissionstreiber in Betonkreisläufen.

Bauabfälle stellen den mit Abstand größten Abfallstrom in Deutschland dar (ca. 198 Mio. Tonnen im Jahr 2023), wobei schon heute weite Teile recycelt werden und im Straßenbau oder bei Erdarbeiten Anwendung finden. Gleichzeitig werden, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, weniger als 1 % der Betonabfälle erneut in der Beton- und Zementherstellung verwendet. Dabei kommt gerade in der für Beton essenziellen Zementproduktion CO₂-intensiver Klinker zum Einsatz, was Potenzial zur Emissionsreduktion erkennen lässt. Eine neue Initiative von Heidelberg Materials zeigt, wie durch Einsatz von Brechsand in der Betonproduktion sowohl Kosten als auch Emissionen gesenkt werden können.

Durch den neuen Ansatz kann Brechsand als Rezyklat verwendet werden. Ein bestehender Kreislauf wird dadurch ergänzt. Bei der Aufbereitung von Abbruchbeton mit Hilfe von Brechern entstehen einerseits Recycling-Körnungen sowie andererseits Brechsand als Nebenprodukt. Während die groben

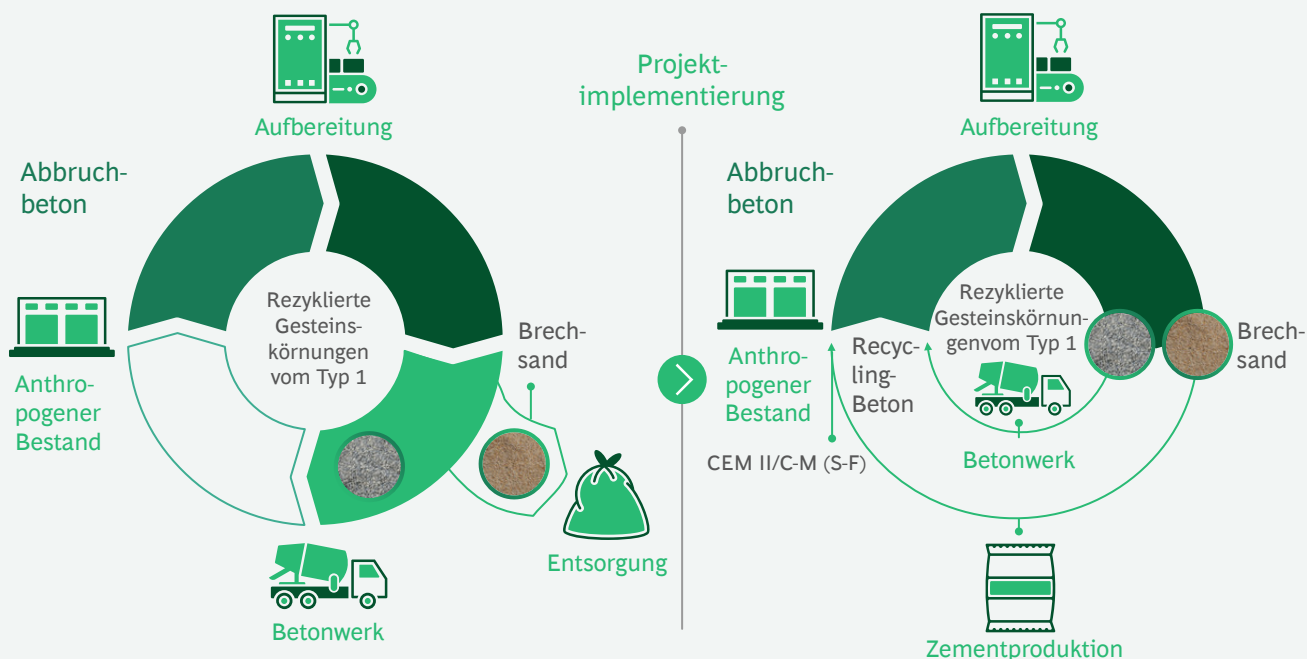
Körnungen heute bereits stofflich genutzt werden, wird Brechsand bislang überwiegend entsorgt, was weitere Deponierungskosten nach sich zieht. Hier setzt Heidelberg Materials am Standort Leimen an: Die Nutzung von Brechsand für die Produktion von F-Zementen (z. B. CEM II/C-M [S-F]) macht es möglich, diesen Stoffstrom industriell zu verwerten. Damit kommt ein weiterer Kreislauf zu einem bereits bestehenden System hinzu: Abgebrochener Beton wird aufbereitet, der enthaltene Brechsand fließt direkt in die Zementproduktion zurück und kann anschließend erneut im Beton eingesetzt werden.

Der Einsatz von Brechsand in F-Zementen kann sowohl Kosten als auch Emissionen einsparen:

Einerseits werden Deponierungskosten vermieden und die Materialeffizienz gesteigert, was zugleich zu Kostensenkungen führt. Andererseits ermöglicht der Ansatz eine Reduktion des Klinkeranteils in der Produktion auf ca. 50 %, wodurch die CO₂-Emissionen pro Tonne Zement von ca. 480 kg (werksbezogener Durchschnitt des Zementportfolios) auf ca. 400 kg gesenkt werden können. Allein im Jahr 2025 konnte dadurch

Durch die Verwertung von Brechsanden in F-Zementen können weitere Kreisläufe geschaffen werden

ABBILDUNG 42 | Recycling-Prozess von Abbruchbeton vor und nach Projektimplementierung



Quelle: Heidelberg Materials

bereits der spezifische CO₂-Fußabdruck des gesamten Werksportfolios um 3,6 % reduziert werden. Die technisch notwendigen Investitionen sind geplant und sollen zeitnah erfolgen, sodass eine umfassende Portfolioverschiebung hin zu klinkereffizienten Zementen mit Brechsand ermöglicht wird. Auf diese Weise wird eine kontinuierliche Reduktion der CO₂-Gesamtemissionen des Werks auch über die nächsten Jahre erreicht. Zudem lässt sich das erprobte technische Konzept auch auf weitere Standorte übertragen, insbesondere auf Mahlwerke.

Der Ansatz von Heidelberg Materials zeigt, dass auch bestehende Kreisläufe Ansatzpunkte für weitere Effizienzsteigerungen bieten können. Am Beispiel des Standorts Leimen wird deutlich, wie ein bestehendes System mit hohen Recycling-Raten durch gezielte technologische Innovationen ergänzt werden kann. Damit können Hersteller sowohl auf Kosten- als auch auf Emissionsseite zusätzlich entlastet werden.

Im Maximierungspfad werden höhere Recycling-Volumina von Glas, Kunststoff und Holz angenommen. Glas wird heute zwar zu über 95 % recycelt, davon sind jedoch nur 11,5 % zur anschließenden Verwendung in der Flachglasproduktion vorgesehen, die hohe Qualitätsanforderungen stellt.¹⁵⁴ Durch sortenreine Trennung direkt an der Abbruchstelle könnten bis zu 20 % des Abfalls wieder in die Flachglasproduktion fließen, während die Deponierungsquote auf 2 % sinken würde. Deutlich größere Veränderungen sind in den Bereichen Kunststoff und Holz möglich. Rund die Hälfte der Kunststoffe wird heute energetisch verwertet, etwa 25 % werden recycelt, während ca. 27 % deponiert werden.¹⁵⁵ Durch zusätzliche und verbesserte Verfahren des Kunststoff-Recyclings und durch sauberere Abfallströme könnten im Jahr 2045 bis zu 80 % recycelt werden. Im Hinblick auf Beton wird zusätzlich zum Recycling von Zementsteinresten eine direkte Verwendung von Recycling-Gesteinskörnungen in der Betonproduktion (knapp 40 % der Betonabfälle) angenommen, begrenzt durch regulatorische Anforderungen und verfügbare Abfallmengen.¹⁵⁶ Da das den Einsatz der Recycling-Gesteinskörnungen aus dem Tiefbau in den Hochbau verlagern würde, wird diese Ausprägung nur im Maximierungspfad betrachtet. Für die genannten Materialströme liegen die Preisniveaus von Rezyklaten teils unterhalb der Produktionskosten, weshalb diese im Intensivierungspfad nicht berücksichtigt wurden. In Summe bleibt die Bruttowertschöpfung des Hebels jedoch auch im Maximierungspfad positiv, vor allem aufgrund der Beiträge von Stahl und Aluminium. Da gleichzeitig die Verwertungsquoten erhöht werden könnten, erfüllt der Hebel die Prämissen des Maximierungspfades und wird entsprechend berücksichtigt.

Bis 2045 steigt die Menge der jährlich verfügbaren Rezyklate¹⁵⁷ von heute 61 Mio. Tonnen auf 79 Mio. Tonnen im Intensivierungspfad. Davon fließen etwa 4 Mio. Tonnen in die Zementproduktion. Im Maximierungspfad steigen Rezyklate auf ca. 75 Mio. Tonnen – weniger als im Intensivierungspfad aufgrund des geringeren Anfalls von Abfällen infolge zusätzlicher Sanierungen, die einen Abriss und damit weitere Bauabfälle vermeiden. Damit könnten im Vergleich zu 2023 zusätzlich bis zu 3,8 Mio. Tonnen CO_{2e} (im Intensivierungspfad) vermieden werden. Aus ökonomischer Sicht würde sich im Intensivierungspfad ein zusätzliches Bruttowertschöpfungspotenzial von 2,8 Mrd. Euro im Jahr 2045 (im Vergleich zu 2023) ergeben, im Maximierungspfad ein zusätzliches Bruttowertschöpfungspotenzial von 2,0 Mrd. Euro (im Vergleich zu 2023). Für die Umsetzung erhöhter Verwertungsquoten sind einmalige Investitionen in Sortier- und Recycling-Infrastruktur notwendig – im Intensivierungspfad handelt es sich hier kumuliert bis 2045 um 2,8 Mrd. Euro, im Maximierungspfad um ca. 9,8 Mrd. Euro.

¹⁵⁴ ift Rosenheim (2019).

¹⁵⁵ Plastics Europe (2026).

¹⁵⁶ Infolge eines höheren Einsatzes von Rezyklaten in der Betonproduktion wären entsprechende Mengen an Gesteinskörnungen im Tiefbau (wie beispielsweise in Erdbau-Anwendungen) zu kompensieren. Unter Einhaltung der Prämisse einer Maximierung der Bruttowertschöpfung des Beton-Recyclings und der Materialverwertung wurde der Hebel im Maximierungspfad dennoch modelliert.

¹⁵⁷ Umfasst alle Materialien außer Rezyklaten aus Boden und Steinen. Asbest-Belastungen und ihr Einfluss auf Verwertungsquoten sind nicht berücksichtigt.

Exkurs 9: Industrielle Nebenprodukte als verfügbarer Baustoff für Klimaschutz und Circular Economy

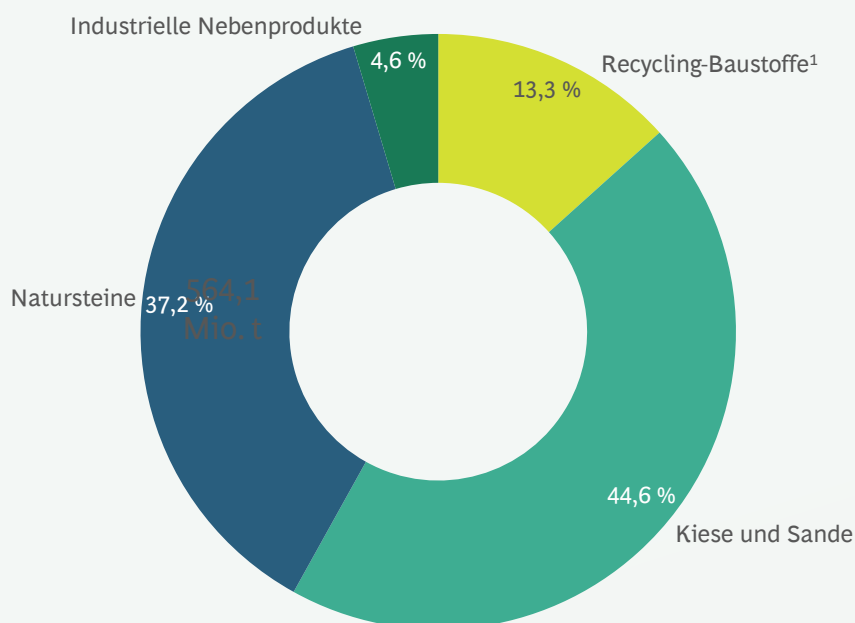
Die Nutzung industrieller Nebenprodukte kann einen wichtigen Beitrag zur Absicherung der Rohstoffversorgung leisten. Industrielle Prozesse stellen mit der Herstellung von Inputmaterialien und Energie wichtige Weichen für die deutsche Wertschöpfung. Dabei entstehen auch Nebenprodukte, zum Beispiel Stahlwerks- und andere Schlacken, Gießereirestsand und Eisensilikat (Kupferhüttenmaterial), die wiederum in anderen Prozessen weiterverwendet werden könnten. So könnten Primärrohstoffe ersetzt und Prozesse wie etwa die Kupferproduktion abgesichert werden, die zum Beispiel bei einem fehlenden Auslass von Eisensilikat aufgrund von Deponierungskosten und fehlenden Lagerungskapazitäten reduziert werden könnte. Gleichzeitig nimmt die Verfügbarkeit bestimmter bereits heute genutzter Nebenprodukte aus emissionsintensiven Prozessen – zum Beispiel Flugasche aus der Kohleverbrennung oder Hochofensand aus der Roheisenerzeugung im Hochofen – ab, da diese im Zuge der fortschreitenden Dekarbonisierung zunehmend zurückgehen. Mit einer Ausweitung der Nutzung anderer industrieller Nebenprodukte können Primärrohstoffe auch weiterhin ersetzt und die Circular Economy gestärkt werden.

Als Substitut für primäre Gesteinskörnungen könnten industrielle Nebenprodukte im Bausegment sinnvoll eingesetzt werden und Emissionen senken. Traditionell kommen im Bausektor beispielsweise große Mengen primärer Gesteinskörnungen zum Einsatz, für die viele industrielle Nebenprodukte eine nachhaltige Alternative darstellen. Während sich einzelne Nebenprodukte in ihrem Aufkommen unterscheiden, könnten sie der Bauwirtschaft in Summe zusätzliche und zum Teil erhebliche Mengen an rückgewonnenen Baustoffen zur Verfügung stellen. Dadurch wird der Bedarf an Rohstoffabbau verringert, der Transportaufwand reduziert und CO₂-Emissionen gesenkt. Projekte wie etwa im Straßenbau zeigen, dass der Einsatz industrieller Nebenprodukte regelkonform und umweltverträglich ist und gleichzeitig die Circular Economy stärken kann. Die Ersatzbaustoffverordnung hat sich hierbei als praxistauglicher Rechtsrahmen etabliert.

Industrielle Nebenprodukte decken rund 4,6 % der produzierten Gesteinskörnungen ab

ABBILDUNG 43 | Anteile an produzierten Gesteinskörnungen nach Herkunft

(in %, 2022)



1. Als Recycling-Baustoffe werden Gesteinskörnungen bezeichnet, die durch Aufbereitung mineralischer Bauabfälle hergestellt werden
Quelle: Kreislaufwirtschaft Bau, Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2022

Um die Nutzung industrieller Nebenprodukte auszuweiten, wären regulatorische Anpassungen notwendig.¹⁵⁸ Die Stoffe könnten auch im Hochbau, insbesondere im Betonbau, zum Einsatz kommen und sind in Ländern wie Belgien oder Bulgarien bereits etabliert. In Deutschland ist dies beispielsweise für Eisen-silikat derzeit jedoch nur über Einzelfallentscheidungen möglich, weil die Ersatzbaustoffverordnung für den Hochbau nicht greift. Um eine breitere Anwendung für die Betonherstellung zu ermöglichen, müsste das geltende Regelwerk angepasst werden.¹⁵⁹ Dies würde eine einheitliche Grundlage für die Zulassung schaffen und könnte der Bauwirtschaft zusätzliche Mengen an zirkulären Baustoffen zur Verfügung stellen.

Der Exkurs verdeutlicht, dass industrielle Nebenprodukte über bestehende Anwendungen hinaus Potenzial für weitere Einsatzbereiche bieten.

Neben Projekten im Straßenbau könnten sich zusätzliche Anwendungsfelder ergeben. Damit können primäre Gesteinskörnungen in der Bauindustrie ersetzt und Emissionen gesenkt werden. Gleichzeitig werden verlässliche Absatzwege für Nebenprodukte geschaffen, die zur Vermeidung von Deponierung führen und zur Stabilität industrieller Prozesse beitragen.

¹⁵⁸ Diese setzen die Einhaltung der geltenden Bestimmungen für einen schadlosen und ordnungsgemäßen Einbau voraus, um den Schutz von Grundwasser und Boden auch weiterhin zu gewährleisten.

Case-Study 7: Speira – Wiederverwendung von *Low Grades* im Aluminiumkreislauf durch Innovation

Auch bereits weitgehend zirkuläre Materialien wie Aluminium stehen noch vor Herausforderungen. Während Aluminium heute mit Verwertungsquoten von ca. 90 % zu den am meisten recycelten Metallen Deutschlands zählt, konzentriert sich ein Großteil der bestehenden Kapazitäten auf saubere und leicht verwertbare Schrotte. Sogenannte *Low Grades* hingegen, also stark verunreinigte Schrotte wie zum Beispiel Maschinenbauteile mit Ölanhaftungen, Kabel mit Kunststoffummantelungen oder Aluminiumgusslegierungen aus der Automobilindustrie, fallen bislang häufig aus den europäischen Stoffkreisläufen heraus. Sie werden dann vor allem nach Asien exportiert, wodurch nicht nur Aluminium für die heimische Industrie, sondern auch Potenziale für Wertschöpfung und Resilienz von Unternehmen verloren gehen. Mit der technischen Aufwertung bereits vorhandener Kapazitäten zeigt Speira, wie durch Innovation auch bereits etablierte Materialkreisläufe weiter optimiert werden können.

Mit gezielten Investitionen schafft Speira die technologischen Voraussetzungen, um auch komplexe Aluminiumschrotte in der Circular Economy zu halten. An den Standorten Grevenbroich und Töging am Inn erneuert der Aluminiumwalz- und Recycling-Konzern jeweils zwei Drehtrommelöfen. Investiert werden dafür ca. 11 Mio. Euro in zentrale Anlagenkomponenten des Recyclings, darunter etwa Chargiermaschinen und thermische Nachverbrenner.¹⁶⁰ Diese Verbesserungen bedeuten einen wichtigen technologischen Fortschritt, durch den auch *Low Grades* dem Recycling-Prozess erhalten bleiben. Bislang schwer zu recycelnde Schrotte können damit ohne Qualitätsverlust zurückgewonnen und der Industrie, etwa dem Mobilitätssegment, wieder zugeführt werden.

¹⁶⁰ Chargiermaschinen sind für die kontrollierte Zufuhr von Schrott für den Ofen zuständig, während thermische Nachverbrenner organische Schadstoffe verbrennen und so zur Abgasreinigung beitragen.

Neben der Fähigkeit zum Recycling ohne Qualitätsverlust haben die erneuerten Öfen eine hohe Energieeffizienz und erhebliche Kostenvorteile.

Vor allem durch die gesteigerte Energieeffizienz ergeben sich für Speira klare Vorteile auf drei Ebenen: Einerseits spart jede Tonne recycelten Aluminiums bis zu 95 % der Energie, die für die Herstellung von Primäraluminium erforderlich wäre. Gleichzeitig können die anhaftenden Verunreinigungen der geringwertigen Schrotte, die sogenannte Organik, als Brennwert im Schmelzprozess verwendet werden, wodurch *Low Grades* in den neuen Öfen noch effizienter zum Einsatz kommen. Letztlich ermöglicht das neuartige Ofendesign durch Automatisierungen (Brennereinstellung, Steuerung der Abgasführung, kürzere Öffnungszeiten der Ofendeckel) während des Schmelzprozesses, Abwärme noch besser zu speichern und die Anlage als Ganzes damit noch effizienter zu machen. Zusätzlich zu der niedrigeren Energieintensität gegenüber der Primärerzeugung benötigen die neuen Öfen noch einmal ca. 25 % weniger Energie gegenüber den ersetzten Altaggregate, wodurch sich der ökologische Fußabdruck des produzierten Recycling-Aluminiums weiter verkleinert.

Speira zeigt damit, wie auch in bereits etablierten Materialkreisläufen weitere Effizienzsteigerungen erreicht werden können.

Der Ansatz verdeutlicht, dass die Circular Economy nicht auf einfach sortierte Materialströme beschränkt ist, sondern auch dort ansetzen kann, wo technische Komplexität und wirtschaftliche Hürden bislang eine Herausforderung dargestellt haben. Indem Speira das Maximum aus *Low Grades* herausholt und legierungsspezifisch in anspruchsvolle Anwendungen zurückführt, verbleibt mehr Aluminium im europäischen Kreislaufsystem, Exporte ins Ausland werden reduziert, und es wird die Basis für eine noch energieeffizientere Aluminiumwirtschaft geschaffen. Das Beispiel macht deutlich, dass Fortschritte in der Circular Economy neben einer gesteigerten Verwertung auch weitere Vorteile mit sich bringen können, sowohl auf betriebswirtschaftlicher als auch auf ökologischer Ebene.

Ein zirkuläres Bausegment steigert Wertschöpfung, Klimaschutz und Effizienz bei fortlaufendem Wachstum

Die zwei betrachteten Kreislaufhebel zeigen, dass eine zirkulär gestaltete Bauwirtschaft langfristig ökologische, ökonomische und strukturelle Vorteile für Deutschland erschließen kann. Die Bruttowertschöpfung im Bausegment ist bereits heute vor allem durch die hohe Sanierungsaktivität stark ausgeprägt und könnte bis 2045 durch die Kreislaufhebel insgesamt um etwa 6 Mrd. Euro steigen (Intensivierungs- und Maximierungspfad im Vergleich zu 2023) – das sind ca. 4 % der heutigen sektoralen Bruttowertschöpfung (siehe Abbildung 44). Gleichzeitig erhöht sich der absolute Materialbedarf aufgrund zusätzlicher Sanierungstätigkeit um 1,7 Mio. Tonnen gegenüber heute im Intensivierungspfad bzw. 2,3 Mio. Tonnen im Maximierungspfad. Der erhöhte Materialbedarf führt bis 2045 zu zusätzlichen materialbedingten Emissionen von 1,7 – 1,9 Mio. t CO₂e. Diese werden jedoch

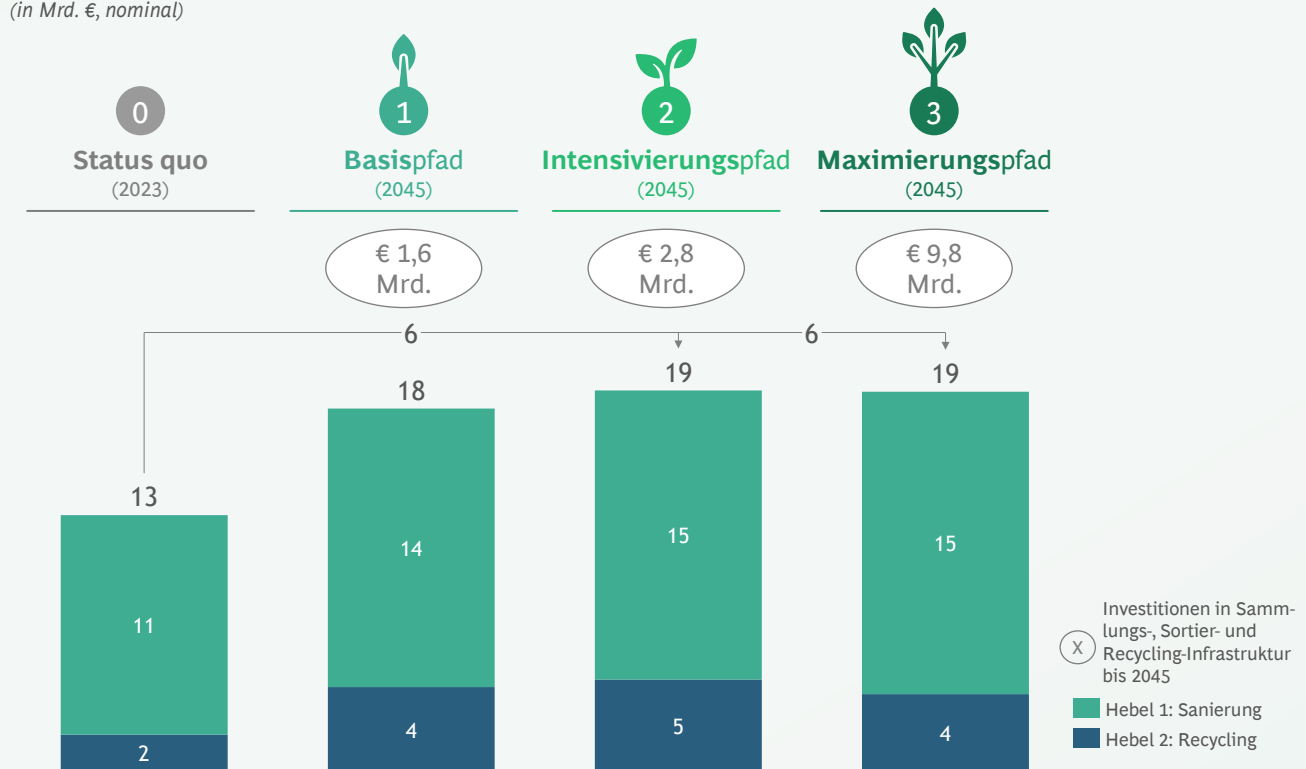
durch das Baustoff-Recycling überkompensiert, insbesondere dort, wo neben der stofflichen Verwertung zusätzliche Klimaschutzvorteile erzielt werden können – etwa durch Klinkerersatz in der Zementherstellung. Insgesamt ergibt sich für 2045 je nach Szenario eine zusätzliche Nettoeinsparung von 2,4 bis 3,3 Mio. t CO₂e gegenüber 2023 (siehe Abbildung 45). Entscheidend ist darüber hinaus der strukturelle Effekt: Die Zahl neuer Wohnungen wächst überproportional durch den Hebel Sanierung, und in Summe reduziert sich der durchschnittliche Materialeinsatz für den Wohnungsbau bis 2045 um 2 %. Zum Erreichen des erhöhten Baustoff-Recycling-Potenzials sind kumuliert bis 2045 einmalige Investitionen von 2,8 Mrd. Euro im Intensivierungspfad bzw. 9,8 Mrd. Euro im Maximierungspfad erforderlich.

¹⁵⁹ Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG) – Anhang 10 der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB): Konkret könnten die Feststoffwerte gestrichen und durch die Eluatwerte der Ersatzbaustoffverordnung ersetzt werden.

Jährliche Bruttowertschöpfung im Bauwesen könnte durch die Circular Economy um € 6 Mrd. steigen

ABBILDUNG 44 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Kreislaufhebel bis 2045

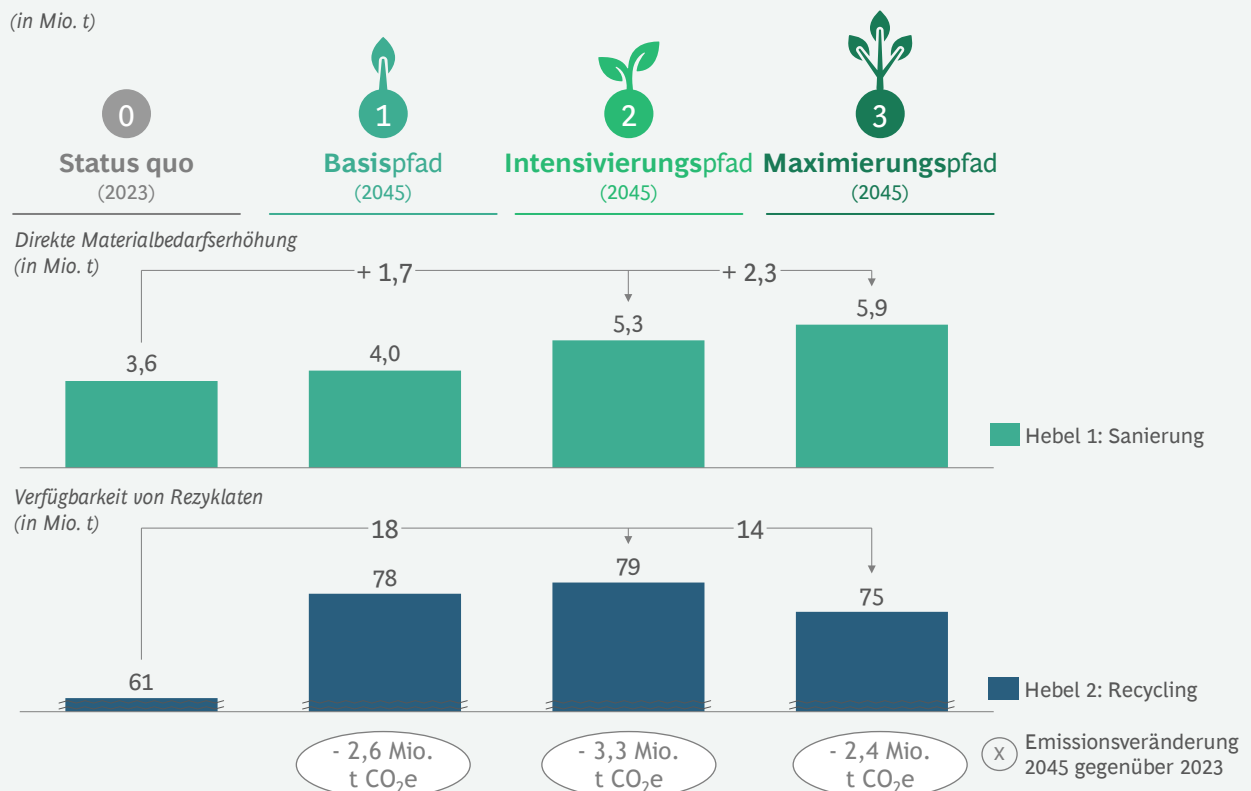
(in Mrd. €, nominal)



Kreislaufhebel erfordern leicht erhöhten Materialbedarf, gleichzeitig könnten Rezyklate um 14 – 18 Mio. t gesteigert werden

ABBILDUNG 45 | Materialbedarfserhöhung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2046

(in Mio. t)



3.5.4 Barrieren: Strukturelle, regulatorische und marktliche Hürden bremsen heute die Umsetzung weiterer zirkulärer Lösungen aus

Die zirkuläre Weiterentwicklung des Bausektors wird durch strukturelle Herausforderungen bei der Verwertbarkeit von Stoffströmen bzw. der Renovierbarkeit von Wohnungen begrenzt. Zwar ist Sanierung technisch möglich und gesellschaftlich akzeptiert, doch viele Bestandsgebäude sind weder modular aufgebaut noch baulich so beschaffen, dass sie sich umfassend modernisieren lassen; insbesondere ältere Bauten verlangen häufig eine tiefgreifende Erneuerung statt punktueller Maßnahmen. Gleichzeitig fehlen im Handwerk, in Bauunternehmen und in spezialisierten Gewerken die nötigen Kapazitäten¹⁶¹, um höhere Sanierungsquoten in der erforderlichen Geschwindigkeit zu realisieren. Beim Baustoff-Recycling wirken schließlich die historisch gewachsenen Bauweisen als zentrales Hindernis: Viele Gebäude enthalten schwer trennbare Verbundmaterialien, verklebte oder kunststoffbeschichtete Bauteile und komplexe Mischstoffe, die eine sortenreine Erfassung

erschweren und insbesondere bei wertvollen Metallen zu systematischen Verlusten in der Wiederverwertung führen. Gleichzeitig fehlt es bislang an Transparenz hinsichtlich der in Bestandsgebäuden verbauten Materialien, z. B. kritischer Metalle. Darüber hinaus stellt die Notwendigkeit langfristiger, lebenszyklusorientierter Planung eine zentrale Herausforderung dar: Heutige Entscheidungen zu Bauweisen, Konstruktionsprinzipien und Verbundformen legen maßgeblich fest, ob Materialien und Produkte in mehreren Jahrzehnten sortenrein rückgebaut und wiederverwendet werden können. Diese zeitliche Entkopplung zwischen Planungs- und Verwertungsphase erschwert die konsequente Umsetzung weiterführender Kreislaufhebel wie beispielsweise die Wiederverwendung von Bauteilen.

Darüber hinaus bestehen Herausforderungen im Hinblick auf Technologiereife und Kosten beim Baustoff-Recycling. Manche Recycling-Verfahren, zum Beispiel die Verwendung von Brechsand in der Betonproduktion, stehen erst am Übergang zur industriellen Skalierung, während komplexe Sortiertechnologien hohe Investitionen erfordern und nur bei stabilen Absatzmärkten für Rezyklate wirtschaftlich betrieben

¹⁶¹ Bundesagentur für Arbeit (2024).

Für das Recycling von Baustoffen bestehen Herausforderungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette

ABBILDUNG 46 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Bausegment

	Verfügbarkeit		Verwertung		Nachfrage	
	A) Verlust verwertbarer Abfallströme	B) Begrenzte Kreislauf-verwertbarkeit	C) Limitierte Tech.-Reife u. Verarbeitungs-kapazitäten	D) Strukturelle Kosten-nachteile	E) Unsichere Absatz-märkte	F) Einge-schränkte Anwendbarkeit
Hebel 1: Sanierung von Wohnungen	○	✗	~	○	○	~
Hebel 2: Steigerung Recyclingvolumina	✗	✗	~	✗	✓	~

✗ Herausforderung trifft zu ○ Keine signifikante Herausforderung ~ Herausforderung trifft selektiv zu, z. B. für bestimmte Stoffströme oder Anwendungsfälle

Quelle: BCG-Analyse

werden können. Häufig liegen die Prozesskosten über denen von Primärmaterialien, was besonders bei Betonrecyclat (als Substitut für Gesteinskörnungen) sichtbar wird.

Die Rezyklatnachfrage wird zusätzlich durch regulatorische Barrieren und Zielkonflikte gehemmt: Der Anspruch an eine schadstofffreie Umwelt – konkretisiert etwa durch strenge Grenzwerte und Vorgaben aus dem Abfallrecht – kollidiert teilweise mit dem Ziel maximaler Verwertungsquoten. Gleichzeitig sorgen uneinheitliche Qualitätsstandards, aufwendige Prüfprozesse und langwierige Genehmigungsverfahren für erhebliche Planungsunsicherheit und dämpfen die ohnehin geringe Bereitschaft zur Zahlung für Rezyklate.

Zur Hebung des identifizierten Potenzials im Intensivierungspfad ergeben sich aus der Betrachtung der größten Barrieren im Segment drei zentrale Handlungsfelder: Erstens die konsequente Stärkung der getrennten Sammlung sowie der Sortier- und Aufbereitungstechnologien am Abfallentstehungsort, um höhere Verwertung im Recycling zu ermöglichen. Zweitens die Vereinheitlichung und planungssichere Gestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen für Recycling-Baustoffe. Und drittens die Steigerung der Transparenz hinsichtlich der verbauten Materialien sowie die Verankerung lebenszyklusorientierter Bauweisen, um die Voraussetzungen für eine spätere Wiederverwendung von Materialien und Bauteilen zu schaffen.



3.6 Energie: Kreislaufhebel machen die Energiewende günstiger und resilienter

Zusammenfassung

- Für die Energiewende entsteht bis 2045 ein Materialbedarf von kumuliert ca. 75 Mio. Tonnen; zugleich sind **hohe Investitionen erforderlich**. Kreislaufhebel können den Investitionsbedarf um ca. 38 Mrd. Euro (im Intensivierungspfad) reduzieren.
- Komponenten-Wiederaufbereitung, Integration von bidirektionalem Laden und *Second-Life*-Batterien sowie das Recycling von Anlagen der erneuerbaren Energien und von Batteriespeichern stärken die **heimische Wertschöpfung bis 2045 mit jährlich mehr als 3 Mrd. Euro**.
- Für alle Hebel bestehen **Hemmnisse auf der Nachfrageseite**: Vergütungsmechanismen und Anreizsysteme müssen zirkuläre Lösungen attraktiver machen. Zudem sind vor allem für das Recycling technologische Weiterentwicklungen und ein Kapazitätsausbau nötig.

3.6.1 Kontext: Der Sektor befindet sich in einer historischen Transformation; die Nachhaltigkeitsherausforderung verschiebt sich

Der Energiesektor befindet sich in einer historischen Umbruchphase: Durch das Wachstum von künstlicher Intelligenz und die Elektrifizierung vieler Endanwendungen in Verkehr, Industrie und Gebäudewärme könnte sich der Stromverbrauch in den kommenden Jahrzehnten nahezu verdoppeln.¹⁶² Gleichzeitig muss der Sektor zur Erreichung nationaler und europäischer Klimaziele den Kohleausstieg realisieren und dafür in erheblichem Umfang zusätzliche Kapazitäten für erneuerbare Energien, Batterien, Netzinfrastruktur und Backup-Kraftwerke aufbauen.

Insgesamt wird dieser Aufbau Investitionen von über 1 Billion Euro erfordern.¹⁶³ Allein im Bereich erneuerbare Energien werden bis 2045 in einem Klimaneutralitätsszenario insgesamt mehr als 180 GW

neuer Wind- und 350 GW neuer PV-Leistung installiert¹⁶⁴ (das entspricht etwa 18.000 Windkraftanlagen und 500 Mio. PV-Modulen). Gleichzeitig würden in diesem Zeitraum ca. 800.000 km Netze erneuert und erweitert – und 320 GWh Speicherkapazität installiert. Diese Investitionen geschehen in einem Kontext, in dem die Kosten der Transformation zunehmend in den Blickpunkt der öffentlichen Aufmerksamkeit rücken. Die spezifischen Kosten des deutschen Stromsystems sind seit Beginn der Energiewende bereits um ca. 70 % gestiegen, was derzeit bereits mehr als 30 Mrd. Euro an öffentlichen Subventionen zur Stabilisierung deutscher Strompreise erforderlich macht.¹⁶⁵ Das wird eher kurz- als langfristig politische Gegenmaßnahmen erfordern.

Mit dem Fortschreiten der Energiewende verlagert sich auch die Umweltbelastung des Sektors – weg von direkten Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger und hin zu einer höheren Materialintensität und dem Verbau indirekt emissionsintensiver und teils knapper Rohstoffe. So liegt der Gesamt-Materialbedarf bis 2045 bei jährlich knapp 4 Mio. Tonnen bzw. kumuliert bei 75 Mio. Tonnen.¹⁶⁶ Damit einher geht ein Shift der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu der von anderen Rohstoffen. Zum Beispiel steigt durch den Ausbau von Erneuerbaren, Speichern und Netzen der Bedarf an Kupfer, Lithium, Silber und seltenen Erden erheblich (in Summe ca. 2,3 Mio. Tonnen bis 2045), Gleiches gilt für Aluminium (ca. 6,7 Mio. Tonnen bis 2045). Diesem Bedarf stehen jedoch weltweit nur begrenzte Kapazitäten gegenüber.

Andererseits entstehen durch den Rückbau alter Erneuerbare-Energien-Anlagen neue Materialströme, die perspektivisch zumindest einen Teil des Materialbedarfs bedienen könnten. Für die Erneuerbaren werden bis 2045 ca. 50 – 60 Mio. Tonnen Material verbaut sein (exklusive Beton). Gerade in diesem Bereich wird es zudem – ausgelöst durch den ersten Boom der Erneuerbaren vor ca. 20 Jahren – im kommenden Jahrzehnt zu einer großen Welle von Demontage, Entsorgung und Erneuerung kommen. Insgesamt werden bis 2045 etwa 25 Mio. Tonnen Material freigesetzt. Davon entfallen ca. 0,9 Mio. Tonnen auf seltene Erden, Silber, Lithium und Kupfer – dies entspricht ca. 40 % des Bedarfs im Energiesektor im Zeitraum bis 2045.¹⁶⁷

¹⁶² BDI und BCG (2025).

¹⁶³ Realer Wert, auf nominalen Wert angepasst: 1,6 Billionen Euro, davon ca. 55 % in Netze, 35 % in Erneuerbare, 5 % in Speicher, vgl. BDI und BCG (2025).

¹⁶⁴ Im Sinne von Erneuerung (Repowering) und Ausbau.

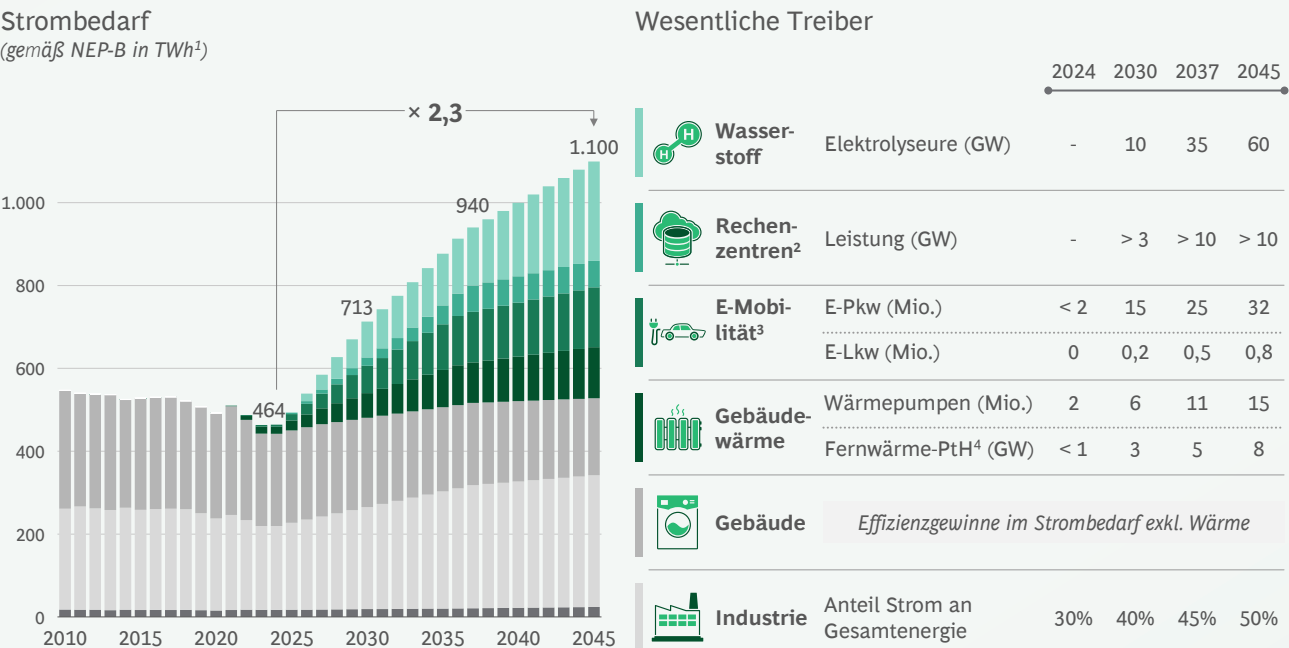
¹⁶⁵ BDI, BCG (2025).

¹⁶⁶ Für Ausbau von Infrastruktur für Wind- und Solarkraft, Batteriespeicher und Netze. Materialbedarfe und Potenziale aus Beton/Zement werden innerhalb des Infrastruktur Segments behandelt und sind hier ausgeschlossen.

¹⁶⁷ Bei Aluminium handelt es sich um 2,8 Mio. Tonnen, dies entspricht etwa 40 % des Bedarfs im Energiesektor.

Die Politik plant eine massive Elektrifizierung des deutschen Energiesystems

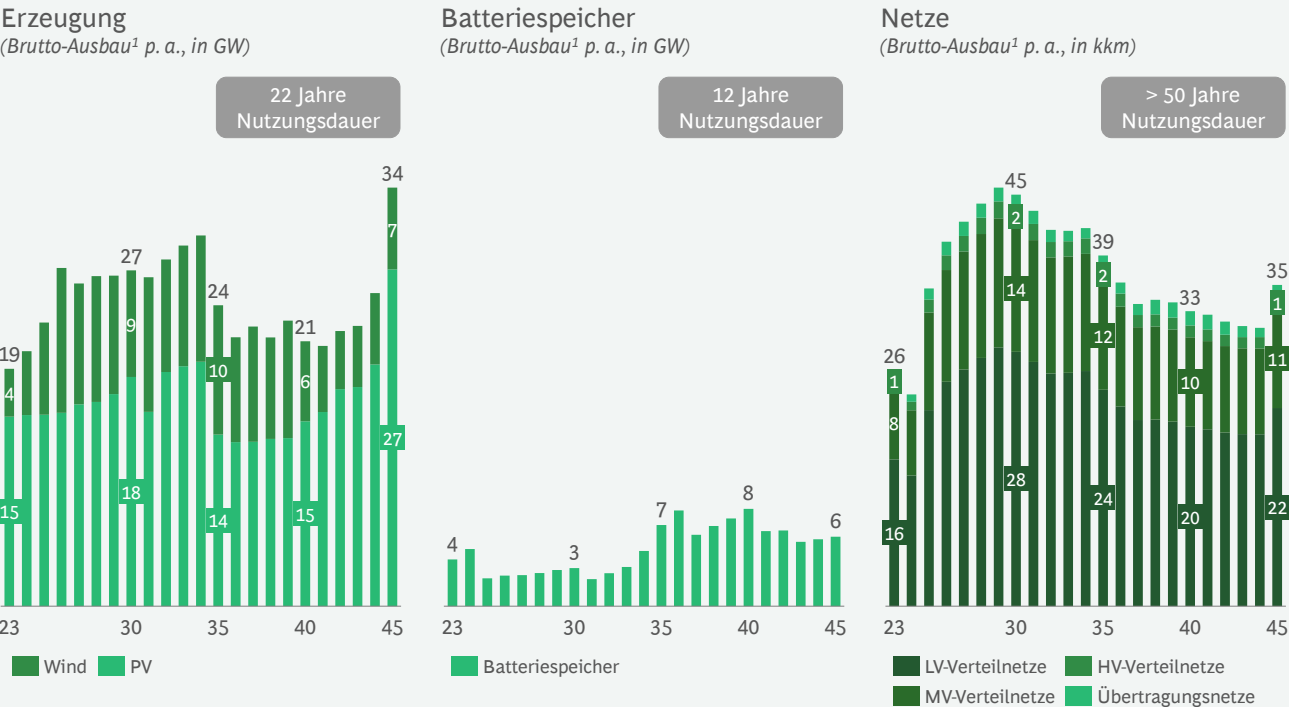
ABBILDUNG 47 | Treiber des Nettostrombedarfs in Deutschland gemäß aktueller politischer Ambition



1. Netzentwicklungsplan (Szenario B) (NEP-B) spiegelt die aktuelle politische Ambition am akkuratesten wider; Zwischenjahre extrapoliert auf Basis von BMW-Langfrist-szenarien; Strombedarf exklusive Netzwerkverlusten dargestellt 2. Nur neu zu errichtende Rechenzentren ab heute (analog zu Darstellung in NEP-B) interpoliert zwischen 2030 und 2037 3. E-Mobilität exkludiert Schienenverkehr, entspricht politischer Ambition – Deutschland unternimmt aktuell aber regulatorisch zu wenig, um dieses Ziel auch zu erreichen (siehe auch: BCG & IW & BDI (2024): Transformationspfade) 4. Großwärmepumpen und Elektrokessel
Quelle: BMW (2024); BCG-Analyse

Ausbaugeschwindigkeit und Nutzungsdauer beeinflussen Verteilung des Materialbedarfs bis 2045

ABBILDUNG 48 | Ausbaugeschwindigkeit von Schlüsselinfrastrukturen der Energiewende



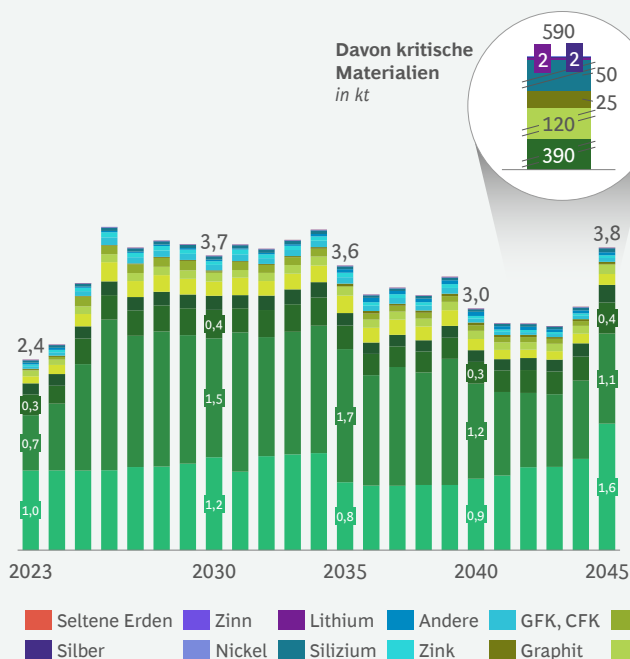
1. Inkl. Repowering oder Erneuerung von Infrastruktur
Quelle: BDI & BCG (2025): Energiewende auf Kurs bringen

Recycling kann den steigenden Materialbedarf nur teilweise decken

ABBILDUNG 49 | Materialbedarf und EOL-Aufkommen von Schlüsselinfrastrukturen der Energiewende

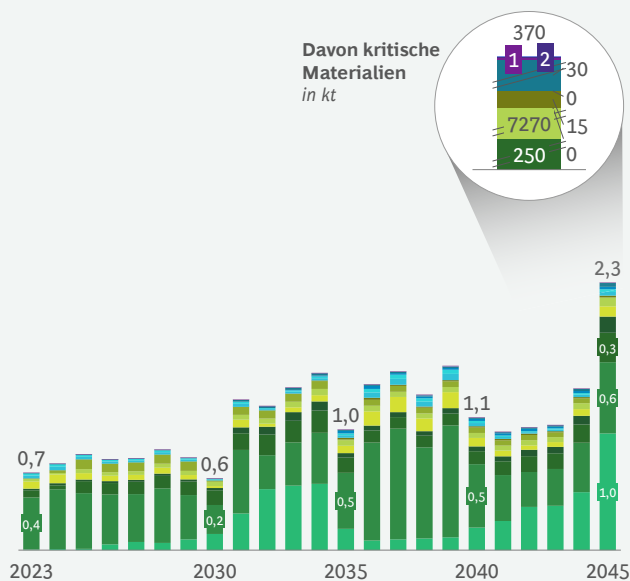
Materialbedarf PV, Wind, Batteriespeicher, Netze

(in Mio. t, exkl. Beton)



EOL-Material PV, Wind, Batteriespeicher, Netze

(in Mio. t, exkl. Beton)



1. Bereits vor Berichtigung um Export von Alt-Anlagen 2. Inkludiert Downcycling und werthaltiges Recycling 3. Quoten inkl. Beton
Quelle: BCG-Analyse auf Basis von BDI & BCG (2025): Energiewende auf Kurs bringen; DERA; Zenodo; IEA; BCG SWITCH-GT

Die Sicherstellung einer funktionierenden Circular Economy wird damit zu einer zentralen Nachhaltigkeits-, aber auch zu einer Resilienz-Aufgabe. Sie kann Materialknappheiten, Lieferkettenrisiken und Kostenanstiege begrenzen – und gleichzeitig ökologische Externalitäten des Sektors weiter reduzieren.

3.6.2 Status quo: Große Schritte zu einem kreislauffähigen Sektor sind bereits erfolgt

Segment auf einen Blick



Ausgaben für die Energiewende

> € 1 Bio.



Materialbedarf für Energieinfrastruktur bis 2045

~ 75 Mio. t



Freisetzung von seltenen Erden, Silber, Kupfer und Lithium bis 2045

~ 940 Tsd. t

Die Materialintensität erneuerbarer Stromerzeugung ist bereits erheblich gesunken.

Moderne Windkraftanlagen liefern heute mehr als das Zehnfache der Stromleistung von Turbinen aus den frühen 2000er-Jahren.¹⁶⁸ Beispielsweise kann ein Windpark mit 50 älteren Anlagen und einer Leistung von ca. 30 MW durch nur 18 neue Turbinen mit insgesamt ca. 120 MW Leistung ersetzt werden. Obwohl eine Anlage deutlich mehr Material benötigt, sinkt der Materialbedarf pro installierte Leistung deutlich, und der Platzbedarf kann um 30 % reduziert werden.¹⁶⁹ Die Leistung von PV-Modulen hat sich in den vergangenen 25 Jahren ebenfalls gesteigert, etwa um das Dreifache.¹⁷⁰ Dadurch entsteht ein doppelter Hebel: *ökologisch* durch signifikante Materialrückführung und Flächeneffizienz sowie *ökonomisch* durch reduzierte Betriebskosten und zusätzliche Wertschöpfung bei der Aufbereitung und dem Recycling alter Anlagen.

¹⁶⁸ Deutscher Bundestag (2022).

¹⁶⁹ Am Beispiel Windpark Elster: Von 57 Windenergieanlagen werden 50 zurückgebaut, 18 werden neu errichtet; Steigerung der Leistung einer Anlage von 600 kW auf 6.600 kW. Die Stromproduktion des Parks kann dabei versechsfacht werden ([Link](#)).

¹⁷⁰ VDMA (2025b).

Weitere Markttrends beeinflussen den Materialwert der Energieinfrastruktur:

- Mit dem wachsenden Anteil von Offshore-Wind steigt der relative Anteil von *DD-PMSG*-Turbinen (*Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator*) – und damit auch der Bedarf an seltenen Erden, insbesondere Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium. Gleichzeitig versuchen Hersteller, den Bedarf an seltenen Erden im Onshore-Segment gezielt zu reduzieren, vor allem durch optimierte Getriebelösungen und materialeffiziente Generatoren.¹⁷¹
- Der Silberanteil in PV-Modulen sinkt kontinuierlich, da Silber in den Leitbahnen zunehmend durch kostengünstigere Alternativen wie Kupfer ersetzt wird – was den Materialwert pro PV-Anlage weiter reduziert.¹⁷²
- Bei stationären Speichern setzt sich zunehmend die LFP-Technologie durch. Diese kommt ohne Nickel und Kobalt aus und senkt damit den verbauten Materialwert – allerdings auch die potenzielle Wertschöpfung durch Recycling.¹⁷³

Erste regulatorische Vorgaben für mehr Circular Economy sind umgesetzt. Dadurch entsteht ein wachsender Druck auf Industrie und Betreiber, entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Trotzdem verbleiben mehrere „ungelöste Probleme“:

- Rund 90 % der Masse von Windkraftanlagen können bereits heute recycelt werden. Für Rotorblätter und Permanentmagnete fehlen jedoch bislang marktfähige Recycling-Verfahren.¹⁷⁴ Innovationen in Design- sowie Verwertungstechnologien sind notwendig, um negative externe Effekte durch Deponierung und thermische Behandlung von Verbundwerkstoffen zu reduzieren und zugleich durch eine verbesserte Rückgewinnung von Seltenerdmetallen die Resilienz zu erhöhen.
- PV-Module fallen unter die *WEEE*-Richtlinie der EU und unterliegen damit einer grundsätzlichen Produzentenverantwortung. Regulatorische Vorgaben beziehen sich auf Massenziele, ohne die Rückgewinnung von Einzelströmen zu forcieren, sodass vor allem Glas und Aluminium, aber kaum

Silber und Silizium recycelt werden.^{175,176} Unter anderem führt der mangelnde Vollzug der Gewerbeabfallverordnung dazu, dass viele Altmodule dem formellen Rücknahmesystem verloren gehen. Weitere Ursachen sind *Reuse*-Exporte ins EU-Ausland und eine unsystematische Erfassung.

- Die EU-Batterieverordnung (seit 2023 in Kraft) verpflichtet Hersteller zu verbindlichen Rezyklatanteilen – etwa 90 – 95 % für Nickel und Kobalt sowie 50 – 80 % für Lithium.¹⁷⁷ Bislang gelingt es nicht, die daraus entstehende Wertschöpfung in Europa aufzubauen, statt sie wie bisher in Länder außerhalb der EU – insbesondere nach Asien – abwandern zu lassen (siehe Case-Study 3: PreZero).
- Die aktuelle Regulierung beim Netzausbau verhindert aufgrund primär investitionskostenbasierter Anreizmechanismen den Einsatz von wiederaufbereiteten Netzkomponenten wie Transformatoren (im Sinne von *Remanufacturing* und *Refurbishment*).

3.6.3 Potenzial: Circular Economy kann die Energiewende billiger und resilienter machen

Vor allem drei Kreislaufhebel haben im Energiesektor materielles Potenzial. Sie umfassen unterschiedliche Ansätze der Circular Economy und tragen dazu bei, bestehende Infrastruktur effizienter zu nutzen, ihre Lebensdauer zu verlängern und möglichst viel Material beim Rückbau zurückzugewinnen.

In der Energiewirtschaft ist insbesondere die Circular Economy ein Weg, die Energiewende günstiger zu machen

¹⁷¹ IEA (2021).

¹⁷² VDMA (2025b).

¹⁷³ IEA (2024).

¹⁷⁴ EEA (2021).

¹⁷⁵ PV-Module fallen unter die *WEEE*-Richtlinie der EU bzw. das deutsche ElektroG: Es gilt ein Verwertungsziel von 85 % (davon stofflich: 80 %), vgl. Europäische Kommission (2026).

¹⁷⁶ IEA (2018).

¹⁷⁷ EUR-Lex (2023).

¹⁷⁸ Davon 7 Mio. Tonnen Stahl, 2,5 Mio. Tonnen Aluminium und 0,8 Mio. Tonnen Kupfer.

¹⁷⁹ Für Erneuerung und Erweiterung, vgl. Bergische Universität Wuppertal (2024).

¹⁸⁰ Entspricht optimiertem Szenario, vgl. BDI und BCG (2025). Laut Netzentwicklungsplan ca. 45.000 km.

TABELLE 4 | Übersicht potenzieller Kreislaufhebel im Segment Energie

#	Hebel	Beschreibung
1	Refurbishment/Remanufacturing von Anlagen (Komponenten von Netz- und Windkraft-anlagen)	Durch <i>Refurbishment</i> und <i>Remanufacturing</i> können Transformatoren und weitere Netztechnik länger genutzt werden; ebenso können Komponenten von Windkraftanlagen nach deren Rückbau als Ersatzteile für den Bestand verwendet werden.
2	Bedarfsreduktion durch Nutzung von EV-Batterien	Auf Neuanschaffungen kann teilweise verzichtet werden, indem vorhandene Fahrzeugbatterien in einem zunehmend elektrifizierten Energiesystem als Stromspeicher genutzt (<i>Vehicle to Grid</i> , V2G) oder in ein zweites Leben als stationärer Speicher überführt werden.
3	Steigerung der Recycling-Volumina (Wind, PV, Batterien)	Durch verbessertes Recycling können größere Materialmengen, insbesondere kritische Stoffe, zurückgewonnen werden. Dadurch können Importe reduziert und industrielle Wertschöpfungspotenziale erschlossen werden.
4	Energiegewinnung aus Abfall	<i>Grund zur Depriorisierung: Thermische Verwertung nicht im Fokus der Studie, qualitative Einordnung und Abgrenzung zu „Waste to Molecules“ in Exkurs 10.</i>
5	Recycling von Netzen	<i>Grund zur Depriorisierung: Geringes zusätzliches Potenzial, vor allem verglichen mit Hebel 1, da nahezu alle Materialien bereits stofflich verwertet werden.</i>
6	Rückbau fossiler Energieinfrastruktur	<i>Grund zur Depriorisierung: Einmaleffekt, der in den meisten Fällen bereits mitgedacht wird, daher zusätzliches Potenzial eingeschränkt.</i>
7	Leasing-/PaaS-Geschäftsmodelle	<i>Grund zur Depriorisierung: Nischencharakter, Verschiebungs- statt Reduktionseffekte, begrenzter Einfluss auf Materialbedarf bzw. Bruttowertschöpfung</i>
8	Second Life stationärer Batteriespeicher	<i>Grund zur Depriorisierung: Anders als bei der Zweitnutzung von Batterien aus Elektrofahrzeugen (in weniger anspruchsvollen stationären Anwendungen) sind stationäre Großspeicher bei der Außerbetriebnahme meist bereits am Ende ihrer Lebensdauer und wirtschaftlich nicht mehr tragfähig. Eine modulweise Weiterverwendung erfordert eine aufwendige Prüfung, neue Systemintegration sowie Ab- und Umbauten. In der Regel übersteigen diese Kosten den verbleibenden Nutzen gegenüber Recycling oder dem Einsatz neuer Speicher.</i>

HEBEL 1 | *Refurbishment* und *Remanufacturing* von Anlagen



Der Netzausbau ist eine der zentralen infrastrukturellen Voraussetzungen für das Gelingen der Energiewende und die Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Der künftige Investitions- und Materialbedarf (kumuliert ca. 12 Mio. Tonnen bis 2045¹⁷⁸) wird dabei durch zwei Entwicklungen geprägt: die Erneuerung alternder Infrastruktur sowie die Erweiterung des Netzes infolge von Elektrifizierung, dezentraler Erzeugung und steigenden Leistungsanforderungen. Bis 2045 werden in den Verteilnetzen kumuliert ca. 800.000 km Leitungen und über 500.000 Transformatoren benötigt¹⁷⁹; im Übertragungsnetz sind ca. 30.000 km¹⁸⁰ Leitungen inklusive aller verbauten Komponenten zu erneuern bzw. auszubauen.

Netzkomponenten könnten aufbereitet statt neu produziert werden. Nach Stand von heute werden diese zwar nicht immer unmittelbar nach Ende ihrer Abschreibung, aber sehr oft vor Erreichen ihrer technischen Lebensdauer ersetzt – etwa, weil höhere Kapazitäten oder veränderte Netzstrukturen benötigt werden. Nur in Ausnahmefällen erfolgt im Anschluss ein *Refur-*

bishment oder *Remanufacturing*. Ein wesentlicher Grund dafür ist ein ausgeprägter Capex-Bias in der aktuellen Anreizvergütung: Weil Netzbetreiber im Wesentlichen ihren Kapitalstock vergütet bekommen, haben sie bei ausreichender Kapitalverfügbarkeit starke Anreize, Neuinvestitionen gegenüber Ersatzinvestitionen zu bevorzugen. Im Basispfad werden daher lediglich 10 % *Remanufacturing* bzw. *Refurbishment* bei Verteilnetzbetreibern sowie 0 % bei Übertragungsnetzbetreibern¹⁸¹ unterstellt. Das technische Potenzial, mit dem etwa 30 – 40 % der Bedarfe im Verteilnetz und 10 – 20 % im Übertragungsnetz gedeckt werden könnten, ist im Intensivierungspfad berücksichtigt.¹⁸²

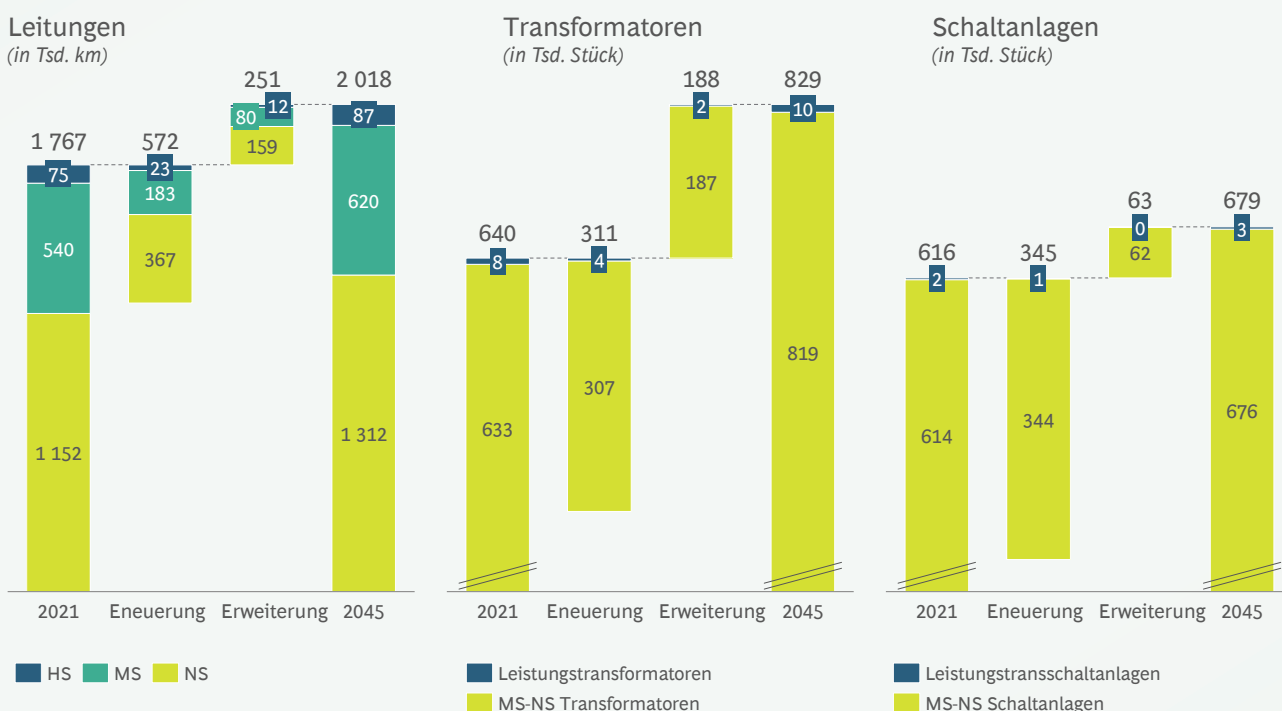
Auch Komponenten von Windkraftanlagen könnten künftig in stärkerem Umfang wiederaufbereitet und als Ersatzteile genutzt werden. Mit dem Erreichen des Nutzungsendes erster Anlagengenerationen setzt eine zunehmende Rückbauwelle ein. Eine skalierte Wiederinstallation demontierter Anlagen – etwa in anderen Ländern – ist jedoch unwahrscheinlich, da ihre Effizienz deutlich unter der von Neuan-

¹⁸¹ Aufgrund höherer technischer Komplexität und weil entsprechende Konzepte im Übertragungsnetz bislang nicht üblich sind.

¹⁸² Weitere zentrale Annahmen: Verlängerung der Lebensdauer der Anlagen um ein Drittel bei gleichzeitiger Kostenreduktion von 65 % im Vergleich zur Neuanschaffung.

Rund 50 % der bestehenden Transformatoren und Schaltanlagen werden gemäß Annahmen bis 2045 erneuert

ABBILDUNG 50 | Annahmen zu Netzerweiterung und -erneuerung



Quelle: BDEW; ZVEI; Bergische Universität Wuppertal (Quantifizierung der Technologiebedarfe in deutschen Verteilnetzen)

lagen liegt, der Betrieb entsprechend kostenintensiv ist, Neuanlagen vergleichsweise günstig verfügbar sind und für ältere Anlagentypen oft keine Ersatzteile mehr produziert werden. Stattdessen bietet der Rückbau die Möglichkeit, zentrale Komponenten wie Getriebe, Generatoren, Rotorlager oder Rotorblätter gezielt aufzubereiten und als Ersatzteile wiederzuverwenden und damit Neuproduktionen zu ersetzen. Im Intensivierungspfad wird daher angenommen, dass ca. 50 % der zurückgebauten Anlagen vorrangig für die Gewinnung solcher Ersatzteile genutzt werden.

Insgesamt könnte bei konsequenter Anwendung dieses Hebels ein kumuliertes Einsparpotenzial von ca. 38 Mrd. Euro bis 2045 erreicht werden. Der Effekt auf die deutsche Bruttowertschöpfung (jährlich +1,4 Mrd. Euro im Vergleich zu 2023) bleibt dagegen begrenzt, da die Wiederaufbereitung eine Neuproduktion im Ausland, aber auch in Deutschland¹⁸³ ersetzt und damit volkswirtschaftlich nur moderate zusätzliche Effekte erzeugt. Gleichzeitig entstehen für OEMs zusätzliche Geschäftspotenziale – die insbesondere

vor dem Hintergrund aktueller Lieferengpässe und der höheren Margen im Service- und *Refurbishment*-Geschäft interessant sein können.

¹⁸³ Anteil der deutschen BWS bei Neuproduktion berechnet auf Basis von Marktanteil und Produktionsstandort zentraler OEMs. Netze: MS-NS-Transformatoren 20 %, DSO-Leistungstransformatoren 30 %, TSO-Transformatoren 70 %; bei Windkraftanlagen: Getriebe 35 %, Generatoren 50 %, Rotorlager 25 %, Rotorblätter 15 %.

Case-Study 8: E.ON – der *Circular Place* von E.ON für einen resilienteren Netzausbau

Der Netzausbau zählt zu den zentralen Herausforderungen der Energiewende und ist derzeit mit hohen Kosten und langen Beschaffungsprozessen verbunden. Allein bis 2045 müssen über 500.000 Transformatoren erneuert oder zusätzlich installiert werden, um den Leistungsanforderungen auch in Zukunft gerecht zu werden und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Gleichzeitig entsteht vor allem im Zuge von Netzverstärkungen, Netzbauten oder Standortverlagerungen ein Aufkommen an frühzeitig rückgebauten, aber technisch noch voll funktionsfähigen Betriebsmitteln, was neue Chancen für Einsparungen von Materialaufwand, Investitionen und Zeit eröffnet. Mit dem *Circular Place* hat E.ON einen internen Marktplatz entwickelt, der verfügbare und funktionsfähige Anlagen systematisch sichtbar und eine konzernweite Wiederverwendung möglich macht.

Der *Circular Place* fungiert als digitale Koordinationsplattform, die Überbestände reduziert und Entsorgungskosten spart. Dabei werden funktionsfähige Betriebsmittel zentral erfasst, technisch bewer-

tet und konzernweit angeboten, um diese entweder aufzubereiten, wiederzuverwenden oder anderen E.ON-Gesellschaften bereitzustellen. Der Fokus liegt aktuell insbesondere auf Transformatoren, die im Zuge von Netzverstärkungen, Netzbauten oder dem Rückbau von Infrastruktur außer Betrieb genommen und über den *Circular Place* bei anderen Netzgesellschaften für weniger lastkritische Einsatzorte genutzt werden. Allein 2025 konnten durch den *Circular Place* erhebliche Einsparungen realisiert werden, indem die interne Wiederverwendung von Transformatoren Neuinvestitionen in relevantem Umfang ersetzte. Auf Basis der Hochrechnung ergibt sich dabei eine durchschnittliche Kostenersparnis von ca. 66 %, gleichzeitig konnten Entsorgungsaufwände vermieden und bestehende Überbestände systematisch reduziert werden.

Mit dem *Circular Place* kann E.ON Lieferengpässe vermeiden, den Netzausbau beschleunigen und so die eigene Resilienz stärken. Durch die interne Wiederbeschaffung über den internen Marktplatz lassen sich auf Ebene einzelner Betriebsmittel gegenüber

Der *Circular Place* ermöglicht mit *Refurbishment* und *Reuse* die Anwendung vorgelagerter R-Strategien vor dem *Recycling*

ABBILDUNG 51 | Lebenszyklus von Betriebsmitteln mit und ohne *Circular Place*

Klassischer Lebenszyklus



Lebenszyklus mit *Circular Place*



Quelle: E.ON

externer Neubeschaffung Kosteneinsparungen von ca. 60 – 70 % realisieren. Bezogen auf die Gesamt-Capex von Netzausbauprojekten ergibt sich daraus eine wirkungsvolle Capex-Reduktion von etwa 5 – 15 %. Gleichzeitig stehen auf strategischer Seite durch das Entfallen langer Beschaffungs- und Lieferprozesse Assets schneller zur Verfügung. Das Ergebnis: Der Netzausbau ist nicht nur kostengünstiger, sondern wird insbesondere in Phasen von Lieferengpässen auch beschleunigt; die Resilienz des Netzbetriebs kann auf diese Weise deutlich erhöht werden. Darüber hinaus können durch die Verlängerung der Nutzungsdauer bestehender Betriebsmittel um 20 – 40 % wesentlich energie- und materialintensivere Neuproduktionen vermieden werden. Auf diesem Weg kann der Fokus von nachgelagerten Entsorgungs- und Recycling-Prozessen hin zu höherwertigen Kreislaufstrategien wie *Reuse* und *Refurbishment* verschoben werden.

Damit zeigt der *Circular Place*, wie durch digitale Lösungen Circular-Economy-Modelle erfolgreich umgesetzt werden können. Als digitaler Marktplatz schafft der *Circular Place* mehr Transparenz hinsichtlich intern verfügbarer Assets, wodurch Informations-Asymmetrien zwischen den einzelnen Gesellschaften reduziert werden können. Zugleich verankert er zirkuläre Geschäftsmodelle im operativen Asset-Management, indem die Aufbereitung und interne Umverteilung von Betriebsmitteln in bestehende Beschaffungsprozesse

eingegliedert werden können. Darüber hinaus ist der *Circular Place* als digitale Plattform hochgradig skalierbar und kann auf weitere Asset-Klassen innerhalb des Konzerns sowie andere kapitalintensive Infrastrukturen wie Telekommunikations- oder Schienennetze ausgeweitet werden.

Eine breite Skalierung des *Circular Place* erfordert jedoch die gezielte Adressierung regulatorischer Herausforderungen. Konkret gibt es Hürden und Unsicherheiten bei der Bepreisung und Bewertung gebrauchter Betriebsmittel sowie unterschiedliche regulatorische Rahmenbedingungen zwischen verschiedenen Netzgebieten. Um Konzepte wie den *Circular Place* skalieren zu können, bedarf es daher neben dem gezielten Ausbau von *Refurbishment*-Kapazitäten auch der Standardisierung von Asset-Daten.

Insgesamt lässt sich am *Circular Place* erkennen, wie die Circular Economy durch digitale Lösungen auch im kapitalintensiven Netzgeschäft skalierbar verankert werden kann. Mit Vorteilen für Beschaffung und Nutzungsdauern sowie Capex-Einsparungen wird deutlich, wie außer Betrieb genommene Komponenten vom reinen Kostenfaktor zum strategischen Vorteil werden können. Damit verbindet der *Circular Place* als digitale Lösung Versorgungssicherheit und Kosteneffizienz und schafft so eine Grundlage für den beschleunigten Netzausbau.



Der Ausbau von Speicherkapazität ist angesichts des steigenden Anteils erneuerbarer Energien und des wachsenden Bedarfs an Systemflexibilität ein zentraler Baustein der Energiewende. Bis 2045 werden hierfür Batteriesysteme mit einer Gesamtmasse von ca. 2,8 Mio. Tonnen nötig. Die dafür verwendeten LFP-Batteriezellen werden heute überwiegend aus China bezogen und führen zu entsprechenden strukturellen Abhängigkeiten.

Eine bessere Integration des erheblichen Bestands an Fahrzeugbatterien in das Stromsystem (Vehicle to Grid, V2G) könnte den Zubaubedarf an stationären Speichern substanziell reduzieren. Durch intelligentes Laden und Einspeisen können E-Fahrzeuge nicht nur Lastspitzen glätten, sondern auch aktiv Systemdienstleistungen erbringen. In einem Klimaneutralitätsszenario würden im Jahr 2045 in Deutschland mehr als 41 Mio. E-Fahrzeuge verfügbar sein, die theoretisch ca. 240 GWh Speicherkapazität bereitstellen könnten (bei ca. 40 % nutzbarer Entladetiefe und vier Zyklen pro Woche). Selbst unter konservativen Annahmen, wie viele dieser Kapazitäten

tatsächlich adressierbar wären, verbliebe ein realisierbares Potenzial von ca. 30 GWh.¹⁸⁴ Könnte Deutschland bis 2045 auf den Zubau dieser 30 GWh stationärer Speicherkapazität verzichten, wären damit Materialeinsparungen von kumuliert ca. 200.000 Tonnen sowie eine Vermeidung von Investitionen von kumuliert 15 Mrd. Euro bis 2045 erzielbar.¹⁸⁵

Viele Anlagen der erneuerbaren Energien der ersten großen Ausbauwelle werden in den kommenden Jahren das Ende ihrer rund 20-jährigen Förderperiode erreichen. Damit stellt sich zum einen die Frage nach einer möglichen Folgenutzung der Anlagen und Standorte. Es ergibt sich aber auch die ökologische Herausforderung, neue Abfallprobleme oder andere negative Externalitäten der außer Betrieb gehenden Anlagen zu vermeiden. Diese Herausforderung ist angesichts der in diesen Anlagen verbauten Rohstoffe allerdings gleichermaßen eine Chance. Die Solarindustrie verbraucht 15 % des weltweit geförderten Silbers¹⁸⁶; die im deutschen PV-Anlagenbestand verbaute Silbermenge beträgt heute etwa 1.000 bis 2.000 Tonnen. Kaum eine andere Technologie enthält

¹⁸⁴ Annahmen: 40 % aller E-Autos mit Zugang zu Home-Charging; davon verfügen ca. 30 % über bidirektional ladefähige Wallboxen.

¹⁸⁵ Entspricht 1 Mrd. Euro im Jahr 2045. Die gesamtwirtschaftliche BWS ist leicht negativ und hängt maßgeblich davon ab, ob die andernfalls notwendigen stationären Speicher in Deutschland produziert worden wären. Auch wenn ein Teil der inländischen Produktion dadurch entfallen könnte, bleibt V2G ein wirkungsvoller Hebel, um den Ausbau von Speicherkapazität effizienter zu gestalten.

¹⁸⁶ Fraunhofer ISE (2022).

Außerdem kann stärkeres Recycling von Anlagen der erneuerbaren Energien und von Batterien heimische Wertschöpfung und Resilienz erhöhen

HEBEL 3 | Steigerung der Recycling-Volumina



eine ähnlich hohe Konzentration seltener Erden pro Bauteil wie die Permanentmagneten moderner Windkraftanlagen. Daher könnte die gezielte Adressierung einiger „ungelöster Probleme“ zusätzliche Potenziale heben.

PV-Module unterliegen bereits heute einer erweiterten Herstellerverantwortung¹⁸⁷, dennoch verbleiben zwei zentrale Herausforderungen: Zum einen fehlt es entlang der gesamten Rücknahmekette an Transparenz und am Vollzug bestehender regulatorischer Vorgaben, sodass ein erheblicher Teil der ausgedienten Module nicht in offiziellen europäischen Rücknahmesystemen landet. Zum anderen ist das heutige Recycling überwiegend masseorientiert und konzentriert sich auf die Rückgewinnung von Aluminium und Glas (oft mit Weiterverarbeitung zu Schaumglas). Im Ergebnis sind nur wenige Anlagen derzeit in der Lage, wertvolle Stoffe wie Silber, Silizium oder Kupfer in relevantem Umfang zurückzugewinnen. Diese machen nur etwa 4 % der Masse, aber etwa 65 % des Wertes der verbauten Materialien aus.¹⁸⁸

¹⁸⁷ PV-Module fallen unter die EU-Richtlinie WEEE bzw. das deutsche ElektroG, vgl. Europäische Kommission (2026). Produzenten müssen sich registrieren, die kostenlose Rücknahme organisieren/finanzieren, regelmäßig berichten und ein Verwertungsziel von 85 % (davon stofflich: 80 %) erzielen.

¹⁸⁸ Peters et al. (2024).

Case-Study 9: REMONDIS PV – mit eigenen Kapazitäten für die erste Rückbauwelle bei Photovoltaikmodulen

In Europa fallen in den kommenden Jahren große Mengen ausgedienter Photovoltaikmodule an.

Die darin enthaltenen Rohstoffe bieten ein erhebliches Potenzial für wirtschaftlich attraktive Kreislaufösungen. Vor diesem Hintergrund hat REMONDIS frühzeitig entschieden, PV-Recycling als eigenständiges Geschäftsfeld aufzubauen – mit dem Ziel, Wertstoffe aus Altmodulen hochwertig rückzugewinnen und wieder in den industriellen Produktionskreislauf zu führen.

Ein zentraler Baustein dieses Ansatzes ist der Aufbau eigener Recycling-Kapazitäten.

Im November 2024 hat die niederländische REMONDIS-Tochter Mirec eine Anlage zur stofflichen Verwertung defekter Photovoltaikmodule in Betrieb genommen. Die Anlage ist auf eine mechanisch-stoffliche Trennung der Modulbestandteile ausgelegt: Aluminiumrahmen und Anschlussdose werden entfernt, Glasfraktionen vom Backend separiert und die verbleibenden Materialströme sortenrein aufbereitet.

Bereits heute erreicht die Anlage eine stoffliche Recycling-Quote von über 80 % des Inputgewichts, die perspektivisch durch weitere Optimierung auf ca. 90 % ansteigen soll.

Die Anlage verfügt über eine Jahreskapazität von 10.000 Tonnen PV-Modulen, im Jahr 2025 wurden etwa 5.000 Tonnen verwertet. Dar- aus werden etwa 3.100 Tonnen Glas, 1.000 Tonnen Alu- minium sowie weitere Metall- und Materialfraktionen zurückgewonnen. Insgesamt finanziert sich die Anlage sowohl durch Gebühren für die Rücknahme der ausge- dienten Modelle, die von den entsorgenden Parteien getragen werden, als auch durch die zu erwartenden Erlöse für die rückgewonnenen Materialien.

Trotz vorhandener Technologie und Infrastruktur bleibt die Skalierung die zentrale Herausforde- rung.

Der Rücklauf ausgedienter Module liegt bislang deutlich unter den erwarteten Werten. Damit ist das heutige Aufkommen ausgedienter PV-Module für viele Marktteilnehmer noch nicht ausreichend planbar, um

Investitionen in spezialisierte Recycling-Anlagen anzu- stoßen, während fehlende Kapazitäten zugleich den Nutzen einer getrennten Erfassung infrage stellen – ein klassisches Henne-Ei-Problem. Für den geringen Rücklauf gibt es drei wesentliche Ursachen: Bei privat betriebenen Anlagen gibt es strukturelle Brüche in der erweiterten Herstellerverantwortung – viele ursprüng- liche Inverkehrbringer existieren nicht mehr, die ver- bliebenen Akteure finanzieren die Sammlung und Ver- wertung historischer Mengen mit. Gleichzeitig werden PV-Module oftmals nicht getrennt erfasst und finden sich in Bauschutt- oder Mischabfallströmen wieder. Zudem erweist sich bei Ausschreibungen zum Rück- bau von PV-Parks der Export der Module ins Ausland oft als kostengünstigste Option. Denn hochwertige Recycling-Prozesse in Europa sind mit höheren Demontage-, Logistik- und Prozesskosten verbunden, die sich angesichts bislang begrenzter Wiederverkaufs- und Materialerlöse wirtschaftlich häufig nicht vollstän- dig darstellen lassen.

REMONDIS adressiert diese systemischen Her- ausforderungen entlang der gesamten Wert- schöpfungskette – neben dem eigentlichen Recycling

auch durch getrennte Erfassung bei Rückbauprojekten der REMONDIS Electrorecycling GmbH sowie den Auf- bau belastbarer Wiederverwendungsstrukturen. Lang- fristige Skalierung erfordert jedoch ein besseres Zusammenspiel aus Regulierung, Rücknahmesyste- men und wirtschaftlichen Anreizen. Der Ansatz von REMONDIS zeigt, dass erst die Kombination aus eige- ner Recycling-Infrastruktur, standardisierter Wiederver- wendung und integrierter Erfassung ein wirtschaftlich skalierbares PV-Recycling ermöglicht und damit einen substanziellen Beitrag zur Rohstoffsicherung und zur Circular Economy in Europa leistet.

Eine Erhöhung von PV-Recycling-Menge und -Quoten hätte bis 2045 eine Steigerung der jährlichen Wertschöpfung um 1 Mrd. Euro zur Folge.¹⁸⁹

Bei einer Erhöhung des Anteils der in Deutschland gehaltenen und gesammelten Module von heute 45 % auf über 60 % und einer deutlichen Ausweitung der Rückgewinnung von Silber, Silizium und Kupfer könnten bis 2045 gegenüber heute jährlich 30.000 Tonnen zusätzliches Closed-Loop-fähiges Material zurückgewonnen werden. Dies entspricht 200 Tonnen Silber, 17.000 Tonnen Kupfer und 11.000 Tonnen Silizium. Kumulierte Mehrinvestitionen in Höhe von 1 – 2 Mrd. Euro bis 2045 wären zum Aufbau entsprechender Anlagen nötig. Das Potenzial, 12 % der heutigen Silberimporte (1.800 Tonnen¹⁹⁰) mit Recycling zu ersetzen, ist insbesondere vor dem Hintergrund eines strukturell angespannten Silbermarktes relevant¹⁹¹ – das neue Allzeithoch des Silberpreises von über 100 US-Dollar pro Feinunze im Januar 2026 (+200 % gegenüber Januar 2025) bei zugleich wachsender Nachfrage aus Elektromobilität und 5G-Technologien unterstreicht die Bedeutung heimischer Rückgewinnung.

Ein erhöhtes Recycling von Windkraftanlagen ermöglicht vor allem die Wiedergewinnung von Seltenerdmetallen. Heute sind bereits etwa 90 % der Masse einer Anlage recycelbar, besonders Stahl, Gusseisen und Kupfer¹⁹²; doch vor allem das Potenzial aus der Rückgewinnung von Seltenerdmetallen ist heute technisch noch sehr anspruchsvoll und nicht ausgeschöpft. In den *End-of-Life*-Anlagen des Jahres 2045 werden voraussichtlich ca. 200.000 – 300.000 Tonnen verfügbar sein, das entspricht etwa einem Drittel der seltenen Erden, die im gleichen Jahr für Permanentmagnete in Windkraftanlagen benötigt werden. Der Beitrag hängt dabei von der erreichbaren Rezyklatqualität ab. Ein direkter Eins-zu-eins-Ersatz von Primärmaterial ist unter anderem wegen Spezifikations-, Qualitäts- und Zertifizierungsanforderungen nicht garantiert, dennoch würde die Rückgewinnung von Seltenerdmetallen wesentlich zur Verringerung der Abhängigkeit von Primärmaterialimporten beitragen.

Für Rotorblätter bestehen weiterhin keine industriell etablierten chemischen Recycling-Verfahren zur Trennung der eingesetzten Verbundwerkstoffe. In der Folge werden sie heute überwiegend

deponiert, thermisch verwertet oder im Rahmen des Co-Processings in der Zementindustrie eingesetzt. Beim Co-Processing werden zerkleinerte Rotorblatt-Verbundwerkstoffe im Zementklinkerofen als Brennstoff- und Rohstoffsubstitut mitverwertet (nicht als Klinker-Ersatzstoff, siehe Kapitel 3.5.2). So können zwar fossile Brennstoffe ersetzt werden, die prozessbedingten Kalzinierungsemissionen aus Kalkstein bleibt jedoch in der Regel bestehen, und heterogene Materialqualität sowie Vorbehandlung begrenzen den Einsatz.¹⁹³ Die Verwertung von Rotorblättern stellt also ein erhebliches ökologisches Problem dar, das die Industrie bereits zu lösen versucht, etwa durch die Entwicklung besser recycelbarer Rotorblattkonstruktionen von Siemens Gamesa zusammen mit RWE.¹⁹⁴ Insgesamt bleibt das zusätzliche Wertschöpfungspotenzial aus dem Recycling von Permanentmagneten und Rotorblättern jedoch begrenzt und liegt bei jährlich ca. 50 Mio. Euro bis 2045.¹⁹⁵

Bei Energiespeichern könnte Wertschöpfung vor allem durch die Verlagerung von Recycling-Kreisläufen nach Europa entstehen und zukünftige Importabhängigkeiten reduzieren. Denn der wachsende regulatorische Rahmen, insbesondere durch die *EU Battery Regulation*, gibt bereits Ziele in Bezug auf *Recycled Content* und Verwertungsquoten vor. Aktuell findet in Europa jedoch überwiegend mechanisches Recycling statt, während Raffinerieprozesse bislang kaum etabliert sind (siehe Case-Study 3: PreZero). Unter der Annahme des Intensivierungspfads, dass bis 2045 ca. 90 % des Recycling-fähigen *EOL*-Materials in Deutschland verarbeitet werden, können Rohstoffmengen von 40.000 Tonnen (vor allem Aluminium, Stahl, Lithium, Kupfer) zurückgewonnen und eine Bruttowertschöpfung von knapp 100 Mio. Euro realisiert werden. Dieses Potenzial ist jedoch eher als Zusatzpotenzial zu dem wesentlich größeren aus *EV*-Batterie-Recycling zu betrachten – denn LFP-Recycling ist in der Regel nur über *Gate-Fees* tragfähig.

¹⁸⁹ Im Vergleich zu 2023. Annahmen zu den Rückgewinnungsquoten: Silber 90 %, Kupfer 90 % (aufgrund besserer Verwertung von im Modul verbautem Kupfer), Silizium 70 % sowie ca. 190 Kilotonnen Glas, das jedoch in der Regel zu Schaumglas verwertet wird. Im Maximierungspfad wird zusätzlich von Kunststoffrückgewinnung sowie von recyceltem Glas in Closed-Loop-Qualität ausgegangen – damit steigert sich die jährliche BWS um zusätzliche 400 Mio. Euro.

¹⁹⁰ EU-Comtrade, einschl. Rohform, Pulverform, Halbzeugform, vgl. WITS (2026).

¹⁹¹ Nach BCG-Analyse kann die Förderung mit der wachsenden Nachfrage nicht Schritt halten; seit 2021 besteht ein Angebotsdefizit, und sowohl primäre als auch sekundäre Produktion zeigen kurzfristig keine Dynamik. Da über drei Viertel des Silbers als Nebenprodukt anderer Metalle anfällt, reagiert das Angebot nur begrenzt auf Preisimpulse.

¹⁹² EEA (2021). Ein Teil der Anlagen und Komponenten wird jedoch zunächst zur Wiedernutzung exportiert und steht deswegen kurzfristig für das Recycling nicht zur Verfügung – dies ist in Modellierungen berücksichtigt.

¹⁹³ Wind Europe (2020).

¹⁹⁴ RWE (2025).

¹⁹⁵ Davon fallen ca. 20 Mio. Euro auf seltene Erden und 30 Mio. Euro auf Verbundstoffe.



***Second-Life*-Batterien sind – ähnlich wie V2G – ein zusätzlicher Hebel, um den Materialbedarf für den Ausbau von Speicherkapazitäten zu reduzieren.** Bis 2045 könnten jährlich bis zu 315.000 EV-LFP-Batterien ihr Lebensende erreichen, für die eine Anschlussverwendung im Stromsystem möglich wäre.¹⁹⁶ Eine Weiternutzung der Hälfte dieser Kapazität könnte bereits ein zusätzliches Potenzial von 55 GWh Speicherkapazität erreichen. Theoretisch ließe sich vor allem in Kombination mit V2G die Speicherleistung je Tonne Material damit um etwa 40 % gegenüber heute erhöhen.¹⁹⁷ Zusammen mit V2G (Hebel 2a) würden bis 2045 kumuliert 7.000 bis 8.000 Tonnen weniger Lithium benötigt; dies entspricht ca. 20 % des Bedarfs für stationäre Speicher in diesem Zeitraum.

Allerdings ist der praktische Einsatz aus mehreren Gründen begrenzt, weshalb der Hebel nur im Maximierungspfad Anwendung findet: Durch technologische Fortschritte kann der Rohstoffeinsatz in Neuzellen reduziert werden, während moderne Recycling-Verfahren Materialien zunehmend hochwertig zurückführen – damit wird das Recycling für Zellen mit unklarem Zustand ökonomisch häufig attraktiver als eine Weiternutzung im *Second Life*. In jedem Fall führt eine längere Nutzungsdauer dazu, dass Rezyklate teilweise erst zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar werden, was auch im Hinblick auf die Definition von Rezyklateinsatzquoten (EU-Batterieverordnung) zu berücksichtigen ist.¹⁹⁸

¹⁹⁶ Zeigt die Annahme im Maximierungspfad. Die Berechnung ist abhängig von Exportannahmen für Altfahrzeuge (siehe Kapitel 3.3). NMC-Batterien wurden nicht berücksichtigt, da ihre Verwertung primär Recycling-getrieben ist; LFP-Batterien sind wegen ihrer höheren Zyklenfestigkeit besser für *Second Life* geeignet.

¹⁹⁷ Das würde neue Wertschöpfung in Deutschland schaffen, wenn *Second-Life*-Systeme den Import neuer Speicher ersetzen. Ein wahrscheinlicher Kannibalisierungsgrad im Inland begrenzt den Effekt jedoch.

¹⁹⁸ Ein negativer Effekt auf die Potenziale von EV-Batterie-Recycling ist im Maximierungspfad des Mobilitätssegments berücksichtigt.

Zusammenfassung: Kreislaufhebel können Ausgaben und Materialbedarf für die Energiewende senken sowie Bruttowertschöpfung und Resilienz steigern

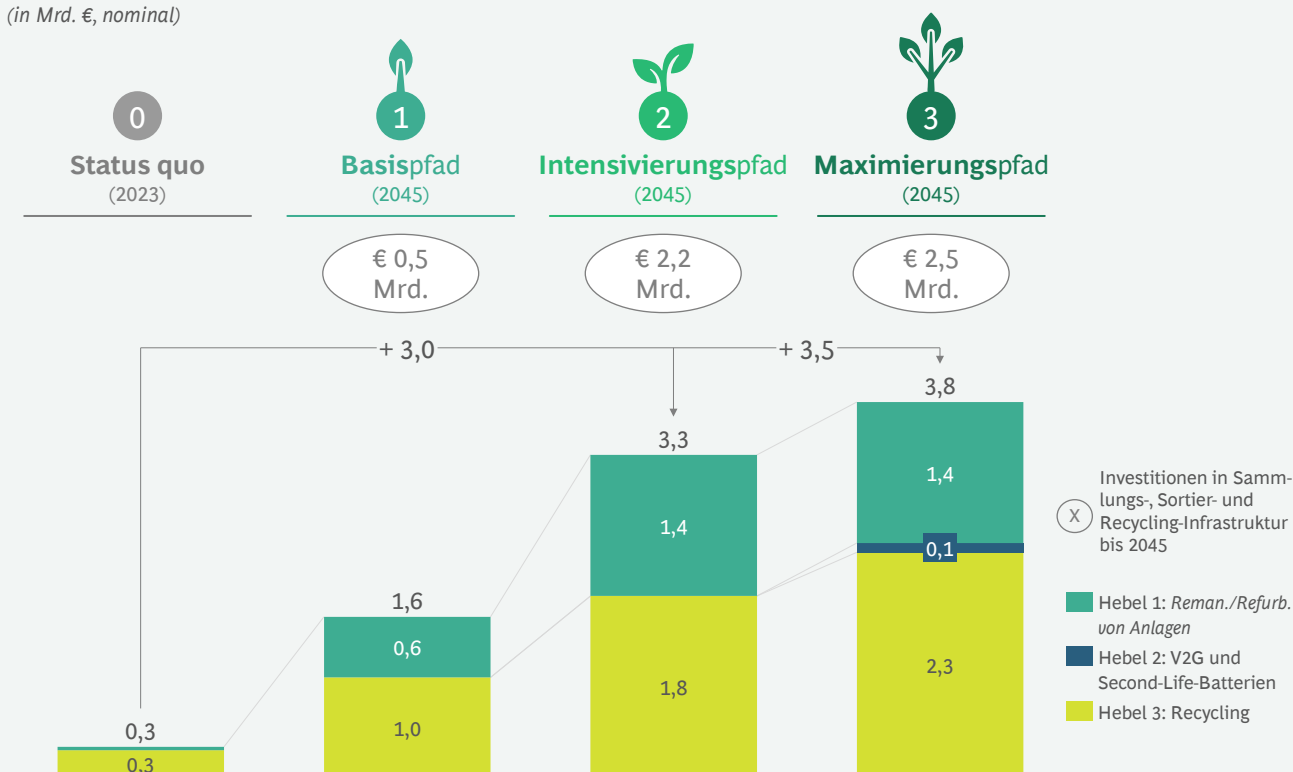
Durch den konsequenten Ausbau zirkulärer Geschäftsmodelle entlang der Wertschöpfungsketten im Segment Energie lassen sich bis 2045 erhebliche ökonomische und ökologische Effekte erzielen. Im Intensivierungspfad könnte die jährliche Bruttowertschöpfung bis 2045 um 3 Mrd. Euro gesteigert werden, getrieben durch die Produktion von Rezyklaten (Hebel 3) sowie durch das *Refurbishment* von Komponenten von Netz- und Windkraftanlagen (Hebel 1). Im Maximierungspfad würde das Potenzial durch zusätzliches Recycling jährlich um weitere 0,5 Mrd. Euro ansteigen, während Hebel 2 weitgehend bruttowertschöpfungsneutral bleibt.

Im Intensivierungspfad stünden im Vergleich zu heute fast 1 Mio. Tonnen zusätzliches Rezyklat zur Verfügung – darunter 200 Tonnen Silber, 100 Tonnen seltene Erden und 17.000 Tonnen Kupfer. Das Potenzial steigt im Maximierungspfad nochmals leicht, jedoch nicht um kritische Stoffe. Direkte Materialeinsparungen von 60.000 Tonnen im Intensivierungspfad (durch wiederverwendete Komponenten) erhöhen sich im Maximierungspfad auf 110.000 Tonnen durch *Second Life* und V2G. Zudem ließen sich erforderliche Investitionen in die Energiewende bis 2045 um insgesamt 38 Mrd. Euro im Intensivierungspfad bzw. 54 Mrd. Euro im Maximierungspfad senken – mit entsprechend dämpfendem Effekt auf Strompreise in den meisten Verbrauchergruppen.

BWS-Wachstum im Intensivierungspfad vor allem durch Wiederverwendung und Recycling getrieben

ABBILDUNG 52 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Kreislaufhebel bis 204

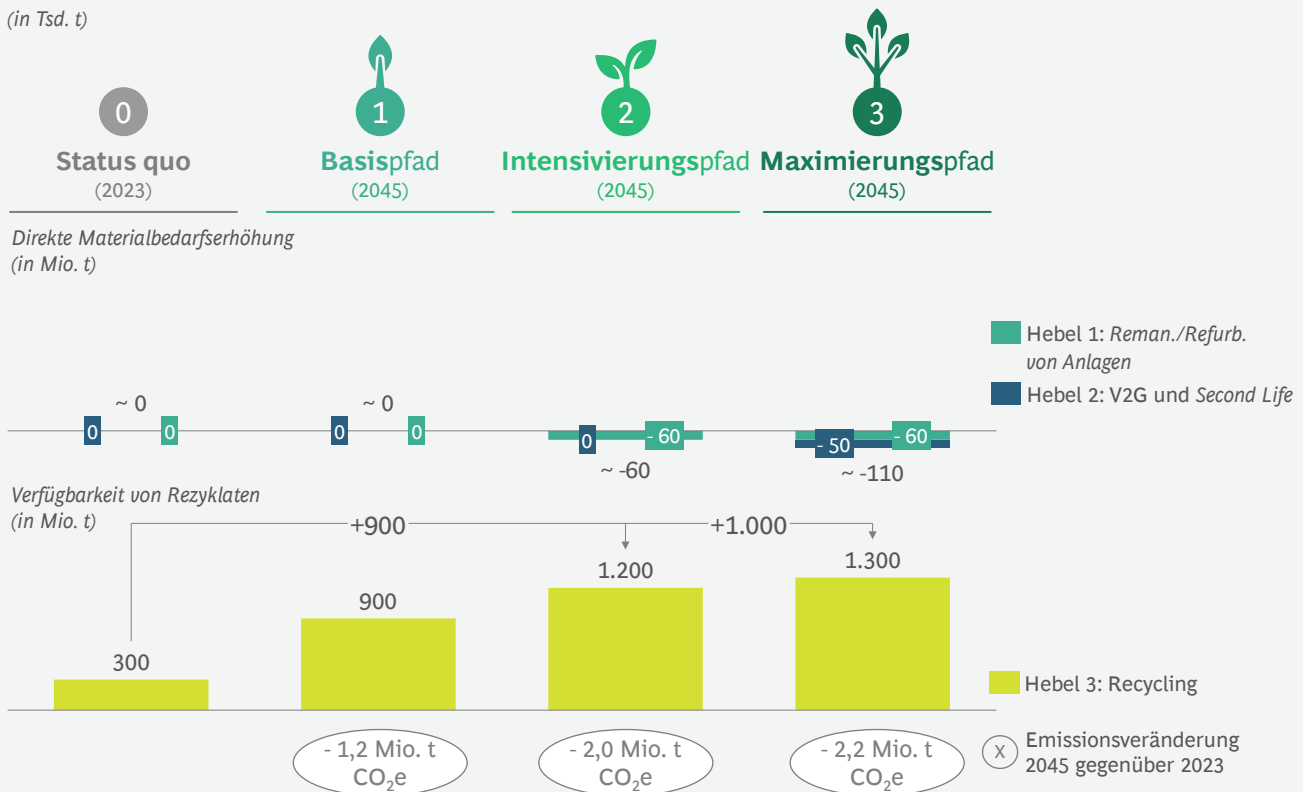
(in Mrd. €, nominal)



Rezyklatverfügbarkeit könnte bis 2045 um 900 kt gegenüber heute steigen und damit zusätzlich 2 Mio. t CO₂ reduzieren

ABBILDUNG 53 | Materialbedarfsveränderung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2045

(in Tsd. t)



3.6.4 Barrieren: Vier zentrale Hürden für die Umsetzung der Kreislaufhebel

Wie vollständig diese Potenziale tatsächlich gehoben werden können, hängt maßgeblich von der Überwindung bestehender Markt-, Kosten- und Regulierungshürden ab, die je nach Hebel sehr unterschiedlich ausgeprägt sind.

Barrieren bei Hebel 1 und Hebel 2 entstehen

überwiegend nachfrageseitig: Bei Netzbetreibern dominiert ein ausgeprägter Capex-Fokus: Neuinvestitionen erhöhen unmittelbar die regulierte Kapitalbasis und lassen sich über Netzentgelte refinanzieren, während *Refurbishment* als Opex verbucht wird und keine Erlöswirkung entfaltet. Dadurch bleibt die Nachfrage nach aufbereiteten Komponenten gering – trotz hoher technischer Verwertbarkeit. V2G ist in Deutschland bislang kaum verbreitet, da mehrere Faktoren eine breite Umsetzung bremsen: regulatorische Hürden wie die Doppelbelastung durch Abgaben und Entgelte, fehlende Standardisierung, unzureichende Marktmechanismen zur Vergütung von Flexibilität sowie Nutzerbedenken hinsichtlich einer möglichen Batteriealterung. Zudem begrenzen praktische Hürden wie fehlende Transparenz hinsichtlich des *State of Health* und

ungeklärte Gewährleistungsfragen ein großflächiges *Second-Life*-Modell.

Im Recycling bilden Kostennachteile gegenüber Primärmaterial (z. B. bei Rotorblättern) sowie günstigere Verarbeitungsoptionen im Ausland (z. B. bei Batterien) die zentralen Barrieren. Dadurch werden Investitionen in zusätzliche Kapazitäten unattraktiv, was sich in begrenzter technologischer Reife und niedrigen Verarbeitungskapazitäten widerspiegelt. Teilweise fehlt zudem ausreichender *Feedstock*, da PV-Module und Batterien oftmals exportiert oder nicht langfristig in Deutschland gehalten werden. Eine weitere Hürde ist das bislang unzureichende *Design for Recycling*, das die wirtschaftliche Verwertbarkeit vieler Komponenten zusätzlich einschränkt. Beispielsweise erschweren herstellereinspezifische und oft patentierte Wicklungstechnologien bei Elektromotoren (z. B. *Hairpin*- vs. Runddrahtwicklungen) sowie unterschiedliche Vergussmaterialien eine standardisierte Verwertung. Demgegenüber können konstruktive Anpassungen die Zerkleinerung und Aufbereitung erleichtern. Auf regulatorischer Seite stehen mengenbezogene statt materialstoffspezifische Vorgaben bei PV sowie ein fehlendes EU-weites Deponieverbot höheren Ambitionen im Weg.

Herausforderungen für alle drei Hebel vor allem in begrenzter Verwertbarkeit und unsicheren Absatzmärkten

ABBILDUNG 54 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Energiesegment

	Verfügbarkeit		Verwertung		Nachfrage	
	A) Verlust verwertbarer Abfallströme	B) Begrenzte Kreislauf- verwertbarkeit	C) Limitierte Tech.-Reife u. Verarbeitungs- kapazitäten	D) Strukturelle Kostennach- teile	E) Unsichere Absatzmärkte	F) Ein- geschränkte Anwendbarkeit
Hebel 1: <i>Reman. / Refurb.</i> von Anlagen	○	○	○	○	✗	○
Hebel 2: V2G	○	○	○	○	✗	✗
Nutzung v. Second-Life-Batterien	✗	○	○	~	✗	✗
Hebel 3: Recycling PV	✗	~	✗	~	✗	○
Recycling Windkraftanlagen	~	~	✗	✗	✗	○
Recycling Batteriespeicher	✗	~	✗	✗	✗	○

✗ Herausforderung trifft zu ○ Keine signifikante Herausforderung ~ Herausforderung trifft selektiv zu, z. B. für bestimmte Stoffströme oder Anwendungsfälle

Quelle: BCG-Analyse

Daraus ergeben sich vier zentrale Handlungsfelder, um das identifizierte Potenzial zu heben:

Auf Nachfrageseite müssen Anreize für *Remanufacturing* und *Refurbishment* gestärkt werden – insbesondere durch den Abbau des Capex-Bias im Netzausbau. Zudem sind Rechtssicherheit und geeignete Struk-

turen für die Markteinbindung von V2G erforderlich. Auf der Verwertungsseite sind wirksame Anreizmechanismen nötig sowie die Förderung von Technologiereife und Verarbeitungskapazitäten, um das Recycling von Wind-, PV- und Batteriesystemen zu verbessern.

Exkurs 10: Waste to Energy

Der Energiesektor nimmt in der Circular Economy eine Sonderrolle ein. Einerseits ist er materialintensiv und muss seinen Ressourceneinsatz sowie anfallende Abfälle reduzieren. Andererseits kann er über *Waste to Energy (WtE)* unvermeidbare Rest- und Schadstoffe aus anderen Sektoren energetisch verwerten. Durch die Verwertung dieser Restabfälle trägt *WtE* zur Lösung sektorübergreifender Abfallprobleme bei und hilft, Deponierung wirksam zu vermeiden – vorausgesetzt, alle höheren Stufen der Abfallhierarchie sind zuvor ausgeschöpft. *WtE* schleust zudem Schadstoffe aus dem Kreislauf aus: Ohne eine sichere Behandlung schadstoffhaltiger Fraktionen wäre hochwertiges Recycling oft nicht möglich. Thermische Ver-

wertung wird daher in dieser Studie nicht als Hebel für zirkuläre Wertschöpfung eingeordnet.

WtE bietet ökonomisches und ökologisches Potenzial. Deutschland verfügt über Überkapazitäten und könnte zusätzliche Bruttowertschöpfung durch die kontrollierte Annahme nicht recycelbarer Restabfälle aus Ländern mit Unterkapazitäten generieren – stets im Rahmen der abfallrechtlich zulässigen und ökologisch vertretbaren Mengen – und durch Reduzierung von dortiger Abfalldeponierung einen wichtigen Beitrag in der EU leisten. Gleichzeitig entwickelt sich *WtE* technisch weiter: Die Rückgewinnung von Reststoffen aus Verbrennungsrückständen wird fortlaufend opti-

miert (z. B. Zink oder Rostasche), und viele Anlagen sind eng mit der kommunalen Fernwärmeversorgung verzahnt. Zudem ist ein signifikanter Anteil des Restabfalls biogen (häufig ca. 50 %) und wird bilanziell als CO₂-neutral bewertet.

Die Integration von CCS- und CCUS-Technologien (Carbon Capture and Storage; Carbon Capture, Utilization and Storage) in WtE-Anlagen würde eine klimaneutrale Ausrichtung der Abfallwirtschaft bis 2045 ermöglichen. Dadurch können neue Wertschöpfungspotenziale entstehen – etwa über CO₂-Entnahmerzertifikate oder die Bereitstellung von Prozess-CO₂ für industrielle Anwendungen. Dabei sind ökonomische Herausforderungen zu adressieren: CCUS ist derzeit noch sehr energieintensiv, sodass der zusätzliche Eigenenergiebedarf die Netto-Stromerzeugung und insbesondere die Wärmeauskopplung in kommunale Fernwärmesysteme spürbar reduzieren kann. Damit könnte sich die Rolle von WtE-Anlagen teilweise von Grundlastversorgern hin zu reinen Entsorgungsanlagen mit zusätzlichem Energiebezug verschieben. Hinzu kommen hohe Investitions- und Prozesskosten, insbesondere Kosten für Transporte zu CCUS-Hubs; bei CCUS-Pfaden ist zudem der Einsatz von grünem Wasserstoff und weiterer erneuerbarer Energie erforderlich. Praktisch limitierend wirken außerdem Standort- und Platzrestriktionen. Insgesamt ist die Wirtschaftlichkeit stark vom CO₂-Preis und der Förderlogik abhängig; die Implementierung von CCUS könnte die Kosten der Abfallverbrennung tendenziell erhöhen. Diese Herausforderungen sind aber grundsätzlich überwindbar, insbesondere wenn technologischer Fortschritt hin zu effizienteren CCUS-Lösungen, der Ausbau der CO₂-Infrastruktur sowie verlässliche regulatorische und ökonomische Rahmenbedingungen konsequent zusammenspielen.

Waste to Molecules

Während WtE die Abfälle primär zur Energieerzeugung nutzt, existieren Technologien, die auf die direkte Rückgewinnung von Molekülen abzielen – zum Beispiel von Wasserstoff, Synthesegas oder chemischen Vorprodukten. Diese Moleküle können als Rohstoffe in industriellen Wertschöpfungsketten weiterverwendet werden. Auf diese Weise kann auch Kohlenstoff stofflich im Wirtschaftskreislauf verbleiben, während fossile Rohstoffe substituiert werden. Diese Ansätze werden im Folgenden als *Waste-to-Molecules*-Technologien bezeichnet; sie sind technologisch anspruchsvoll, kapitalintensiv und bislang nur in wenigen industriellen Anwendungen umgesetzt.

Mit FUREC entwickelt RWE ein zirkuläres Konzept zur Umwandlung nicht recycelbarer Abfälle in Wasserstoff und industrielle Rohstoffe. Ein zentrales Motiv ist die Abkehr von Deponierung und Verbrennung nicht recycelbarer Abfälle, um deren Potenzial als Energie- und Wasserstoff- bzw. Kohlenstoffquelle industriell nutzbar zu machen. Kern des FUREC-Ansatzes ist die Erzeugung eines homogenen, industriell nutzbaren Rohstoffstroms aus heterogenen Abfallströmen durch die Herstellung von *Solid-Recovered-Fuel*-(SRF-)Pellets aus getrocknetem und sortiertem Hausmüll. Eine innovative Aufbereitungstechnologie ermöglicht dabei zusätzlich die Rückgewinnung von Wertstoffen (Metalle, Glas und Steine), die bei konventioneller Abfallverarbeitung ungenutzt bleiben würden. Die SRF-Pellets werden anschließend – ggf. ergänzt durch Klärschlamm – zum Industriecenter Chemelot in der niederländischen Provinz Limburg transportiert und dort zu Wasserstoff umgewandelt.

Die Wertschöpfungskette von FUREC umfasst fünf wesentliche Schritte:

1. **Sammlung und Sortierung** nicht recycelbarer Siedlungsabfälle vor Ort
2. **Vorbehandlung und Pelletierung** in einer speziell errichteten Aufbereitungsanlage (inkl. Rückgewinnung von Metallen, Glas und Steinen)
3. **Transport** der SRF-Pellets zum Industriecenter
4. **Wasserstoffproduktion** durch thermochemische Umwandlung (Torrefizierung, Mahlung, Flugstromvergasung)
5. **Industrielle Nutzung** von Wasserstoff (u. a. Ammoniak) sowie Bereitstellung von **reinem CO₂** für Nutzung/Speicherung

FUREC schafft durch sektorübergreifende Zusammenarbeit ökologische und ökonomische Mehrwerte entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Beteiligt sind kommunale und regionale Abfallentsorger (Bereitstellung), Unternehmen im Chemelot-Cluster¹⁹⁹ (Abnahme von Wasserstoff/CO₂) sowie RWE als Koordinator des Gesamtsystems. Daraus ergeben sich Mehrwerte für alle Beteiligten – von der Reduzierung zu deponierender oder zu verbrennender Abfälle über eine verlässliche Versorgung mit klimafreundlichem Wasserstoff in industriellen Mengen bis hin zu regionaler Wertschöpfung und Klimaschutz: Die Anlage ist auf die Verarbeitung von 700.000 Tonnen Abfall pro Jahr ausgelegt und soll jährlich ca. 54.000 Tonnen Wasserstoff produzieren, der unter anderem in Ammoniak-Produktionsanlagen am Standort genutzt

¹⁹⁹ Industrie- und Chemiapark in den Niederlanden mit einem integrierten Verbund aus Chemie-, Energie- und Werkstoffunternehmen.

Mit FUREC wird die Verbrennung von Restmüll vermieden und 400 kt an CO₂ ersetzt

ABBILDUNG 55 | Fünf wesentliche Schritte der Wertschöpfungskette von FUREC



Quelle: BCG-Analyse

wird. Parallel dazu soll reines CO₂ anfallen, das ohne zusätzlichen Energieaufwand für künftige Nutzung oder Speicherung bereitgestellt werden kann. Über die ersten zehn Betriebsjahre wird eine Einsparung von 3,61 Mio. Tonnen CO₂e erwartet. Darüber hinaus schafft das Projekt 125 direkte Arbeitsplätze in der Region und stärkt das Know-how im Bereich Circular Economy und Wasserstofftechnologie am Standort Chemelot. Durch die Produktion recycelter chemischer Rohstoffe aus nicht recycelbarem Abfall unterstützt FUREC die Ziele des *Circular Economy Action Plan* und trägt zur Unabhängigkeit der europäischen Chemieindustrie von fossilem Erdgas bei. Das Projekt wird durch den EU-Innovationsfonds mit 108 Mio. Euro gefördert. Die geschätzten Gesamtkapitalausgaben (Capex) liegen bei über 1 Mrd. Euro.

FUREC Limburg dient als Vorbild für einen möglichen Rollout. Parallel zur Projektentwicklung werden Folgeprojekte geprüft, da Anlagen- und Prozesskonzept grundsätzlich auf weitere Standorte mit großen Chemieindustrie-Clustern übertragbar sind. Die Skalierung ist jedoch mit Herausforderungen verbunden, dazu zählen insbesondere die Heterogenität des Abfalls, der hohe Kapitaleinsatz, die Integration mehrerer Prozessschritte sowie die Sicherstellung ausreichender und qualitativ konstanter Abfallmengen. Zudem beeinflussen Akzeptanz, Zusammenarbeit der beteiligten Akteure und Regionen sowie gesetzliche und regulatorische Rahmenbedingungen in der Abfall- und Wasserstoffwirtschaft maßgeblich den Ausbau. FUREC zeigt, wie nicht recycelbare Abfälle zu einer strategischen Ressource werden und durch die Herstellung von Molekülen ein Kreislaufmodell für Dekarbonisierung und Circular Economy ermöglichen.

3.7 Textil: Kreislaufhebel ermöglichen umfangreiche Wertschöpfungsverlagerung nach Deutschland

Zusammenfassung

- Durch konsequente Umsetzung von *Reuse*-Modellen, die Skalierung von Recycling-Aktivitäten sowie den dafür notwendigen Ausbau von Sammlung und Sortierung könnte im Optimalfall die Bruttowertschöpfung bis 2045 gegenüber 2023 um 2,2 bis 5,4 Mrd. Euro steigen.
- Reduzierte Stoffstromverluste und optimierte Verwertungswege ermöglichen bis 2045 eine Reduzierung der Verbrennungsanteile um 9 bis 19 Prozentpunkte sowie eine Steigerung der Rezyklatverfügbarkeit um 340.000 bis 620.000 Tonnen.
- **Skalierte Infrastruktur und gesicherte Nachfrage sind entscheidend:** Um das Bruttowertschöpfungspotenzial zu heben und eine optimierte stoffliche Nutzung zu ermöglichen, haben Ausbau und Weiterentwicklung von Sortier- und Recycling-Technologien sowie die Stärkung der Absatzmärkte zentrale Bedeutung.

3.7.1 Kontext: Zunehmende Abfallmengen und verschärfte regulatorische Anforderungen erzeugen Transformationsdruck

Die globale Textilabfallmenge steigt seit Jahren stark an. Die globale Faserproduktion hat sich zwischen 2000 und 2025 mehr als verdoppelt²⁰⁰ und treibt das Abfallaufkommen von ca. 120 Mio. Tonnen im Jahr 2024 auf voraussichtlich 150 Mio. Tonnen bis 2030.²⁰¹ Die Hauptursachen sind verkürzte Nutzungsdauern, schnellere Produktzyklen, sinkende Preise sowie durch digitale Kanäle und Geschäftsmodelle wie Fast Fashion beschleunigte Sortimentswechsel und Trendzyklen. Zirkuläre Geschäftsmodelle wachsen zwar dynamisch, erreichen mit einem globalen Marktanteil von ca. 3,5 %²⁰² jedoch nur eine kleine Basis und können das steigende Abfallaufkommen bislang nicht spürbar abfedern. In Deutschland wird ein deutlicher Anstieg der

jährlich anfallenden Alttextilmengen²⁰³ erwartet, von etwa 2,5 Mio. Tonnen im Jahr 2023 auf über 3 Mio. Tonnen bis 2035 und bis zu 3,5 Mio. Tonnen bis 2045.²⁰⁴ Diese Entwicklung macht die strukturelle Relevanz des Textilaufkommens und den Druck auf die Verwertungssysteme sichtbar.

Das Textilaufkommen wird wesentlich von post-Konsumenten-bedingten Bekleidungstextilien geprägt. 2023 entfielen ca. 1,5 Mio. Tonnen auf Bekleidung – mehr als die Hälfte des gesamten Textilabfallaufkommens.²⁰⁵ Die verbrauchernahen Kategorien Bekleidung, Schuhe, Gebrauchstextilien und Wohntextilien bilden den mengenbestimmenden Kern, während industrielle Textilien eine untergeordnete Rolle spielen.²⁰⁶ Der Großteil des Aufkommens aus den Kernkategorien entfällt mit ca. 85 % auf Post-Konsumenten-Ströme. Diese entstehen hochgradig dezentral und unterscheiden sich deutlich von gebündelten post-industriellen²⁰⁷ oder vor-Konsumenten-bedingten²⁰⁸ Materialflüssen. Die räumlich verstreute Abfallentstehung erschwert eine effiziente Erfassung und Sortierung und macht Post-Konsumenten-Material zum zentralen Ansatzpunkt der zirkulären Transformation.

Strengere europäische Vorgaben und erweiterte Herstellerverantwortung erhöhen den Transformationsdruck entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Um Abfallmengen zu reduzieren, Umweltbelastungen zu senken und lineare Stoffströme zu zirkularisieren, verschärft die EU ihre Textilpolitik deutlich. Ab 2025 wird die getrennte Sammlung von Alttextilien in allen Mitgliedstaaten verpflichtend. Parallel entstehen europaweit *EPR*-Systeme (*Extended Producer Responsibility*) für Textilien (Einführung 2025 – 2027), die die Verantwortung der Hersteller für die Phase nach dem Konsum erhöhen, insbesondere Sammlung, Sortierung und Verwertung von Alttextilien adressieren und eine enge Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette erfordern. Mit der *Öcodesign*-Verordnung für nachhaltige Produkte (*Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR*) entsteht ab 2026 schrittweise ein verbindlicher Rahmen für Produktanforderungen, unter anderem im Hinblick auf Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Materialtrennung und digitale Produktpässe. Diese Anforderungen werden über dele-

²⁰⁰ 57,85 Mio. Tonnen im Jahr 2000; 139,7 Mio. Tonnen im Jahr 2025; vgl. Textile Exchange (2025).

²⁰¹ Sajdeh et al. (2025).

²⁰² BCG-Analyse sowie Ellen MacArthur Foundation (2021).

²⁰³ Aus Bekleidung, Schuhen sowie Gebrauchs- und Wohntextilien; Gebrauchstextilien werden im Folgenden verstanden als Küchen- und Badtextilien, Bettwäsche und Vorhänge; Wohntextilien werden verstanden als Teppiche, Matratzen sowie textile Anteile von Polstern und Möbeln.

²⁰⁴ BCG-Analyse.

²⁰⁵ BCG-Analyse.

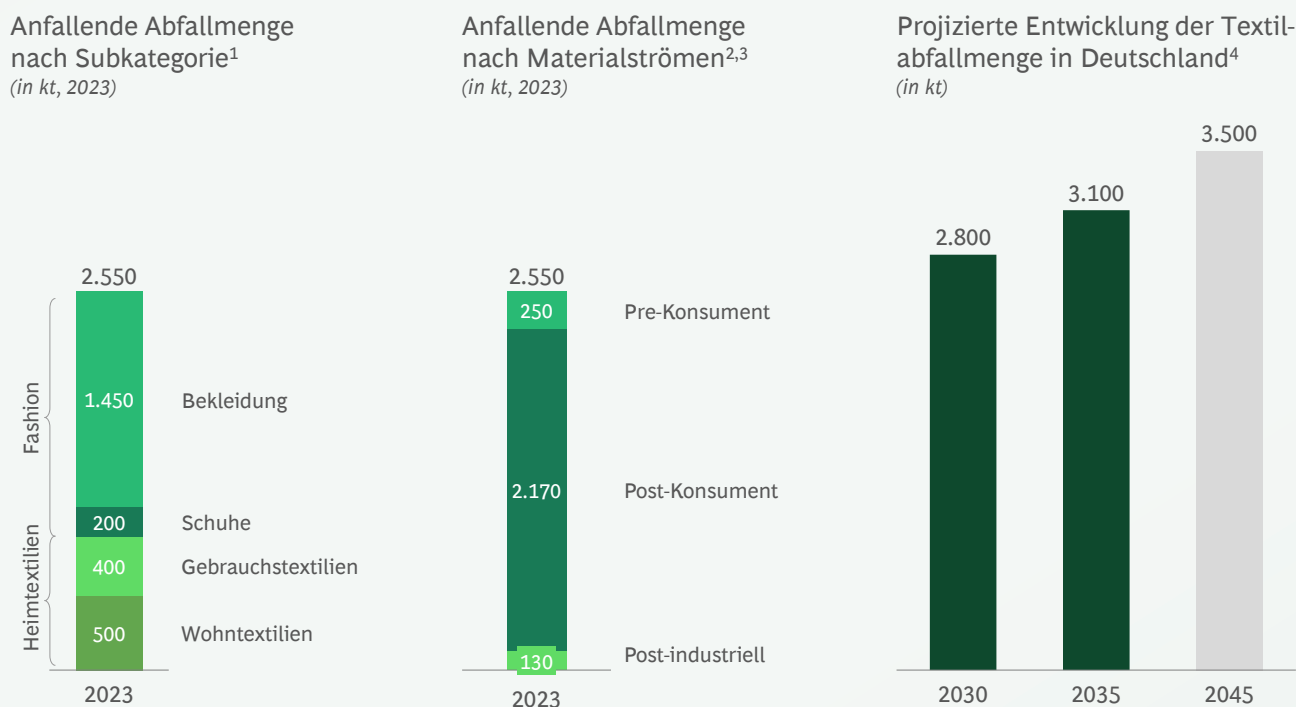
²⁰⁶ BCG-Analyse. Industrielle Textilien werden im Folgenden verstanden als Textilien für technische und industrielle Anwendungen, beispielsweise Fahrzeuginterieur-Textilien, Filter- und Vliesstoffe oder Schutzkleidung; Abfallmengen industrieller Textilien sind in späteren quantitativen Analysen mengenbedingt nicht berücksichtigt.

²⁰⁷ Bezieht sich auf industrielle Abfälle bzw. Produktionsabfälle, z. B. Zuschnittabfälle.

²⁰⁸ Bezieht sich auf konfektionierte (Fertig-)Produkte.

Anstieg der Textilabfallmengen auf rund 3,5 Mio. t in Deutschland erwartet

ABBILDUNG 56 | Quantifizierung des Mengengerüsts textiler Abfallströme



1. Nur für Fokus-Textilkategorien: Bekleidung, Schuhe, Gebrauchstextilien und Haustextilien 2. Pre-Konsument = Deadstock; post-Konsument = Abfall nach Verbrauch, klassische Altkleider; post-industriell = Nebenprodukte und Produktionsabfälle 3. Übereinstimmend mit DIN EN ISO 14021, pre-Konsument nach Norm hier differenziert in pre-Konsument und post-industriell 4. Werte bis 2035 aus BCG-Analyse, Wachstum 2035 – 2045 linear projiziert auf Basis des Wachstums 2023 – 2035
Quelle: BCG-Analyse

gierte Rechtsakte konkretisiert, wobei Textilien im Arbeitsplan 2025 – 2030 als eine der priorisierten Produktgruppen festgelegt sind.²⁰⁹ Ergänzend verschärfen die EU-Textilstrategie und die überarbeitete Verordnung über die Verbringung von Abfällen (*Waste Shipment Regulation*) seit 2024 Exportanforderungen und begrenzen die Ausfuhr nicht verwertbarer Alttextilien in Länder ohne ausreichende Verwertungsstrukturen.

Die industrielle Wertschöpfung der (deutschen) Textilwirtschaft wird heute vor allem in den hochvolumigen Bekleidungssegmenten überwiegend im Ausland realisiert. In Deutschland werden vor allem technische Textilien für spezialisierte Anwendungen industriell produziert. Die gesamte Bruttowertschöpfung der Textilwirtschaft liegt bei ca. 27 Mrd. Euro, wovon etwa zwei Drittel im Groß- und Einzelhandel erwirtschaftet werden. Damit macht die Branche insgesamt nur ca. 2 % der gesamten industriellen Wertschöpfung aus. Die Wertschöpfungskette der Bekleidungsindustrie ist durch eine weitgehende Aus-

lagerung der Produktion geprägt: Herstellung von Fasern, Stoffen und Bekleidung sowie hochwertige Produktions- und Verwertungsprozesse finden überwiegend im Ausland, insbesondere in Asien, statt. Deutschland fungiert damit primär als Konsum- und Absatzmarkt, während zentrale industrielle Schritte kaum im Inland verankert sind. Diese Entkopplung von Produktion im Ausland und Abfallaufkommen im Inland verleiht dem Textilstrom trotz eines Anteils von < 1 %²¹⁰ am Gesamtaufkommen systemische Relevanz, erschwert den Aufbau regional geschlossener Kreisläufe und stabilisiert ein weitgehend lineares *Take-Make-Waste-System*.

²⁰⁹ Europäische Kommission (2025c).

²¹⁰ Gesamtabfall 380 Mio. Tonnen im Jahr 2023, vgl. Destatis (2026b).

3.7.2 Status quo: Trotz hoher Sammelquote bleibt die Textilverwertung linear mit Export- und Verbrennungsverlusten

Segment auf einen Blick

	Bruttowertschöpfung	€ 27 Mrd.
	Anteil thermischer Verw. Textiler Abfälle	~ 27 %
	Separate Sammlung textiler Abfälle	~ 64 %
	Exportquote gesamelter Abfälle	~ 80 %

Trotz hoher Sammelquote bleiben erhebliche Mengen außerhalb des Kreislaufs und gehen in Verbrennung und Export verloren. Nach der Nutzung gelangen Textilien in Deutschland über unterschiedliche Kanäle in die Erfassung, zum Beispiel durch Straßensammelcontainer, kommunale Sammelstellen, soziale Träger oder für post-industrielle Ströme durch spezialisierte Wertstoffakteure. So erreichte Deutschland 2024 eine Sammelquote von ca. 64 % (siehe Abbildung 58)²¹¹, deutlich über dem europäischen Durchschnitt. Neben der Abgabe tragfähiger Bekleidung über Sammelcontainer beeinflusst auch die Direktvermarktung weiterhin nutzbarer Textilien durch Verbraucher maßgeblich die Zusammensetzung und Diversifizierung der textilen Abfallströme. Gleichzeitig werden etwa 25 %²¹² der Alttextilien weiterhin über den Restmüll entsorgt, der zu 87 %²¹³ thermisch verwertet wird, sodass Material und Wert vollständig verloren gehen.²¹⁴ Auch von den erfassten Mengen verbleibt nur ein Teil im Kreislauf. Kapazitätsbedingt werden derzeit nur etwa 20 %²¹⁵ der gesammelten Textilien in Deutschland sortiert, und die Mengen werden überwiegend unsortiert exportiert.²¹⁶ Die Sortie-

²¹¹ BMUKN (2025).

²¹² Öko-Institut (2024).

²¹³ Hailo (2025).

²¹⁴ Insgesamt ergibt sich ein Verbrennungsanteil von ca. 27 %: Etwa 25 % der Textilien werden über den Restmüll entsorgt, wovon 87 % verbrannt werden; hinzu kommt eine Verbrennung von 8 % separat gesamelter Textilien, vgl. Öko-Institut (2024).

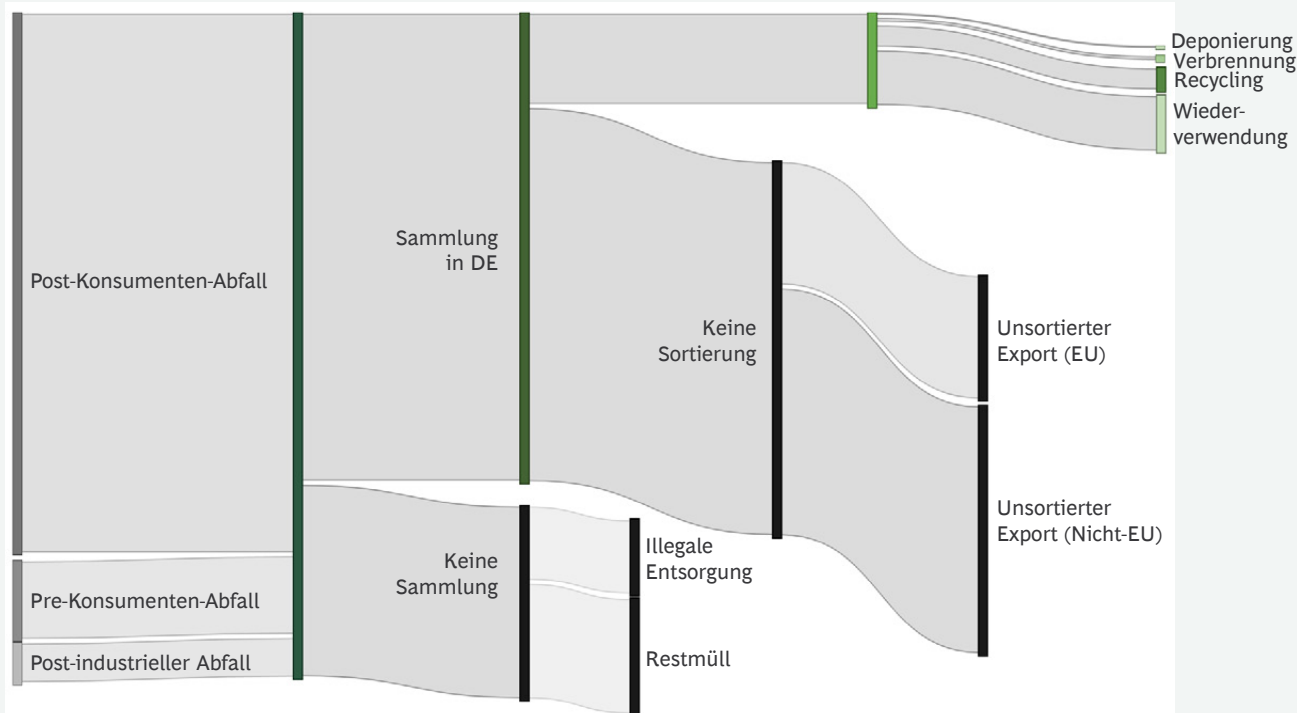
²¹⁵ Fashion for Good (2022).

²¹⁶ Die Exportanteile unsortierter Alttextilien entfallen zu etwa einem Drittel auf EU-Länder, zu zwei Dritteln auf Nicht-EU-Länder (BCG-Analyse).

Nur ein Bruchteil der deutschen Textilabfälle wird im Land stofflich verwertet oder wiederverwendet; geringe Transparenz über exportierte Stoffströme

ABBILDUNG 57 | Materialströme von Textilabfällen in Deutschland

(Richtwerte)



Quelle: BCG-Analyse, Textile Waste at a Tipping Point; Öko-Institut

rung im In- und Ausland erfolgt weitgehend manuell, wobei heterogene Qualitäten und Mischtextilien die Trennung erschweren und den Anteil wirtschaftlich verwertbarer Fraktionen begrenzen. Ein großer Teil der sortierten Textilien wird anschließend erneut exportiert, häufig in Nicht-EU-Länder, mit eingeschränkter Nachvollziehbarkeit, ob diese tatsächlich wiederverwendet, recycelt, verbrannt oder deponiert werden. Es bleibt anzumerken, dass Erfassung und Nachverfolgung von Alttextilien heute entlang der gesamten Entsorgungs- und Verwertungskette nur eingeschränkt transparent ist, da Erhebungen fragmentiert erfolgen und wesentliche Stoffströme – insbesondere Exporte – statistisch nicht konsistent abgebildet sind.

Reuse innerhalb Deutschlands und der EU bleibt auf hochwertige Nischen beschränkt, breite Marktsegmente sind stark exportorientiert. Der deutsche Alttextil-Feedstock verfügt über eine überdurchschnittliche Qualität und ist sowohl für Reuse als auch für Recycling stark nachgefragt.²¹⁷ Aus der Sortierung fließen vor allem Spitzenqualitäten in deutsche und europäische Wiederverwendungskanäle, nur

ca. 2 %²¹⁸ der sortierten Textilmenge werden in Deutschland und etwa 10 %²¹⁹ innerhalb der EU vermarktet. Der überwiegende Teil, insbesondere mittlere und gemischte Qualitäten, geht in Nicht-EU-Länder, sodass die offiziell ausgewiesenen hohen Wiederverwendungsanteile von ca. 62 %²²⁰ unter heutigen Bedingungen nur eingeschränkt verifizierbar sind. Parallel entziehen *Peer-to-Peer-Resale*-Kanäle und markenintegrierte Rücknahmeprogramme zunehmend hochwertige Ware den öffentlichen Sammelströmen, daher ist dort ein sinkendes durchschnittliches Qualitätsniveau zu erwarten.

Die heutige stoffliche Verwertung beruht überwiegend auf Open-Loop-Recycling; Faser-zu-Faser-Recycling steht noch am Anfang der Industrialisierung. Im *Open-Loop*-Recycling entstehen aus gemischten Eingangsstoffen vor allem nicht spinnbare Fasern, zum Beispiel für Vliesstoffe, Putzlappen oder Füllmaterialien. Diese Wege ermöglichen eine grundsätzliche Materialnutzung, erhalten aber die Faserqualität nur begrenzt und führen selten zurück in textilnahe Anwendungen. Während die Sortierung der Alt-

²¹⁷ BCG-Analyse.

²¹⁸ Zum Anteil der sortierten Textilmenge vgl. Öko-Institut (2024).

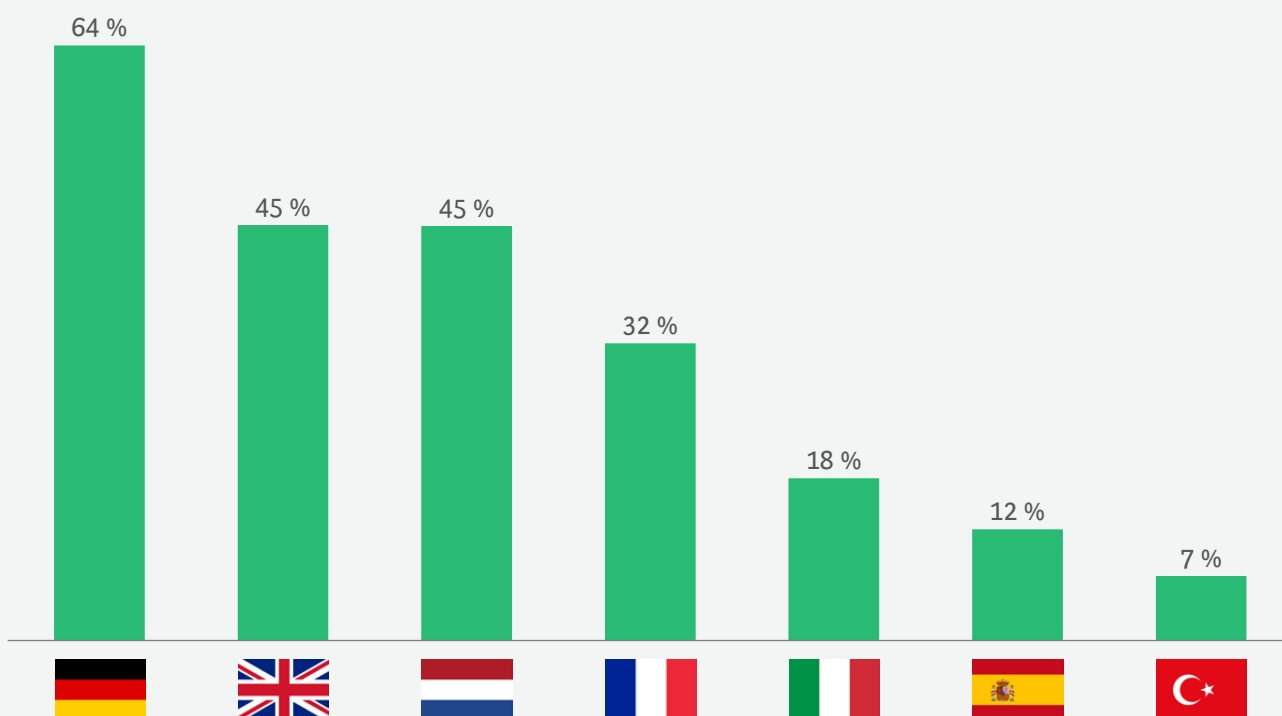
²¹⁹ Fashion for Good (2022).

²²⁰ Öko-Institut (2024).

Deutschland bei Sammelquoten textiler Abfälle europaweit führend

ABBILDUNG 58 | Sammelquoten textiler Abfälle in ausgewählten Ländern

(in %, 2022)



Quelle: Deutsche Umweltagentur; WRAP; Circle Economy; ReFashion; EU JRC; Fashion for Good; BCG-Analyse

■ 2022

textilien heute primär auf Wiederverwendung ausgerichtet ist, findet eine gezielte Sortierung für Recycling-Zwecke bislang kaum statt, da die wirtschaftliche Wertschöpfung hierfür begrenzt ist. Mechanisches Recycling ist derzeit die wirtschaftlichste und umweltverträglichste Methode zur Aufbereitung von Alttextilien, da diese mit vergleichsweise einfachen Prozessen schnell und effizient verarbeitet werden können – in begrenztem Umfang können damit bereits spinnbare Fasern erzeugt werden. Das vorhandene Potenzial mechanischer Recycling-Verfahren wird jedoch bislang nicht ausgeschöpft, da auf Anwenderseite (insbesondere in Teilen des Heimtextilmarktes) noch ein unzureichendes Bewusstsein für die Einsatzmöglichkeiten recycelter Fasern besteht. Das chemische Recycling bietet hingegen die Möglichkeit, künftig auch Materialmischungen chemisch sortenrein zu trennen, spinnbare Fasern in höherer Qualität zurückzugewinnen und dadurch einen höheren Materialwert zu erzielen. Im Status quo befinden sich diese Technologien überwiegend in einer Pilotierungs- bzw. frühen Skalierungsphase, mit noch begrenzten industriellen Kapazitäten und wirtschaftlichen Anwendungsmöglichkeiten.

3.7.3 Potenzial: Kreislaufhebel können Wertschöpfungsschritte nach Deutschland verlagern

Kreislaufhebel und spezifische Treiber eröffnen im Textilsegment ein außergewöhnlich hohes Potenzial für zirkuläre Transformation und inländische Wertschöpfung. Sie adressieren zentrale strukturelle Defizite wie hohe Stoffstromverluste, geringe inländische Sortier- und Recycling-Kapazitäten sowie hohe Exportanteile mit weitgehend intransparentem Materialverbleib und tragen dazu bei, Material im System zu halten, Wertschöpfung nach Deutschland zurückzuverlagern und den Primärmaterialbedarf zu senken.

Übergeordnetes Ziel der Circular Economy im Textilsegment ist es, Materialien möglichst werterhaltend und über mehrere Nutzungs- und Verwertungsstufen (unabhängig von der spezifischen Abnehmerindustrie) im System zu halten und den Übergang in die Verbrennung so weit wie möglich zu verzögern oder zu vermeiden. Eine leistungsfähige, qualitätsdifferenzierte Sortierung stellt dabei den zentralen Engpass dar und ist zugleich die entscheidende Voraussetzung dafür,

TABELLE 5 | Übersicht potenzieller Kreislaufhebel im Bereich Textil

#	Hebel	Beschreibung
1	Steigerung <i>Resale</i> -Anteile	Durch <i>Resale</i> direkte Verlängerung der Produktlebenszeit, Sicherung von Material- und Werterhalt auf höchster Qualitätsstufe sowie Erzeugen neuer Wertschöpfung
2	Textil-Recycling für spinnbare Fasern	Durch Recycling zu spinnbaren Fasern Rückführung von Alttextilien in textilnahe Anwendungen, vollständige Schließung von Kreisläufen und Substitution von Primärfasern
3	Textil-Recycling für nicht spinnbare Fasern	Durch Recycling nicht spinnbarer Fasern optimale Nutzung anspruchsvoller Restmaterialien, Priorisierung stofflicher Verwertung gegenüber Verbrennung
4	Langlebige Fasern und Stoffe	<i>Grund zur Depriorisierung: Hohe Kosten und hoher Designaufwand bei geringer bzw. potenziell negativer Bruttowertschöpfungswirkung in Deutschland</i>
5	Rental-Modelle	<i>Grund zur Depriorisierung: begrenztes Potenzial, geringe Margen und niedrige lokale Bruttowertschöpfung durch überwiegend importierte Ware</i>
6	Reduzierung von Überproduktion (<i>Demand-Forecasting</i>)	<i>Grund zur Depriorisierung: Wirkung vor allem im Ausland; primär Reduktion von Deadstock, kaum zusätzliche Bruttowertschöpfung in Deutschland</i>
7	Repair-Services/ Garantiemodelle	<i>Grund zur Depriorisierung: schwer skalierbar und stark vom Konsumentenverhalten abhängig, mit begrenzten Material- und Bruttowertschöpfungseffekten</i>
8	Schnittbild-/Pattern-Optimierung	<i>Grund zur Depriorisierung: sehr geringer Effekt auf Marge und Primärmaterial, Wirkung überwiegend in Fertigungsländern</i>
#	Treiber	Beschreibung
	Sammlung und Sortierung	Erhöhung des verfügbaren <i>Feedstock</i> für <i>Reuse</i> und Recycling durch Kapazitätsausbau, Modernisierung und Automatisierung von Sammlung und Sortierung

Der Ausbau von Sammlung und Inlandsortierung ist der zentrale Treiber, um Verluste zu reduzieren und den Feedstock für *Reuse* und Recycling deutlich zu steigern

Treiber: Sammlung und Sortierung

Höhere Sammelquoten und präzisere Sortierung schaffen die notwendige Grundlage, um den Materialerhalt im Textilsystem durch *Reuse* und Recycling zu maximieren. Ein zentrales Ziel der zirkulären Textilwirtschaft ist die Senkung von Export- und Verbrennungsmengen. Dafür müssen Textilien in größerem Umfang erfasst und mit Hilfe präziser, zunehmend automatisierter Sortierung sowie unter Reduzierung von Prozesskomplexität und -kosten nach Qualität und Faserzusammensetzung den passenden *Reuse*- und Recycling-Pfaden zugewiesen werden. Die zentrale Herausforderung besteht darin, die verfügbaren Fraktionen entlang der Verwertungskaskade so zu verteilen, dass ein möglichst hochwertiger Materialerhalt sichergestellt wird sowie eine Bereitstellung von Rezyklaten, die gegenüber Frischfasern wettbewerbsfähig sind.

Im Intensivierungspfad kann der absolute *Feedstock* durch höhere Sammlungs- und Sortierkapazitäten bis 2045 um mehr als 38 % gegenüber heute gesteigert werden. Ausgehend von einer Sammelquote für Post-Konsumenten-Ströme von ca. 64 %²²¹ im Jahr 2023, liegen zusätzliche Potenziale vor allem in der Verringerung der Restmüllverluste.²²² Unter der Annahme einer Post-Konsumenten-Sammel-

quote von 75 %²²³ im Intensivierungspfad würde bis 2045 der Anteil thermisch verwerteter Textilmengen von ca. 27 %²²⁴ im Jahr 2023 auf 23 % der anfallenden Abfallmengen sinken, im Maximierungspfad mit einer Sammelquote von 85 % sogar auf 14 %. Parallel dazu reduziert der schrittweise Ausbau der Inlandsortierung weitere Verluste nach der Sammlung. Heute werden nur ca. 20 % der post-Konsumenten-bedingten Textilströme in Deutschland sortiert, der Großteil wird unsortiert exportiert, mit entsprechend begrenzter Steuerbarkeit und Wertschöpfung. Im Basispfad stiege der angenommene Anteil der Inlandsortierung bis 2045 lediglich auf etwa 25 %, im Intensivierungspfad auf 32 % und im Maximierungspfad auf 40 %.²²⁵ Gleichzeitig werden für unsortierte Exporte, insbesondere in Nicht-EU-Länder, deutliche Einschränkungen angenommen. Nicht-EU-Export-Anteile erfasster Textilien sind angenommen zu 30 % im Intensivierungspfad und 0 % im Maximierungspfad, sodass sich die absolute *Feedstock*-Menge sowohl in Deutschland als auch auf EU-Märkten deutlich erhöht. Im Intensivierungspfad ergäbe dies eine inländische Sortierkapazität von ca. 735.000 Tonnen pro Jahr (siehe Abbildung 60) und zusätzlich erforderliche Investitionen von insgesamt 200 bis 220 Mio. Euro – etwa 80 Mio. Euro mehr als im Basispfad.²²⁶

Textilien gezielt den jeweils geeigneten *Reuse*-, Recycling- oder Weiterverwertungspfaden zuzuführen. Die im Folgenden beschriebenen Kreislaufhebel umfassen konkrete zirkuläre Geschäfts- und Verwertungsmodelle, während sich die genannten Treiber auf die strukturellen und prozessualen Voraussetzungen beziehen, die zusätzlich zu den regulatorischen Rahmenbedingungen (siehe Kapitel 4) erforderlich sind.

***Reuse* verlängert die Nutzungsdauer bestehender Produkte unmittelbar und erhält den Material- und Designwert auf höchster Stufe.** Offizielle Angaben weisen zwar eine Wiederverwendungsquote von ca. 62 %²²⁷ aus, jedoch entfällt nur ein geringer Anteil

davon auf Deutschland. Ein großer Teil der *Reuse*-Mengen entsteht erst nach Export, häufig in Nicht-EU-Länder, bei starken Materialverlusten im System und weitgehend intransparentem finalem Materialverbleib. Gleichzeitig ist der Second-Hand-Markt in Deutschland mit einem Umsatzanteil von ca. 10 %²²⁸ bereits attraktiv und signalisiert eine hohe Akzeptanz bei den Konsumenten. Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel darin, durch höhere Sammelquoten und präzisere Sortierung den absoluten *Feedstock* für Wiederverwendung zu erhöhen und Exporte gezielt zu steuern. Zum einen sollen hochwertige Qualitäten verstärkt im Inland gehalten und in tragfähige *Reuse*-Modelle überführt werden, zum anderen soll für exportierte Mengen

²²¹ BMUKN (2025).

²²² Auch in der Modellierung berücksichtigt: Gezielte Erfassung der Vor-Konsumenten-Ströme zeigt Anstieg von 94 % im Jahr 2023 auf 100 % ab 2030 sowie eine konstante Quote von 95 % bei post-industriellen Strömen. Wegen der starken Mengendominanz der Post-Konsumenten-Ströme werden hier ausschließlich diese diskutiert.

²²³ Für Post-Konsumenten-Textilströme.

²²⁴ Anteil der Verbrennung bezogen auf insgesamt anfallende Post-Konsumenten-Ströme, 8 % der separat gesammelten Textilien und 87 % der über den Restmüll entsorgten Textilien. Tatsächlicher Anteil voraussichtlich deutlich höher durch die beschriebenen Intransparenzen bzgl. der finalen Verwertung in Nicht-EU-Staaten.

²²⁵ Mengenanteile für gesammelte Mengen an Alttextilien; Annahmen für Post-Konsumenten-Ströme.

²²⁶ Kumuliert von 2026 bis 2045, im Maximierungspfad zusätzliche Investitionen von 150 bis 190 Mio. Euro.

²²⁷ Öko-Institut (2024).

²²⁸ Statista (2025).

Reuse steigert den Materialerhalt auf höchster Qualitätsstufe und kann wesentliche neue Wertschöpfung im Inland schaffen

HEBEL 1 | Steigerung der Resale-Anteile



sichergestellt werden, dass sie tatsächlich der Wiederverwendung zugeführt werden und nicht in intransparente Entsorgungswege abfließen.

Die Steigerung von Reuse-Mengen kann bis 2045 bei maximalem Ambitionsniveau zusätzliche Bruttowertschöpfung von bis zu 4,0 Mrd. Euro gegenüber 2023 generieren. Durch präzisere Sortierung könnten die Wiederverwendungsanteile im Inland moderat gesteigert werden, durch begrenzte Erschließung von Mengen in Spitzen- als auch in mittleren Qualitäten. Die Wertschöpfungswirkung entsteht dabei nur für Mengen, die in Deutschland verbleiben, also dort sortiert, aufbereitet und verkauft werden. Reuse-Produkte, die in Deutschland sortiert, anschließend aber in andere EU-Länder exportiert werden, generieren im Inland nur den Teil der Wertschöpfung für Sortierung, Aufbereitung und Logistik.²²⁹ Insgesamt könnten die durch vermehrte Sammlung und präzisere Sortierung zusätzlich erschlossenen Resale-Mengen bis 2045 eine weitere Bruttowertschöpfung von 1,8 Mrd. Euro im Intensivierungspfad und von bis zu 4,0 Mrd. Euro im Maximierungspfad erzeugen. Zudem könnte im Maximierungspfad unter der Annahme einer durch

Second-Hand-Produkte erzielten Neukauf-Vermeidungsquote von bis zu 40 %²³⁰ bis 2045 eine Reduktion des Materialbedarfs von insgesamt 110.000 Tonnen gegenüber 2023 erreicht werden.

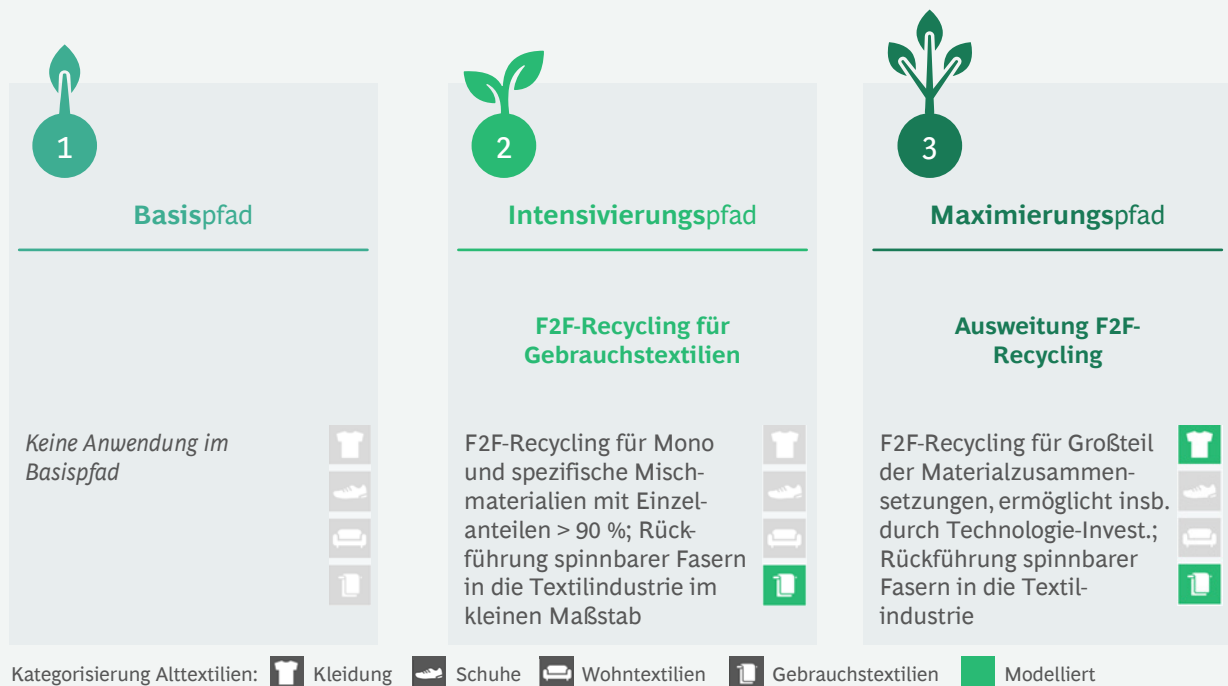
Trotz heute bestehender Herausforderungen ist Faser-zu-Faser-Recycling ein entscheidender Hebel zur vollständigen Schließung textiler Materialkreisläufe. Geeignete, weitgehend sortenreine Textilien werden zu neuen spinnbaren Fasern verarbeitet, die Primärfasern ersetzen, einen Wiedereinsatz in hochwertigen textilen Anwendungen ermöglichen und damit in Summe eine hohe Werterhaltung ermöglichen, unabhängig von der jeweiligen Endabnehmerindustrie. Damit erzeugt Faser-zu-Faser-Recycling (F2F) erstmals die Perspektive eines qualitätsstabilen Closed-Loop-Systems. Heute wird F2F in geringem Maßstab vor allem über mechanisches Recycling realisiert. Dabei werden die Fasern mit jedem Verarbeitungsschritt kürzer, die Materialqualität sinkt, und textile Wiedereinsatzmöglichkeiten bleiben entsprechend begrenzt. Allerdings ist das Potenzial mechanischer Recycling-Verfahren technologisch noch nicht ausgeschöpft, durch Weiterentwicklungen entlang der Prozesskette

²²⁹ Annahme: Wertschöpfung im Inland von ca. 20 % für Neuware und 40 % für Second-Hand-Produkte.

²³⁰ Das heißt, nur 40 % der Neukäufe werden durch den Kauf von Second-Hand-Produkten tatsächlich vermieden.

Faser-zu-Faser-Recycling ermöglicht hochwertige Materialkreisläufe und substituiert Primärmaterialien durch Rezyklateinsatz

HEBEL 2a | Textil-Recycling für spinnbare Fasern (Closed Loop)



könnten künftig höhere Faserqualitäten und breitere textile Einsatzmöglichkeiten erreichbar sein. Zudem sind chemische, thermomechanische oder lösungsmittel- bzw. depolymerisationsbasierte *F2F*-Verfahren in der Lage, spinnbare Fasern in hoher Qualität zurückzugewinnen; sie befinden sich derzeit aber überwiegend in Pilot- und frühen Skalierungsphasen und sind noch nicht flächendeckend verfügbar. Für eine breite Umsetzung geschlossener textiler Kreisläufe sind bis 2045 daher noch erhebliche technologische Weiterentwicklungen sowie Skalierungsschritte erforderlich, insbesondere zur Sicherstellung technischer Robustheit und wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit.

Bei Erfüllung der beschriebenen Voraussetzungen könnte F2F-Recycling bis 2045 je nach Ambitionsniveau jährlich 120.000 bis 550.000 Tonnen Alttextilien verwerten und bis zu 1,4 Mrd. Euro Bruttowertschöpfung generieren (Maximierungspfad). Im Intensivierungspfad entstünden erste industrielle *F2F*-Kapazitäten von ca. 120.000 Tonnen pro Jahr – ein Szenario, das vor allem einen Vollzug der regulatorischen Vorgaben wie auch den Verbleib relevanter Textilströme innerhalb der EU voraussetzt. Die ange-

nommenen recycelbaren Mengen leiten sich aus Fraktionen der Gebrauchstextilien ab, die spezifische und insbesondere monomateriale Faserzusammensetzungen²³¹ sowie einlagige Strukturen aufweisen. Mehrlagige Textilien oder solche mit Störfaktoren (z. B. Knöpfe, Nieten, Reißverschlüsse) können nur teilweise einbezogen werden.²³² Die Fraktion, die für das *F2F*-Recycling Anwendung findet, ist also im Vergleich zum gesamten textilen Abfallaufkommen vergleichsweise klein. Gleichzeitig steht der Wiedereinsatz der gewonnenen Fasern im textilen Umfeld in direkter Konkurrenz zu Frischfaserpreisen. Die Wettbewerbsfähigkeit von *F2F*-recycelten Textilien hängt dabei maßgeblich von der Konsolidierung ausreichender Volumina zur Realisierung von Skaleneffekten sowie von der technologischen Weiterentwicklung der erforderlichen Recycling-Technologien bis 2045 ab. Im Maximierungspfad würden *F2F*-Verfahren breit skaliert. Unter der Annahme einer weiter optimierten und industriell ausgebauten Sammel- und Sortierinfrastruktur sowie fortgeschrittener Recycling-Technologien können ein Großteil der Störfaktoren entfernt, komplexere Strukturen besser getrennt und zusätzliche Materialzusammensetzungen einbezogen werden,

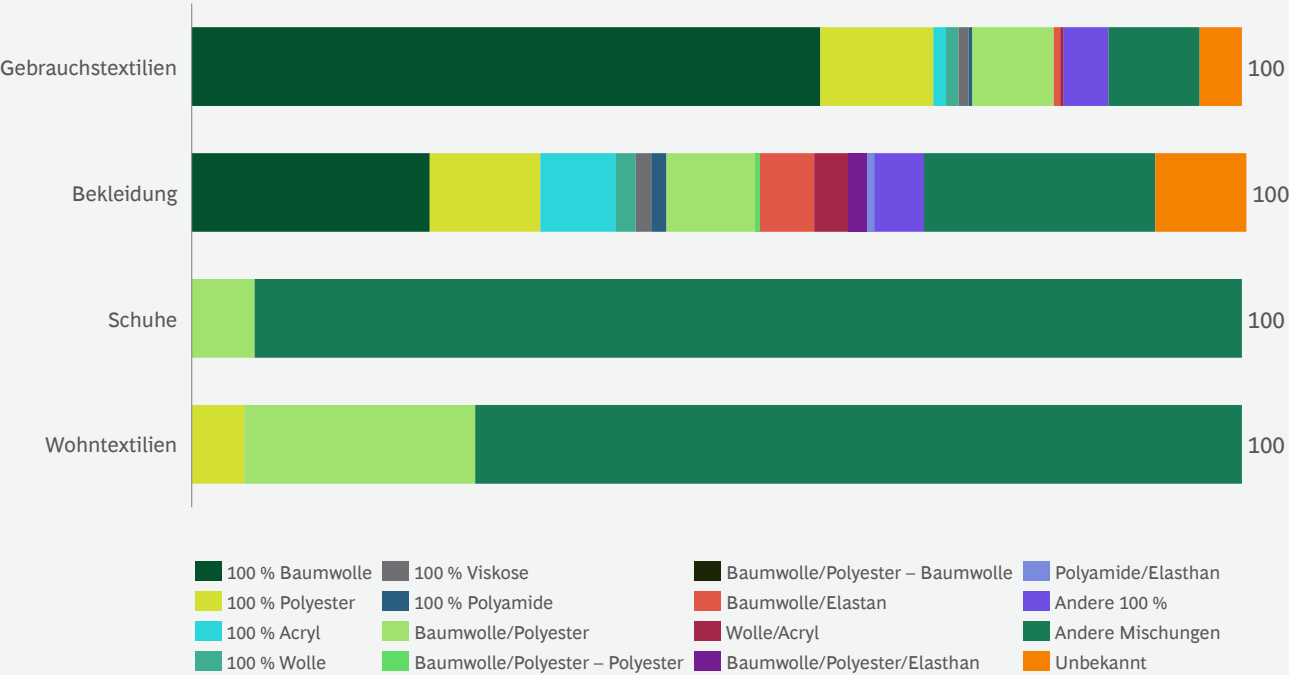
²³¹ 100 % Baumwolle/Polyester/Acryl/Wolle sowie Polycotton-Mischungen.

²³² Im Intensivierungspfad angenommene Verwertbarkeit mehrlagiger Textilien mit 16 % in 2030 und Anstieg auf 50 % in 2045.

Baumwolle und Polyester unter den meistgenutzten Faserzusammensetzungen für Textilien

ABBILDUNG 59 | Faserzusammensetzungen je Textilkategorie

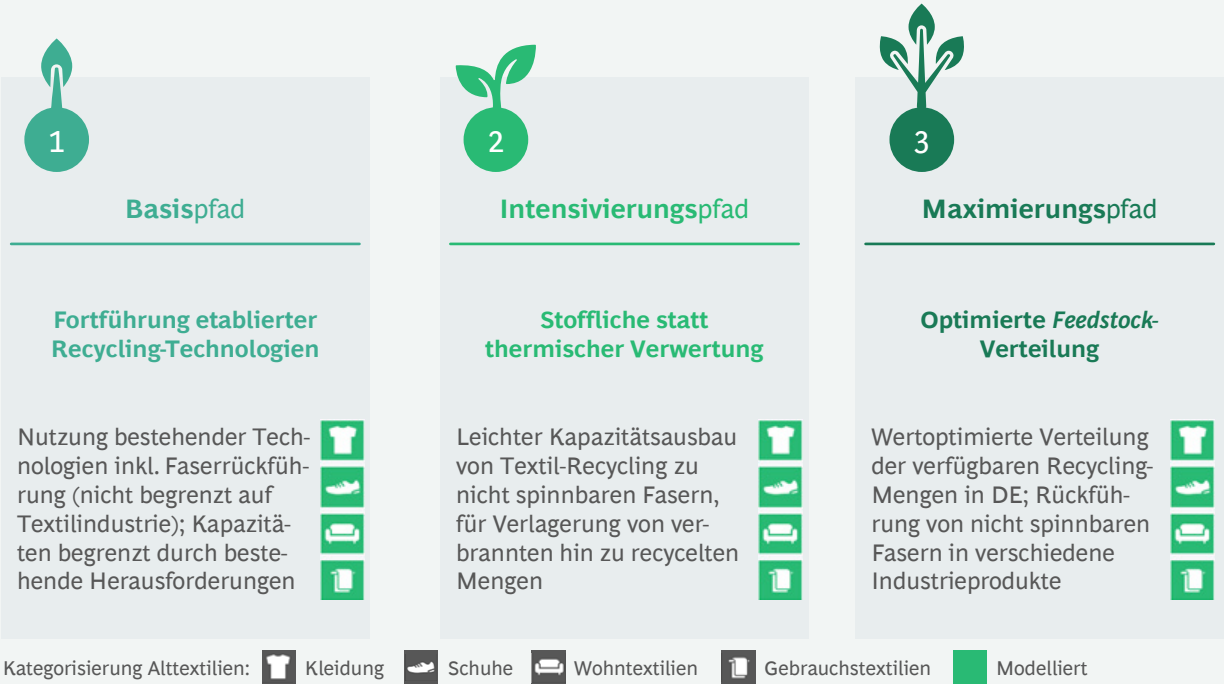
(in %)



Quelle: Ableitung aus ReFashion (2023)

Textil-Recycling bei nicht spinnbaren Fasern ergänzt Faser-zu-Faser-Lösungen und schafft stoffliche Verwertung anspruchsvoller Restfraktionen jenseits der Verbrennung

HEBEL 2b | Textil-Recycling für nicht spinnbare Fasern (Open Loop)



sodass erstmals auch relevante Teile der Bekleidungsfraktionen erschlossen würden. Ausgeschlossen blieben 2045 lediglich spezifische Multiblends.²³³ Insgesamt könnten so bis zu 550.000 Tonnen Alttextilien pro Jahr F2F-recycelt werden, etwa 18 % der bis 2045 projizierten Post-Konsumenten-Alttextilmenge über alle betrachteten Textilkategorien und Stoffströme hinweg. Durch diese hohen Recycling-Mengen könnte eine jährliche Bruttowertschöpfung von bis zu 0,3 Mrd. Euro (Intensivierungspfad) bzw. 1,4 Mrd. Euro (Maximierungspfad) geschaffen werden. Für den Kapazitätsaufbau der benötigten Recycling-Anlagen würden kumulierte Investitionen²³⁴ von bis zu 0,5 – 0,6 Mrd. Euro (Maximierungspfad) aktiviert.

Open-Loop-Recycling schließt die Lücke für Textil-mengen, die selbst unter optimierten Bedingungen nicht in F2F-Kreisläufe überführt werden können. Dazu zählen insbesondere nicht F2F-recycelbare Anteile aus Gebrauchs- und Bekleidungstextilien sowie Schuhe und Wohntextilien. Durch die Aufbereitung dieser Qualitäten entstehen langlebige Anwendungen in anderen (nichttextilen) Segmenten, zum Beispiel in der Papierindustrie oder in der Herstellung

von Dämm- und Akustikmaterialien, technischen Vliesstoffen oder Füllstoffen. *Open-Loop-Recycling* stellt die etablierte Form der stofflichen Verwertung großer, heterogener Mengen dar, bleibt jedoch durch vergleichsweise niedrige Absatzpreise in seiner wirtschaftlichen Bedeutung begrenzt.

Open-Loop-Recycling könnte bis 2045 einen wichtigen Ergänzungshebel mit begrenzter Wertschöpfung liefern und im Intensivierungspfad jährlich bis zu 370.000 Tonnen Rezyklat bereitstellen – eine Steigerung um 220.000 Tonnen gegenüber 2023. Im Intensivierungspfad würden die *Open-Loop*-Kapazitäten so ausgebaut, dass der wachsende verfügbare *Feedstock* aus Sammlung und Sortierung effizient verarbeitet werden kann. Dadurch ergäbe sich eine zusätzliche jährliche Bruttowertschöpfung von etwa 80 Mio. Euro, bei weiterhin niedrigen Preisen vieler *Open-Loop*-Rezyklate (ca. 80 – 290 Euro/Tonne²³⁵). Im Maximierungspfad fallen die *Open-Loop*-Mengen geringer aus als im Basis- und Intensivierungspfad, da ein größerer Teil der geeigneten Stoffströme in F2F-Recycling überführt würde, wo höhere Preise erzielt werden können. Das verbleibende *Open-Loop*-Recycling bliebe den-

²³³ Im Maximierungspfad angenommener Anteil von ca. 4 % der nach Materialstruktur F2F-recycelbaren Mengen, der dann in thermische Verwertung fließt.

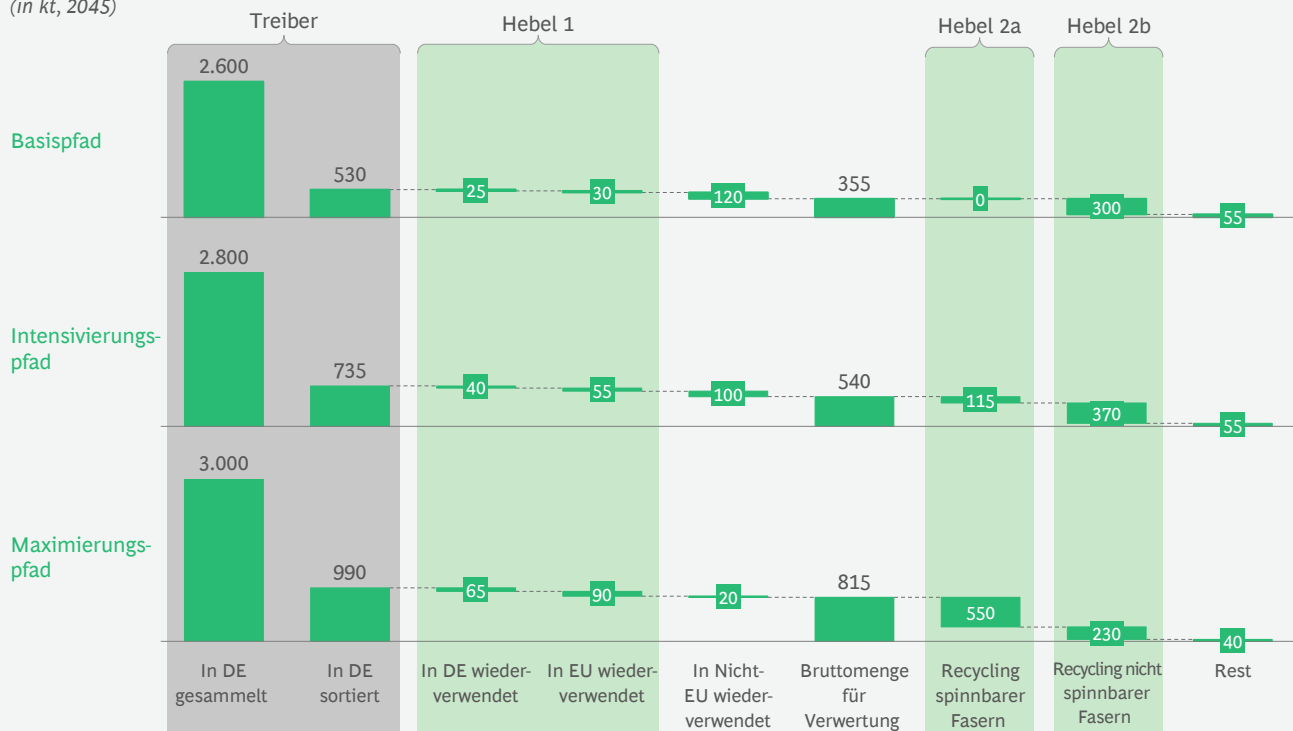
²³⁴ Von 2026 bis 2045.

²³⁵ Fashion for Good (2022).

Die Anwendung von Hebeln und Treibern erhöht wiederverwendete und verwertete Mengen entlang der Pfade

ABBILDUNG 60 | Resultierende Massenverteilungen entlang der Pfade

(in kt, 2045)



Anmerkung: Darstellung gerundeter Werte | Quelle: BCG-Analyse

noch ein zentraler Ergänzungspfad für Qualitäten, die selbst unter optimierten Sortier- und Recycling-Bedingungen nicht in geschlossene Kreisläufe überführt werden können. Damit würden im Maximierungspfad bis zu 220.000 Tonnen Alttextilien (+70.000 Tonnen gegenüber 2023) im *Open Loop* recycelt und stünden als Rezyklat zu Verfügung.

Deutschland verfügt über die technologische Basis, sich als zentraler europäischer Standort für Sortier- und Recycling-Technologien zu etablieren.

Die Kombination aus starken Ingenieur-, Maschinenbau- und Chemiekompetenzen hat das Potenzial, technologische Standards zu setzen. Zudem stellt Deutschland laut dem *GreenTech Atlas* ca. 16,5 % der weltweiten *GreenTech*-Patentanmeldungen, was auch die Circular Economy mit einschließt.²³⁶ Daraus können *Spillover*-Effekte entstehen in Form neuer Automatisierungstechnologien, weiterentwickelter Recycling-Verfahren und -Anlagen (siehe Kapitel 3.4) sowie digitaler Lösungen für Rückverfolgbarkeit und Produktpässe.

²³⁶ UBA (2025a).

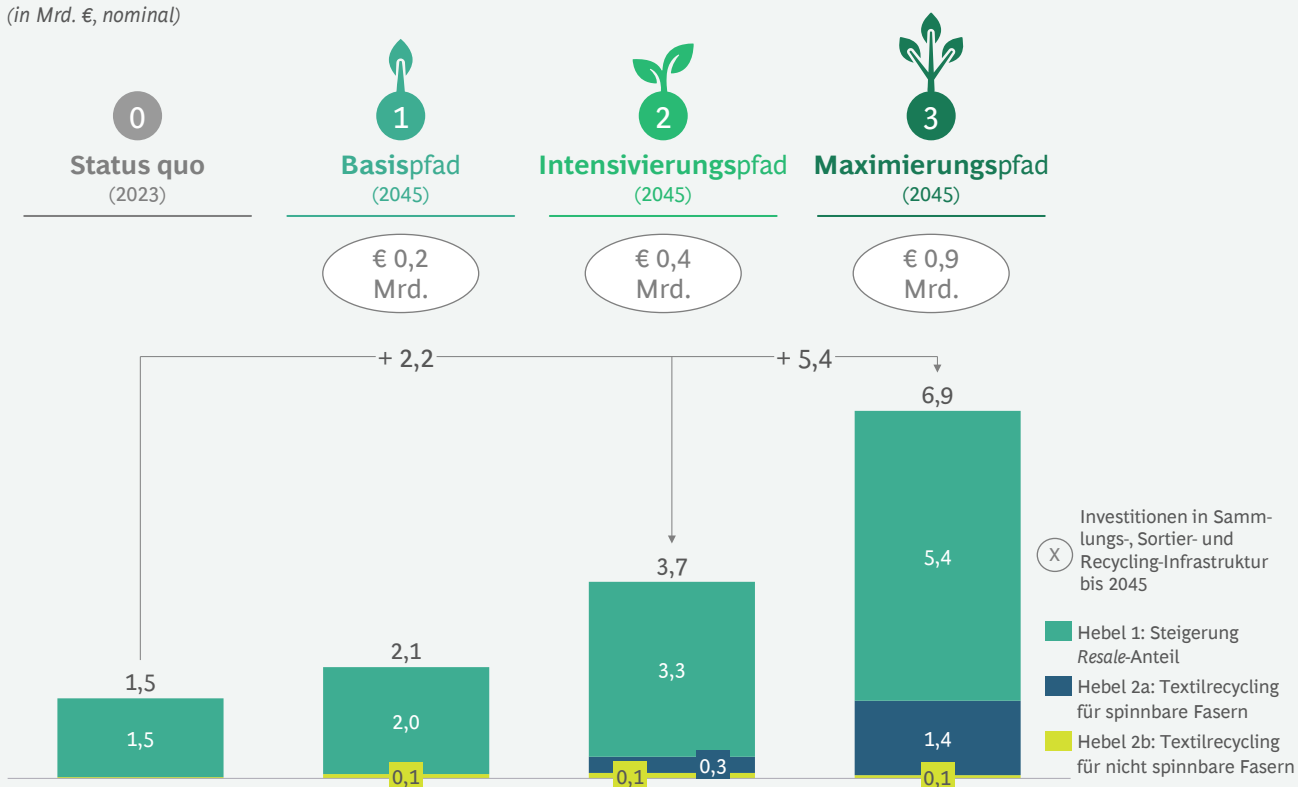
Zusammenfassung: Mit wachsender Zirkularität können Bruttowertschöpfung, Rezyklatverfügbarkeit und Materialeffizienz wesentlich gesteigert werden

Bei Umsetzung der Treiber Sammlung und Sortierung sowie der Hebel *Reuse* und Recycling könnte sich die jährliche Bruttowertschöpfung im Textilsegment bis 2045 mehr als vervierfachen. Im Intensivierungspfad könnte sie um 2,2 Mrd. Euro steigen, im Maximierungspfad um 5,4 Mrd. Euro. Dabei müssten von 2026 bis 2045 kumulierte Investitionen von 0,4 Mrd. Euro (Intensivierungspfad) bzw. 0,9 Mrd. Euro (Maximierungspfad) aktiviert werden. Darin enthalten sind je nach Intensivierungs- bzw. Maximierungspfad Investitionen bis 2045 von 0,2 - 0,3 Mrd. Euro in Sammlung & Sortierung, 0,1 - 0,5 Mrd. Euro in F2F-Recyclingtechnologien sowie rund 0,1 Mrd. Euro in Recyclingtechnologien für nicht spinnbare Fasern. Damit legen die Ergebnisse nahe, dass moderate Investitionen in Zirkularität einen deutlich höheren Zuwachs an inländischer Wertschöpfung ermöglichen könnten, insbesondere getrieben durch steigende *Reuse*-Mengen und den Ausbau des F2F-Recyclings.

Erhöhte Resale-Anteile führen zu den stärksten BWS-Zuwächsen im Textilsegment

ABBILDUNG 61 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfad nach Kreislaufhebel bis 2045

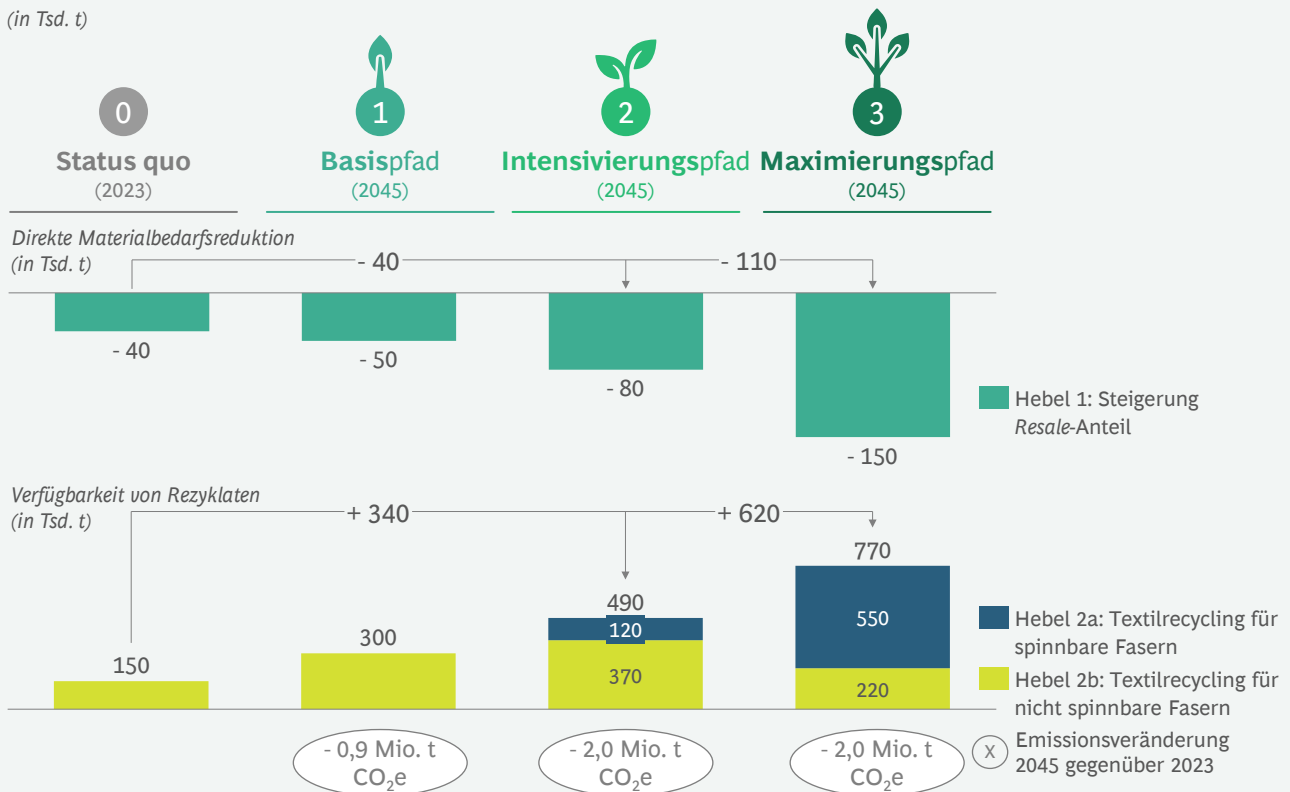
(in Mrd. €, nominal)



Emissionsreduktion um 2 Mio. t gegenüber 2023 vor allem durch erhöhte Recycling-Raten von Fasern erreichbar

ABBILDUNG 62 | Materialbedarfsveränderung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2045

(in Tsd. t)



Gleichzeitig könnten die Kreislaufhebel den Bedarf an Primärmaterialien deutlich senken und die Nutzung vorhandener Textilien signifikant verstärken.

Der jährliche Materialbedarf könnte im Vergleich zu 2023 um 40.000 bzw. 110.000 Tonnen sinken, während gleichzeitig die Rezyklatverfügbarkeit um jährlich 340.000 bzw. 620.000 Tonnen gesteigert werden könnte. Die Materialeffizienz würde durch die zusätzlichen *Reuse*-Mengen von 15.400 Verwendungen je Tonne Materialeinsatz²³⁷ im Basispfad auf 22.200 Verwendungen je Tonne im Intensivierungspfad und sogar 30.800 Verwendungen je Tonne im Maximierungspfad steigen.

²³⁷ Umrechnung der Textilmenge (in Tonnen) in Anzahl der Verwendungen über Annahmen zur durchschnittlichen Nutzung pro Stück und zum durchschnittlichen Gewicht pro Stück.

Case-Study 10: Covestro – chemisches Recycling für die Circular Economy im Matratzenmarkt

In Europa werden jährlich schätzungsweise 40 Mio. Matratzen meist über den Sperrmüll entsorgt. Anschließend werden sie selten recycelt.

Stattdessen wird der Großteil energetisch verwertet oder einfach deponiert. Wertvolle Rohstoffmengen gehen somit verloren, weshalb eine optimierte zyklische Verwertung dringend erforderlich ist. Während die Bedingungen für das Recycling von Matratzen als Post-Konsumenten-Abfall in Ländern wie Frankreich oder Belgien durch entsprechende regulatorische Rahmenbedingungen schon deutlich ausgeprägter sind, hat es sich in Europa gesamtheitlich im Markt kaum etabliert, die Recycling-Quote beträgt lediglich 17 %. Es ist zudem stets mit der stofflichen Verwertung in qualitativ minderwertigeren Anwendungen verbunden.

Um den Kreislauf von Matratzen ganzheitlich zu schließen, hat Covestro mit „Evocycle® CQ mattress“ ein chemisches Recycling-Verfahren für Polyurethan-(PUR-)Schaumkernmatratzen entwickelt. Dabei wird der Polyurethanschaumstoff ausgedienter Matratzen in seine chemischen Hauptbestandteile zerlegt, um diese anschließend wieder in die Wertschöpfungskette zurückzuführen und für die Herstellung neuen PUR-Weichschams zu nutzen. Im Unterschied zu existierenden Verfahren können die beiden für die Herstellung notwendigen Materialhauptkomponenten mit einer Qualität rückgewonnen werden, die mit der des ursprünglichen, auf fossilen Rohstoffen basierenden Primärmaterials vergleichbar ist. Für Covestro bietet eine erfolgreiche Umsetzung des Verfahrens die Möglichkeit, seine strategische Position in resultierenden Absatzmärkten zu stärken und sich wachstumsorientiert im Bereich der zirkulären Kunststoffe aufzustellen. Durch den Ersatz fossiler Rohstoffe und die Vermeidung der heutzutage üblichen energetischen Verwertung oder der Deponierung des Altmaterials ergibt sich ein großes Potenzial: Die Umstellung der linearen auf eine zirkuläre Wertschöpfungskette mit Hilfe der Covestro-Technologie kann die mit konventionellen Produktions- und Entsorgungsprozessen verbundenen CO₂-Emissionen halbieren. Dabei macht die Implementierung einer neuen, zirkulären Wertschöpfungskette in ihrer Entwicklung und ihrem Aufbau eine umfangreiche Zusammenarbeit mit Entsorgern sowie der aufarbeitenden und der chemischen Industrie notwendig.

Das derzeit in einer Pilotphase betriebene Verfahren könnte in großem Maßstab Kunststoffe vor der Deponierung oder der energetischen Verwertung bewahren und PUR-Rezyklate in den

Kreislauf führen. Für die in Planung befindliche Demonstrationsanlage ist Deutschland ein bevorzugter Standort. Mit einer anschließend aufgebauten vollindustriellen Anlage könnten auf Basis der aktuell in Europa anfallenden 40 Mio. zu entsorgenden Matratzen pro Jahr bis zu 100.000 Tonnen Kunststoff am Ende des Lebenszyklus in den Kreislauf zurückgeführt werden. Zudem wäre in Europa bei voller Ausschöpfung des Recycling-Potenzials eine Emissionsvermeidung von bis zu 10 Mio. Tonnen an CO₂ kumuliert von 2030 bis 2045 möglich.

Für den Ausbau eines chemischen Recyclings von Matratzenkernen müssen bestimmte Voraussetzungen geschaffen werden. Diese umfassen:

- **Entwicklung und Skalierung** vom technischen Entwicklungsmaßstab auf den vorindustriellen Maßstab, der Investitionskosten in zwei- bis dreistelliger Millionenhöhe beansprucht.
- **Aufbau einer Feedstock-Basis von gesicherter Mindestkapazität** und Standardqualität durch europaweite Rücknahme- und Sortiersysteme – mit der Herausforderung, mehrere Prozessschritte parallel zu skalieren, die voneinander abhängig sind. Dies setzt voraus, dass alle Partner der Wertschöpfungskette sich an dem notwendigen Aufwand der Transformation beteiligen.
- **Integration des chemischen Verfahrens in bestehende Wertschöpfungsketten** durch die Schaffung notwendiger Abnahme- und Qualitätssicherheit für die zurückgewonnenen Stoffe, um ihre Einbindung in existierende chemische Verarbeitungsprozesse und die Herstellung neuer Schäume in hoher Qualität gewährleisten zu können.
- **Transparenz hinsichtlich regulatorischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen**, zum Beispiel bzgl. der Anforderungen an Recyclierbarkeit und den Rezyklatanteil, auch unter Berücksichtigung des Massebilanzierungsverfahrens, um den planbaren, nachhaltigen Aufbau einer zirkulären Wertschöpfung mit geeigneter Kapazität zu ermöglichen. Über Förderprogramme, Investitionszuschüsse und Genehmigungsbeschleunigungen können Implementierungsrisiken zusätzlich reduziert und die wirtschaftliche Planbarkeit verbessert werden.

Das Recycling-Verfahren von Covestro bietet die Chance, einen bislang weitgehend unerschlossenen Teil des Materialkreislaufs zu schließen. Mit der richtigen Skalierung und der passenden regulatorischen Begleitung ermöglicht es das Verfahren,

Matratzenmengen im großen Maßstab vor der Depo-
nierung und energetischen Verwertung zu retten.
Dadurch werden Emissionen großflächig reduziert
und wertvolle Ressourcen eingespart.

3.7.4 Barrieren: Drei systemische Hürden erschweren die Ausschöpfung textiler Kreislaufpotenziale

Trotz der aufgezeigten Potenziale kann sich eine zirkuläre Textilwirtschaft nur entfalten, wenn zentrale Barrieren in Verfügbarkeit, Verwertung und Nachfrage adressiert werden. Die Herausforderungen betreffen alle drei Kreislaufhebel in unterschiedlicher Ausprägung.

Verlust verwertbarer Abfallströme und begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Sortiertechnologien als zentrale Barriere für alle drei Hebel. Für alle drei Hebel bestehen die zentralen Herausforderungen weniger in der grundsätzlichen technischen Möglichkeit der Verwertung von Textilien als in der Erschließung, Sortierung und Bereitstellung ausreichend geeigneter Stoffströme für die jeweiligen Verwertungsstufen. Entscheidend sind vor allem Menge und Qualität des verfügbaren *Feedstock*. Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben, gehen heute erhebliche Textilmengen bereits vor der Verwertung verloren. Zudem schränkt die begrenzte

Zentrale Herausforderungen im Textilsegment vor allem durch Verlust von Abfallströmen und strukturelle Kostennachteile

ABBILDUNG 63 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Textilsegment

	Verfügbarkeit		Verwertung		Nachfrage	
	A) Verlust verwertbarer Abfallströme	B) Begrenzte Kreislauf-verwertbarkeit	C) Limitierte Tech.-Reife u. Verarbeitungs-kapazitäten	D) Strukturelle Kosten-nachteile	E) Unsichere Absatz-märkte	F) Einge-schränkte Anwendbarkeit
Hebel 1: Resale-Anteil erhöhen	✗	~	✗	✗	○	○
Hebel 2: Textil-Recycling für spinnbare Fasern	✗	✗	✗	✗	✗	○
Hebel 3: Textil-Recycling für nicht spinnbare Fasern	✗	~	~	✗	~	○

✗ Herausforderung trifft zu ○ Keine signifikante Herausforderung ~ Herausforderung trifft selektiv zu, z. B. für bestimmte Stoffströme oder Anwendungsfälle

Quelle: BCG-Analyse

Kreislaufverwertbarkeit vieler Produkte (Mischfasern, mehrlagige Konstruktionen, Störfaktoren) die Eignung für Recycling deutlich ein und trifft Hebel 2a besonders stark. Ohne eine stabilere und qualitativ abgesicherte Materialbasis bleiben alle Kreislaufpfade strukturell unter ihrem Potenzial.

Limitierte Technologiereife und strukturelle Kostennachteile erschweren den Ausbau von Recycling-Kapazitäten. Für Hebel 1 und 2a ist darüber hinaus die begrenzte Technologiereife in Sortierung und Recycling eine zentrale Barriere. Zwar sind entsprechende Technologien grundsätzlich verfügbar, sie sind jedoch häufig noch nicht hinreichend skaliert oder wirtschaftlich breit einsetzbar. Heute noch weitgehend manuell durchgeführte Sortierprozesse werden bei steigenden Mengen und komplexen Materialstrukturen eine Verarbeitung nur begrenzt und wirtschaftlich kaum sinnvoll zulassen – erst eine weitreichende Automatisierung würde ausreichend präzise Fraktionen für *Reuse* und Recycling bereitstellen und Wirtschaftlichkeit ermöglichen. Chemische *F2F*-Verfahren sind für Hebel 2a bislang nicht breit industriell verfügbar und erfordern weiteren F&E-Aufwand, wobei erste

Großprojekte mit Kapazitäten von bis zu 70.000 Tonnen pro Jahr sowohl die grundsätzliche Skalierbarkeit belegen als auch bereits kommerziell relevante Größenordnungen erreichen. Hinzu kommen strukturelle Kostennachteile, unter anderem wegfallende Quersubventionierung über *Reuse*-Erlöse sowie hohe Opex-Kosten. Eine Wettbewerbsanalyse (siehe Abbildung 64) zeigt, dass Deutschland mit ca. 570 Euro pro Tonne gegenüber dem EU-Durchschnitt von ca. 510 Euro pro Tonne heute (und voraussichtlich auch 2045) im oberen Kostenfeld liegt, was Investitionen erschwert und den Ausbau industrieller Sortier- und Recycling-Infrastruktur bremst.²³⁸

Unsichere Absatzmärkte begrenzen Recycling-Hebel. Auf der Marktseite sind vor allem Hebel 2a und 2b mit unsicheren Absatzmärkten konfrontiert. Rezyklate konkurrieren mit oft günstigeren Primärmaterialien, zum Beispiel wird für Polyester eine Kostenlücke von 1.500 Euro pro Tonne gegenüber *Virgin*-Material ausgewiesen.²³⁹ Bis diese Lücke durch technologische Weiterentwicklung und Skaleneffekte langfristig – perspektivisch bis 2045 – geschlossen werden kann, sind ergänzende regulatorische und nachfra-

²³⁶ BCG-Analyse.

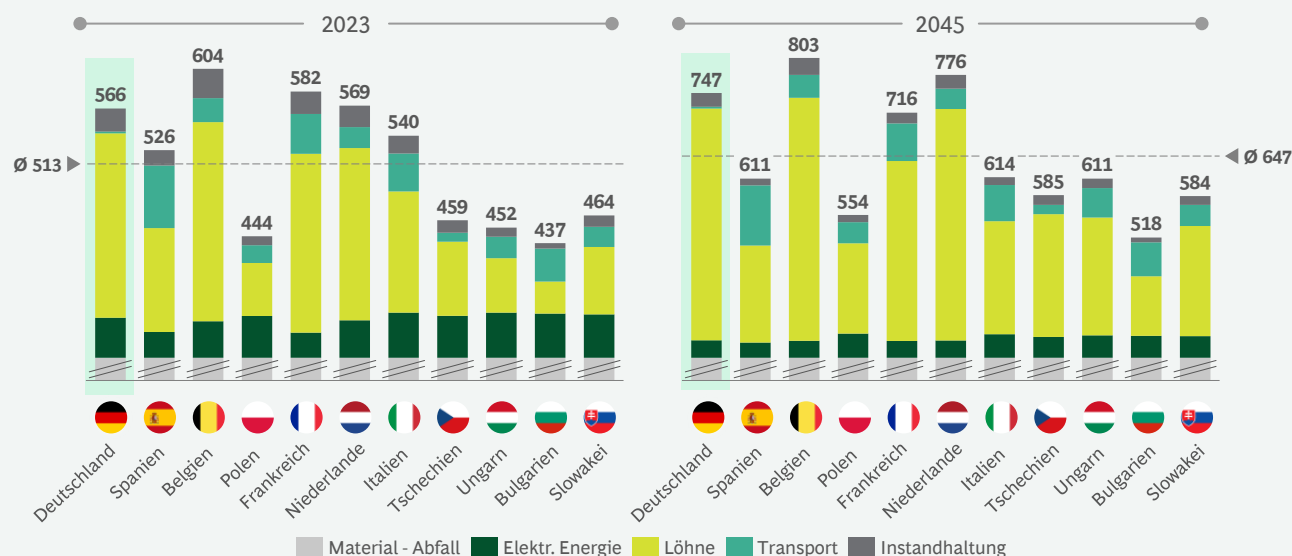
²³⁹ Systemiq (2025).

Deutschland 2045 mit hohen Opex-Kosten für mechanisches Recycling im europäischen Vergleich

ABBILDUNG 64 | Vergleich der Opex-Kosten für mechanisches Recycling in europäischen Ländern

Ländervergleich der Prozesskosten mechanischen¹ Textil-Recyclings

(in €/t)



1. Mechanisches Recycling von Baumwolle berücksichtigt. Anmerkung: Ziel ist es, die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands bei der Verarbeitung von in Deutschland anfallenden Textilabfällen zu bewerten; es wird von gleichen Abfallbeschaffungskosten in allen Ländern ausgegangen. "Material - Abfall" spiegelt den Preis wider, den Recycling-Betriebe an Sortierunternehmen zahlen, wobei für Post-Konsumenten- und Industriebaumwollabfälle ein Preis von € 300/t bei einer Prozessausbeute von 90 % angenommen wird. Vollzeitkräfte pro Tsd. t berücksichtigt. Die Transportkosten umfassen den Versand der Abfälle von Deutschland in jedes Zielland. Die Energiepreise ab 2031 werden aufgrund von Volatilität und Prognoseunsicherheit auf dem Niveau von 2031 gehalten
Quelle: Oxford Economics; BCG-Analyse

gegenseitige Mechanismen erforderlich. Für *Open-Loop*-Recycling von nicht *F2F*-recycelbaren Textilien fehlen zudem langfristig gesicherte industrielle Anwendungen in ausreichender Größenordnung. Damit bleiben Investitionen in neue Kapazitäten gerade im Recycling mit Markt- und Preisrisiken verbunden.

Zur Hebung des identifizierten Potenzials ergeben sich fünf zentrale Handlungsfelder: Erstens sind Verluste verwertbarer Stoffströme durch differenzierte Exportbeschränkungen und verschärfte Abfallende-Kriterien gezielt zu reduzieren. Zweitens muss die Verwertbarkeit durch verbindliche Ökodesign-Vor-

gaben, einen EU-weit harmonisierten Industriestandard sowie klare Anforderungen an Überprüfbarkeit und Nachweisbarkeit der Einhaltung gefördert werden. Drittens sind geeignete Technologien durch Optimierung bestehender Verfahren und die Förderung von Neuentwicklungen systematisch voranzutreiben. Viertens sind eine umfangreiche EPR-Regulierung sowie eine kostenbasierte Steuerung von Verwertungsentscheidungen um Sammel-, Sortier- und Recycling-Pfade wirtschaftlich abzusichern. Und fünftens muss die Nachfrage nach Rezyklaten durch wirksame Ökomodulation und gezielte Leitmarktbildung, zum Beispiel über öffentliche Beschaffung, gestärkt werden.

3.8 Zirkuläre Anwendungen als verbindendes Element über Sektor- und Unternehmensgrenzen hinweg: Industrielle Symbiose

Neben den spezifischen Effekten in den fünf betrachteten Kernsegmenten der Studie können Circular-Economy-Modelle auch segment- und unternehmensübergreifend Mehrwert entfalten.

In den vergangenen Kapiteln wurde erhebliches Potenzial für die Bruttowertschöpfung, die Rezyklatverfügbarkeit und die Emissionsreduktion innerhalb der betrachteten Kernsegmente identifiziert. Dabei wurden auch segmentübergreifende Wechselwirkungen der Kreislaufhebel in zentralen Anwendungen berücksichtigt – etwa die Zweitnutzung ausgedienter *EV*-Batterien aus dem Mobilitätssegment im Energiesektor. Auf einer stärker standort- und stoffstrombezogenen, zugleich deutlich komplexeren Ebene können industrielle Symbiosen – also die unternehmensübergreifende Nutzung und räumliche Integration von Stoff- und Energieströmen – die identifizierten Effekte nicht nur unterstützen, sondern in ihrer Wirkung deutlich verstärken. Sie stellen damit einen Ansatz dar, mit dem die Circular Economy in großem Maßstab umgesetzt werden kann – unter der Voraussetzung großer räumlicher Nähe zwischen den beteiligten Akteuren.

Durch industrielle Symbiose können Abfallströme und Überschüsse des einen Unternehmens zu produktiven Inputs für andere Produktionsketten werden – und damit engmaschige Kreisläufe bilden. Industrielle Symbiosen bedeuten eine koordinierte und institutionalisierte Nutzung von verschiedenen Stoffströmen, etwa verunreinigtem Wasser, Energie oder industriellen Nebenprodukten, zwischen mehreren Unternehmen, die meist eng beieinander angesiedelt sind.²⁴⁰ Damit gehen Ansätze der industriellen Symbiose über konventionelle *R*-Strategien als Grundsteine der Circular Economy hinaus: Sie umfasst die direkte Kopplung von Prozessen zwischen im Übrigen klar voneinander getrennten Unternehmen über verschiedene Sektoren hinweg, meist durch eine geteilte und gezielt koordinierte Infrastruktur.²⁴¹

In Europa wurden Konzepte für industrielle Symbiosen bislang nur punktuell umgesetzt; als namhaftes Beispiel kann Kalundborg in Dänemark dienen. Das hier angesiedelte Netzwerk wurde schon vor über fünf Jahrzehnten etabliert und besteht bis heute.²⁴² Mit 17 Teilnehmern aus dem öffentlichen und privaten Bereich sind hier über 30 Beziehungen zur Nutzung von Energie-, Wasser- und Materialströmen entstanden, die von den einzelnen Unternehmen gehandelt, aufbereitet und weiterverwendet werden. So werden zum Beispiel Restmaterialien aus der Insulin- und Enzymproduktion von Novo Nordisk bei Kalundborg Bioenergy zu Biogas aufbereitet, das dann

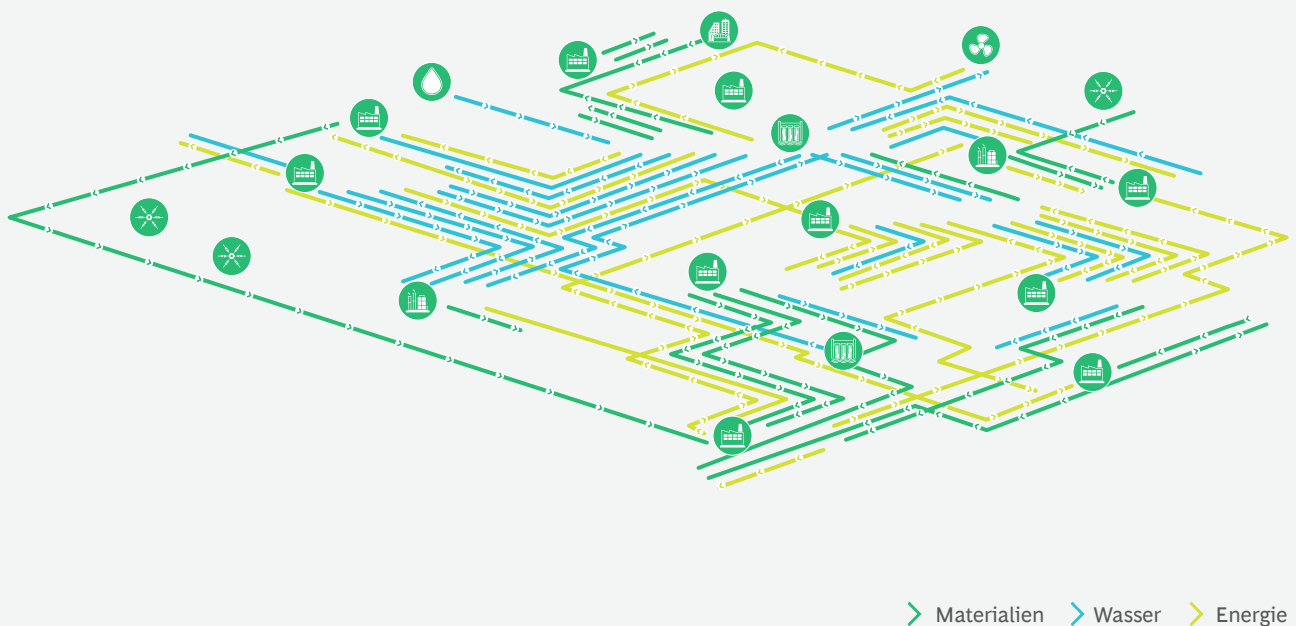
²⁴⁰ EU4Environment (2022).

²⁴¹ Chertow (2007).

²⁴² European Circular Economy Stakeholder Platform (2019).

In Kalundborg besteht seit mehr als 60 Jahren ein koordiniertes geteiltes System aus Material-, Wasser- und Energieströmen

ABBILDUNG 65 | Stoffstrombeziehungen in Kalundborg



Quelle: Kalundborg Symbiosis

von Kalundborg Refinery genutzt wird, um unter anderem mit der Verarbeitung von Abwasser Dünger zu erzeugen. Als nur eine von vielen symbiotischen Beziehungen in Kalundborg kann so der Bedarf an Primärmaterialien und können in weiterer Folge auch Kosten und Emissionen gesenkt werden:²⁴³ Zu den Kostensenkungen von 24 Mio. Euro für die teilnehmenden Unternehmen pro Jahr kommen Einsparungen von 3,6 Mio. m³ an Wasser, 635.000 Tonnen an CO₂, 100 GWh an Energie sowie 87.000 Tonnen an Material.²⁴⁴

In Deutschland existieren erste Strukturen, die mit symbiotischen Ansätzen die Materialeffizienz steigern. Eine solche Struktur befindet sich im Industriepark Höchst in Frankfurt am Main, einem Chemie- und Pharmastandort. Auch hier ist auf organische Weise seit 1863 ein System aus ca. 90 ansässigen Unternehmen entstanden, das hauptsächlich durch geteilte Energie- und Abfallströme eine

effiziente Nutzung von Ressourcen ermöglicht. Während solche symbiotischen Beziehungen in der Vergangenheit oft durch die Aufspaltung von größeren Unternehmen in kleinere, aber eng miteinander vernetzte Betriebe entstanden, nimmt der Betreiber des Parks heute eine Rolle als Vermittler ein.²⁴⁵ Darüber hinaus wurde 2025 von InfraserV Höchst an der Klärschlammverbrennungsanlage des Parks eine *Carbon-Capture*-Pilotanlage in Betrieb genommen, die durch ein EU-Projekt für industrielle Symbiosen (IS2H4C) finanziert wurde.²⁴⁶ Das Netzwerk in Kalundborg gilt als stärker formalisiert, doch macht das Beispiel Höchst deutlich, dass geografische Nähe und wechselseitige Nutzung von Stoffströmen auch in Deutschland industrielle Symbiosen ermöglichen.

²⁴³ Kalundborg Symbiosis (2026).

²⁴⁴ ENGIE Impact (2021).

²⁴⁵ Heck et al. (2024).

²⁴⁶ Industriepark Höchst (2025).

Zirkuläre Geschäftsmodelle können durch industrielle Symbiosen auch zwischen den betrachteten Segmenten Mehrwert bieten. Dafür eignen sich vor allem Industrien mit stark räumlich konzentrierter Präsenz, etwa in Industrieparks oder in Zulieferer-Clustern: Besonders in den Segmenten Mobilität und Maschinenbau, die regional bereits stark vernetzt sind, können auf diese Weise weitere Wechselbeziehungen etabliert, Transportkosten reduziert und Abnahmeunsicherheiten verringert werden. Damit lassen sich wirtschaftliche Mehrwerte erzielen.²⁴⁷ Auch zwischen den Segmenten Mobilität- und Energie finden sich potenzielle Synergien, etwa in der Nutzung von Fahrzeugbatterien, um industrielle Lastspitzen zu überbrücken und erneuerbare Energien zwischenspeichern (siehe Hebel 2 im Energiesegment, Kapitel 3.6.3). Darüber hinaus können sich unter anderem im Bausegment durch die stoffliche Nutzung von industriellen Nebenprodukten wie Schlacken (siehe Exkurs 9) vor allem dann zusätzliche Synergien ergeben, wenn die betreffenden Unternehmen in räumlicher Nähe zueinander angesiedelt sind.

Trotz zahlreicher Beispiele für gelungene gemeinsame Anwendungen steht eine breitere Skalierung industrieller Symbiosen vor Herausforderungen. Dabei spielen vor allem Zeit und Vertrauen eine große Rolle: Sowohl Kalundborg als auch der Industriepark Höchst sind Produkte historischen Wachstums, der kooperative Austausch konnte sich über Jahrzehnte hinweg intensivieren. Gleichzeitig verlangen industrielle Symbiosen einen hohen Grad an Kooperation zwischen einzelnen Unternehmen, bei denen es oft an Wissen über das Potenzial solcher Kooperationen fehlt sowie an der Bereitschaft, Daten zu teilen²⁴⁸. Letztlich mangelt es auch an einem regulatorischen Rahmenwerk – dies ist ein zentrales Hindernis für die Ausweitung industrieller Symbiosen in Deutschland und Europa. Die Folgen sind Planungs- und Abnahmeunsicherheiten sowie inkonsistente Vorschriften.²⁴⁹

Um industrielle Symbiosen in Deutschland systematisch zu fördern, sind regulatorische und organisatorische Anpassungen erforderlich. Wie die Beispiele Kalundborg und Höchst zeigen, ist eine industrielle Symbiose nicht kurzfristig planbar, sondern oft das Ergebnis von über lange Zeit hinweg erarbeiteten Vereinbarungen. Der Etablierung weiterer industrieller Symbiosen muss daher die Schaffung eines Rahmens zur Vertrauensbildung und Institutionalisierung vorausgehen, was bei strukturpolitischen Entscheidungen mitgedacht werden muss. Dieser Rahmen kann auch durch neutrale Drittparteien als Vermittler gefördert werden, wie im Fall des Parkbetreibers in Höchst. Darüber hinaus machen Beispiele aus der Vergangenheit deutlich, dass industrielle Symbiosen nicht nur auf die Verfügbarkeit von Materialströmen, sondern auch auf die Offenheit der teilnehmenden Unternehmen für neue Geschäftsmodelle und den gegenseitigen Informationsaustausch angewiesen sind. Daher müssen Erfolgsbeispiele wie Kalundborg und der Industriepark Höchst weiter an Sichtbarkeit gewinnen, um Kenntnis und Wissen über Erfolgsmodelle aufzubauen und den Mehrwert solcher Kooperationen bekannt zu machen.²⁴⁹

Industrielle Symbiose stellt einen wirkungsvollen, aber bislang nur begrenzt erschlossenen Hebel dar, um die Circular Economy parallel zu den spezifischen Maßnahmen in den Einzelsegmenten voranzubringen. Internationale Beispiele wie Kalundborg, aber auch erste Ansätze wie Höchst hierzulande verdeutlichen, dass durch das gemeinsame Management von Materialströmen über Sektor- und Unternehmensgrenzen hinweg reale Vorteile im Hinblick auf Kosten, Materialeffizienz und Emissionen realisiert werden können. Dabei sind vor allem eine gezielte Koordination und gegenseitiges Vertrauen vonnöten, um das Potenzial voll auszuschöpfen. Insgesamt wird klar: Zirkuläre Geschäftsmodelle können über einzelne Industrien hinweg Wert stiften – und das vor allem in nächster Nähe.

²⁴⁷ Neves et al. (2019).

²⁴⁸ Papathanasoglou et al. (2016).

²⁴⁹ CORDIS (2026).

4 Roadmap für eine international wettbewerbsfähige Circular Economy

Um das quantifizierte Potenzial zu erschließen, sind Investitionen und zielgerichtete Maßnahmen von Industrie und Politik nötig. Die Studie zeigt, dass die konsequente Umsetzung der untersuchten Hebel die kreislaufwirtschaftliche Wertschöpfung in Deutschland von heute 60 Mrd. Euro auf bis zu 125 Mrd. Euro im Jahr 2045 (Intensivierungspfad, siehe Abbildung 17) mehr als verdoppeln kann. Zusätzlich könnten auch Resilienz und Versorgungssicherheit auf Ressourcenebene gestärkt und Abhängigkeiten reduziert werden. Darüber hinaus könnte die Circular Economy in den fünf betrachteten Segmenten eine Rezyklatverfügbarkeitssteigerung um bis zu 83 Mio. Tonnen ermöglichen (siehe Abbildung 18). Um diese Potenziale vollständig zu erschließen und Wettbewerbsfähigkeit aufzubauen, sind zielgerichtete Investitionen sowie Maßnahmen von Politik und Industrie notwendig.

4.1 Potenziale bis 2045 setzen Investitionen und den Abbau systemischer Hürden voraus

4.1.1 Deutschland benötigt Investitionen in die Circular Economy

Für die Circular Economy sind Investitionen entlang des gesamten Wertschöpfungskreislaufs notwendig. Dabei geht es neben dem Ausbau der Recycling-Infrastruktur²⁵⁰ um den Aufbau von *Refurbishment*- und *Remanufacturing*-Kapazitäten²⁵¹, um IT- und Systeminfrastrukturen sowie um Forschung und Ent-

wicklung – sowohl im Hinblick auf Produkte und Materialien als auch auf die Recycling-Technologien selbst. Die notwendigen Investitionen zur Umsetzung der in dieser Studie vorgestellten Kreislaufhebel belaufen sich kumuliert bis 2045 auf 20 Mrd. Euro (Intensivierungspfad) bzw. 33 Mrd. Euro (Maximierungspfad). Die kumulierte zusätzliche Bruttowertschöpfung dieser Hebel entspricht ca. 700 bis 880 Mrd. Euro im Intensivierungspfad und 750 bis 920 Mrd. Euro im Maximierungspfad.

Über den Investitionszeitraum von 2026 bis 2045 entspricht dies im Intensivierungspfad einer durchschnittlichen jährlichen Investition von ca. 1,1 Mrd. Euro. Im Vergleich zu den im Jahr 2022 von Staat und Unternehmen getätigten Investitionen unter anderem in der Abfallwirtschaft sowie in Forschung und Entwicklung im Umweltbereich (ca. 26 Mrd. Euro) entsprächen die erforderlichen Investitionen einem Anteil von etwa 4 %. Für das Jahr 2026 sind im Klima- und Transformationsfonds Ausgaben in Höhe von ca. 35 Mrd. Euro vorgesehen; die im Intensivierungspfad notwendigen Investitionen entsprächen etwa 3 % dieses Volumens.

Ein Großteil der Investitionen wird von der Industrie selbst getragen. Gleichzeitig ist es Aufgabe der Politik, geeignete Rahmenbedingungen zu setzen, um diese Investitionen zu ermöglichen, zu beschleunigen und durch Förderungen aktiv zu unterstützen. Angesichts der je nach Art des Hebels unterschiedlich verteilten Investitionslast ist es entscheidend, dass die Maßnahmen letztlich nicht zulasten der Wettbewerbsfähigkeit einzelner Akteure gehen, sondern allen Beteiligten zugutekommen.

²⁵⁰ Umfasst Infrastruktur zur Sammlung und Sortierung sowie zur entsprechenden stofflichen Verwertung von Abfall.

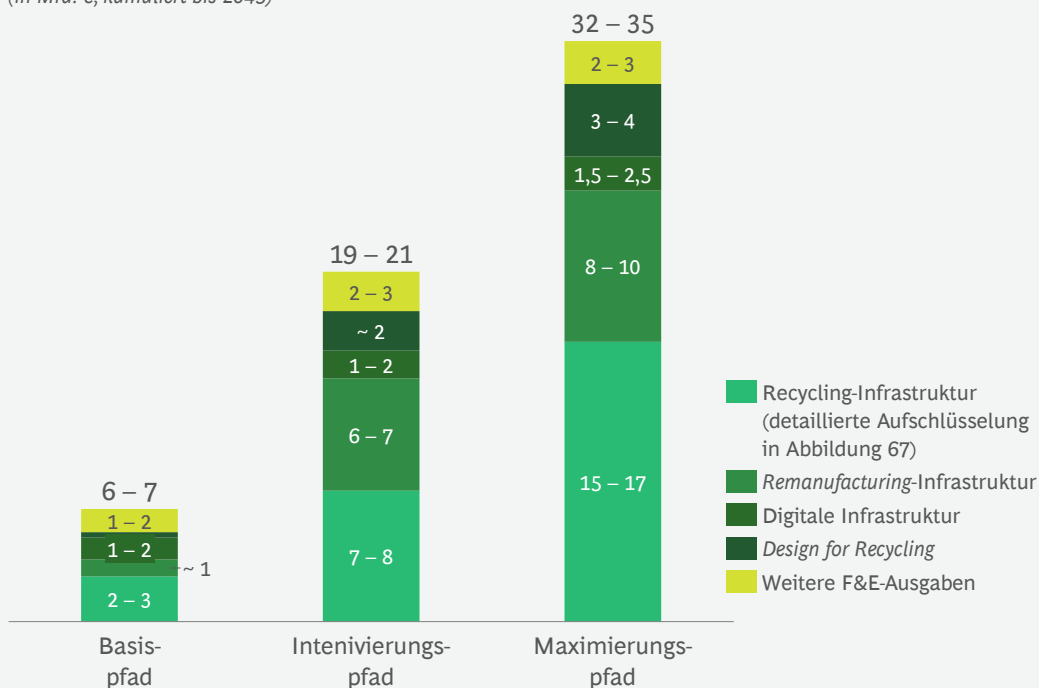
²⁵¹ Umfasst Anlagen (z. B. Produktionslinien), Prozesse (Demontage-, Reinigungs- und Prüfkapazitäten) und Systeme (Logistik, IT) zur industriellen Aufbereitung von Produkten, Anlagen und Komponenten.

Im Intensivierungspfad sind Investitionen von € 19 – 21 Mrd. notwendig, vor allem für den Ausbau von Recycling-Infrastruktur

ABBILDUNG 66 | Investitionsbedarfe zur Umsetzung der Kreislaufhebel

Investitionsbedarfe

(in Mrd. €, kumuliert bis 2045)



Quelle: BGR; BCG-Analyse

- **Investitionen in die Recycling-Infrastruktur** werden vor allem durch Recycler und Entsorger getragen. Der Aufbau und Betrieb der Sammelinfrastruktur erfolgt oftmals durch die öffentliche Hand, in Teilen jedoch auch durch die Hersteller von Produkten.²⁵²
- Die Entwicklung von **Refurbishment- bzw. Remanufacturing-Strukturen** liegt überwiegend in der Verantwortung produzierender Unternehmen.
- Der **Aufbau digitaler Infrastrukturen** zur Integration neuer Technologien, etwa des digitalen Produktpasses, ist entlang der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich – bei Behörden, produzierenden Unternehmen und Recyclern.
- Produzierende Unternehmen müssen in **Designanpassungen** investieren, um Produkte kreislauffähig zu gestalten, und dabei weitere Akteure entlang der Wertschöpfungskette einbinden.

- **Forschung und Entwicklung** sind entlang aller Dimensionen notwendig und werden überwiegend durch Unternehmen (rund zwei Drittel) sowie ergänzend durch Wissenschaft und öffentliche Hand umgesetzt.

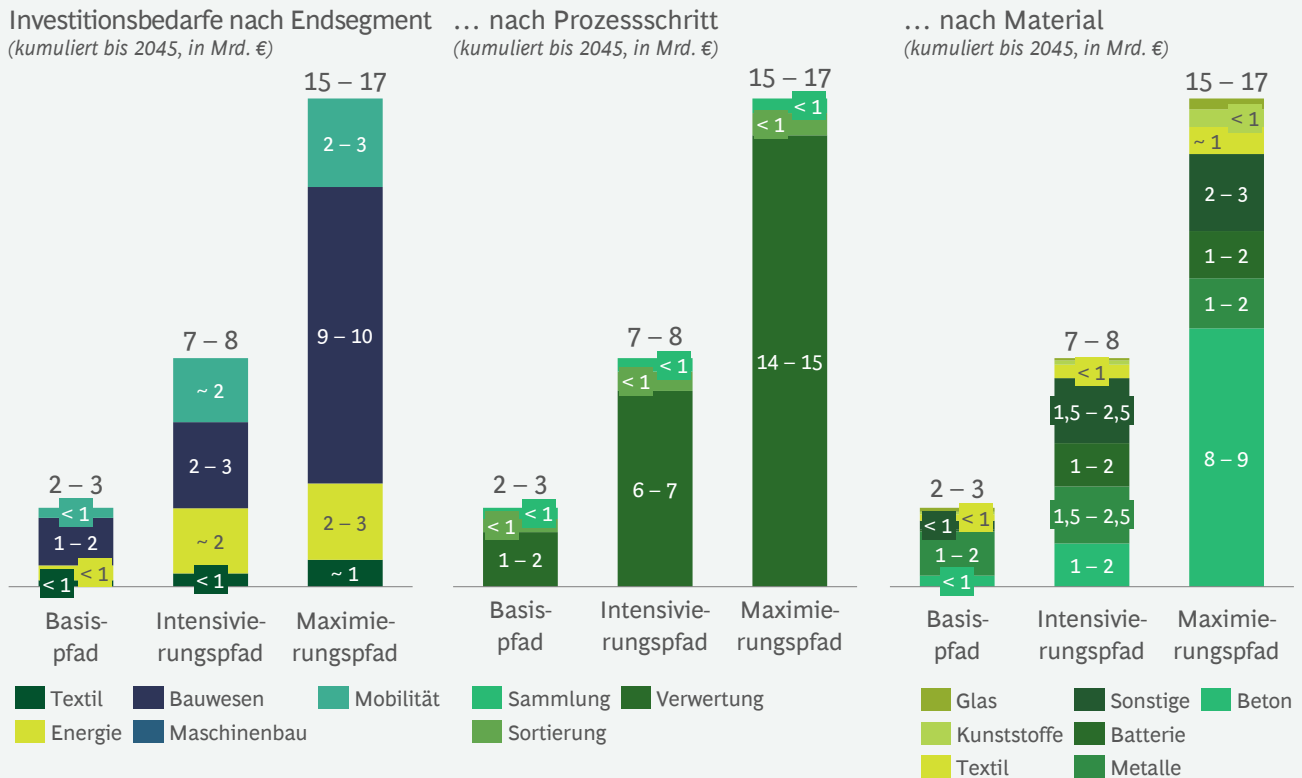
Der größte Investitionsbedarf entfällt auf die Recycling-Infrastruktur; er wurde im Rahmen der Hebelbeschreibungen detailliert quantifiziert. Für die betrachteten Recycling-Hebel²⁵³ ergibt sich im Intensivierungspfad ein kumulierter Investitionsbedarf von ca. 7 – 8 Mrd. Euro bis 2045. Im Maximierungspfad steigt der Investitionsbedarf auf 15 – 17 Mrd. Euro, die wiederum 9 – 10 Mrd. Euro zusätzliche jährliche Wertschöpfung aus Recycling ermöglichen. Die höchsten Investitionen entstehen aufgrund der großen Mengen insbesondere im Bauwesen – im Maximierungspfad vor allem durch den aufwendigen Aufbereitungsprozess von Betonzyklat als Gesteinskörnungersatz. Insgesamt sind Investitionen im Vergleich zur Sammlung und Sortierung vor allem für die Verwertung selbst notwendig, zum Beispiel für Hydrometallurgie-Anlagen zur Wiedergewinnung von Batteriemetallen,

²⁵² Zum Beispiel im Rahmen von ERP-Vorgaben bei PV-Anlagen (WEEE), vgl. Europäische Kommission (2026).

²⁵³ Mobilität: Hebel 2 und 3; Maschinenbau: Hebel 3; Bauwesen: Hebel 2; Energie: Hebel 3; Textil: Hebel 2 und 3.

Investitionsbedarfe für Recycling-Infrastruktur fallen im Wesentlichen auf vier Segmente

ABBILDUNG 67 | Investitionsbedarfe von 2026 bis 2045 in Recycling-Infrastruktur



für Magnet-zu-Magnet-Prozesse oder für vollständige Recycling-Anlagen für Photovoltaikmodule, die auch eine Wiedergewinnung von Silber und Silizium ermöglichen.

Zudem zeigen die Analysen, dass die Umsetzung der Kreislaufhebel Investitionen an anderer Stelle reduzieren kann. Insbesondere im Netzausbau, der indirekt über Netzentgelte und damit von den Stromnutzern finanziert wird, lassen sich durch den Einsatz von *Refurbishment* und *Remanufacturing* sowie durch *Vehicle-to-Grid*-Lösungen Ausgaben von 35 Mrd. Euro (Intensivierungspfad) bzw. 50 Mrd. Euro (Maximierungspfad) einsparen.

4.1.2 Segmentspezifische Herausforderungen hemmen Investitionen und die Umsetzung der Circular Economy

Die Circular-Economy-Roadmap leitet sich aus den segment- und hebel-spezifischen Herausforderungen ab.²⁵⁴ Für jeden Hebel wurden im Rahmen

der Potenzialanalyse in jedem Segment zentrale Barrieren identifiziert, die einer wettbewerbsfähigen Umsetzung aktuell im Weg stehen. Zur Strukturierung der Roadmap wurden diese Barrieren entlang der einzelnen Schritte im Wertschöpfungskreislauf (Verfügbarkeit, Verwertung und Nachfrage) systematisch gebündelt. Die daraus abgeleiteten Handlungsfelder adressieren jeweils eine zentrale Barriere: Verlust verwertbarer Abfallströme minimieren (A), Kreislaufverwertbarkeit sicherstellen (B), Technologiereife und Verarbeitungskapazitäten erreichen (C), strukturelle Kostennachteile beseitigen (D), Absatzmärkte stärken (E) sowie Anwendbarkeit sicherstellen und Rahmenbedingungen schaffen (F). Die Roadmap zeigt je Handlungsfeld konkrete Maßnahmen für Industrie und Politik auf, die erforderlich sind, damit Circular-Economy-Hebel bis 2045 wettbewerbsfähig umgesetzt werden können.

²⁵⁴ Dargestellt in den Kapiteln 3.3.4, 3.4.4, 3.5.4, 3.6.4 und 3.7.4.

Die Roadmap ergibt sich aus den Barrieren aller Segmente

ABBILDUNG 68 | Barrieren der fünf betrachteten Segmente

		Verfügbarkeit		Verwertung		Nachfrage	
		A) Verlust verwertbarer Abfallströme	B) Begrenzte Kreislauf- verwertbarkeit	C) Limitierte Tech.-Reife u. Verarbeitungs- kapazitäten	D) Strukturelle Kostennachteile	E) Unsichere Absatz- märkte	F) Ein- geschränkte Anwendbarkeit
Mobilität	Hebel 1: Reuse/ Remanufacturing Komponenten	✗	~	~	○	~	~
	Hebel 2: Recycling (Pkw und Zug)	✗	✗	○	~	~	~
	Hebel 3: Recycling (Batterien)	✗	○	✗	✗	○	○
Maschinenbau	Hebel 1: Reman./Refurb. von Anlagen	✗	✗	~	○	~	○
	Hebel 2: Upgrades für CE- Anforderungen	○	✗	~	○	~	~
	Hebel 3: Anlagen für die CE	~	~	✗	✗	✗	○
Bauwesen	Hebel 1: Sanierung von Wohnungen	○	✗	~	○	○	~
	Hebel 2: Recycling Baustoffe	✗	✗	~	✗	✗	~
Energie	Hebel 1: Refurb./Reman. Anlagen	○	○	○	○	✗	○
	Hebel 2: V2G und Second-Life- Batterien	~	○	○	~	✗	✗
	Hebel 3: Recycling (PV, Wind, Batterien)	✗	~	✗	✗	✗	○
Textil	Hebel 1: Steigerung Resale-Anteile	✗	~	✗	✗	○	○
	Hebel 2a: Recycling spinnbare Fasern	✗	✗	✗	✗	✗	○
	Hebel 2b: Recycling nicht spinnbarer Fasern	✗	~	~	✗	~	○

✗ Herausforderung trifft zu ~ Selektiv zutreffend ○ Keine signifikante Herausforderung

4.2 Circular-Economy-Roadmap: Sieben zentrale Handlungsfelder für deutsche Unternehmen und Politik

Aus den Analysen und der Einbindung einer Vielzahl von Stakeholdern ergeben sich sieben übergeordnete Handlungsfelder (A bis G). Jedes von ihnen umfasst entsprechende Ziele und Maßnahmen, um eine Wettbewerbsfähigkeit der Kreislaufhebel zu erreichen und deren ökonomisches und ökologisches Potenzial zu erschließen.

Bei der Definition von Handlungsfeldern und Maßnahmen ist eine ganzheitliche Perspektive unerlässlich:

- **Handlungsfelder müssen von allen beteiligten Akteuren gemeinsam verantwortet werden.** Aktives unternehmerisches Handeln ist unerlässlich, zugleich braucht es einen politischen Ordnungsrahmen, der die richtigen Anreize setzt. Das Heben des Potenzials gelingt nur, wenn alle Stakeholder in dieselbe Richtung arbeiten und die Maßnahmen sich sinnvoll ergänzen. Die Umsetzung der Hebel darf nicht zulasten der Wettbe-

werbsfähigkeit beteiligter Akteure des Wertschöpfungskreislaufs führen.

- **Die definierten Handlungsfelder sind entlang des Wertschöpfungskreislaufs organisiert** und darauf ausgerichtet, die Verfügbarkeit von Produkten und Materialien zu erhöhen (A, B), bessere Rahmenbedingungen für deren Verwertung zu schaffen (C, D) und Nachfrage bzw. Absatzmärkte zu sichern (E, F).
- **Säulen und Fundament sind nur im Zusammenspiel tragfähig:** Die Roadmap entfaltet ihre Wirkung nur dann, wenn alle Handlungsfelder gemeinsam adressiert werden. Es nützt wenig, Verwertungskapazitäten auszubauen, wenn nicht genug Inputmaterial verfügbar ist – und ebenso wenig, Nachfrage zu stimulieren, wenn die notwendige Infrastruktur, etwa in Form digitaler Lösungen, fehlt.

Kreislaufmaßnahmen müssen im EU-Kontext betrachtet werden. Denn die Europäische Union hat zentrale Weichen für die Circular Economy gestellt und damit bereits einen eigenen Schritt in Richtung zirkulärer Transformation vollzogen. Materialmärkte und

Die Roadmap für eine wettbewerbsfähige Circular Economy in Deutschland basiert auf den identifizierten Herausforderungen der Segmente

ABBILDUNG 69 | Sieben Handlungsfelder für deutsche Unternehmen und Politik



1. Inkl. Vorbereitung zur Wiederverwendung analog KrWG § 3 Abs. 23a

Stoffströme sind grenzüberschreitend organisiert, und Unternehmen agieren in einem europäischen und internationalen, nicht rein deutschen Umfeld. Gleichzeitig entsteht ein wesentlicher Teil des identifizierten Wertschöpfungspotenzials in Deutschland, was mit spezifischen nationalen Herausforderungen verbunden ist. Daher bleibt eine aktive deutsche Industrie- und Kreislaufpolitik eine wichtige Ergänzung zur EU-Regulierung, um unternehmerisches Handeln zu incentivieren und zu fördern. Ziel ist dabei nicht die Übererfüllung europäischer Anforderungen, sondern die gezielte Ausschöpfung zirkulärer Wertschöpfungspotenziale.

Die nachfolgend beschriebene Roadmap zeigt, welche Maßnahmen erforderlich sind, um die im Intensivierungspfad angenommenen Fortschritte international wettbewerbsfähig zu realisieren.

Sie setzt vor allem auf unternehmerisches Handeln und gezielte Incentivierung, wo nötig und sinnvoll. Vorgaben oder politische Eingriffe werden dort eingesetzt, wo sie notwendig erscheinen. Dabei sollen bestehende industrielle Wertschöpfungsstrukturen nicht aufgebrochen werden; die Maßnahmen könnten daher als *No-Regret*-Schritte verstanden werden. Die Umsetzung des Maximierungspfads würde hingegen ein stärkeres

politisches Eingreifen erfordern und mit potenziell disruptiven Veränderungen sowie indirekten, nachgelagerten Effekten einhergehen – wie in Abschnitt 4.3 näher erläutert.

4.2.1 Gesteigerte Materialverfügbarkeit ist die Grundlage für Wertschöpfung (A, B)

Ein zentrales Problem bei der Umsetzung von Kreislaufhebeln ist die unzureichende Verfügbarkeit von Inputmaterial und -produkten. Zum einen wachsen viele Abfallströme über die Zeit an: Für PV- und Windkraftanlagen beginnt erst jetzt eine erste Rückbauwelle, und auch EV-Batterien werden erst in einigen Jahren in größerem Umfang das Ende ihrer Lebensdauer erreichen. Zum anderen wird die verfügbare Menge durch zwei zusätzliche Faktoren weiter begrenzt, bei denen allerdings aktiv gegengesteuert werden kann: Erstens gehen relevante Abfallströme verloren, und zweitens sind viele Produkte aufgrund ihres Designs oder mangelnder Datentransparenz nicht in dem Maße verwertbar, wie es technisch möglich wäre.

Handlungsfeld A zielt auf den Verbleib von Ressourcen innerhalb europäischer Kreisläufe ab



ABBILDUNG 70 | A. Verlust verwertbarer Abfallströme minimieren

Ziele	Tangierte Segmente	Handlungen der Industrie	Tangierte Segmente	Rahmen der Politik
Rückführung und Sortierung innerhalb Europas stärken	● ● ● ● ●	Rücknahmesysteme etablieren für Industriekunden (Case-Study Wilo) bzw. Konsumenten (z. B. Fashion), z. B. durch vertragliche Rückführungs- bzw. Rücknahmerechte, Gründung von Konsortien (PV-CYCLE, Looper), Ausbau zirkulärer Ownership-Modelle (Product as a Service)	● ● ● ● ●	Vollzug stärken , z. B. Einhaltung v. Demontagepflichten u. Vorgaben zu Getrenntsammlung, z. B. von Elektronik (WEEE) und Bauabfällen (GewerbeabfallVO)
Nicht-EU-Exporte reduzieren	● ● ● ● ●	Inlandsverwertung in Unternehmenszielen verankern , z. B. Selbstverpflichtungen in Bezug auf Abfallexportmengen oder Berücksichtigung in Ausschreibungen zu Rückbau (Energieinfrastruktur)	● ● ● ● ●	Transport- und Rücknahmehürden abbauen¹ , insb. von Maschinenkomponenten od. Schwarzmasse, z. B. durch einheitliche Risikokategorien, Verfahrensbeschleunigung
				Nicht-EU-Exporte steuern , z. B. durch präzisere EU-weite Altfahrzeugkriterien ² (inkl. Exportdokumentation) und verbesserten Datenaustausch; nichtkonforme Exporte von PV-Anlagen verhindern; Einführung eines differenzierten Kriterienkatalogs für Exportbeschränkungen für Alttextilien (z. B. nach Qualität, Menge, Exportziel); Berücksichtigung zirkulärer Materialströme in EU-Handelsabkommen

Zutreffend für: ● Mobilität ● Maschinenbau ● Bauwesen ● Energie ● Textil

1. Insb. in EU-Abfallverbringungsverordnung 2. Im Rahmen der neuen AltfahrzeugeVO vorgesehen

Der Verlust wertstoffreicher Abfallströme reduziert die Verfügbarkeit und die ökonomischen Chancen in allen Segmenten, etwa bei Altfahrzeugen, Alttextilien und Elektrogeräten wie PV-Anlagen. Für einzelne Stoffströme, etwa Schwarzsand aus Batterien, haben die jüngsten Änderungen im EU-Abfallverbringungsrecht zwar die Kontrolle von Exporten gestärkt, zugleich jedoch zusätzliche Hürden für die innereuropäische Verbringung geschaffen. Vor diesem Hintergrund setzen wirksame Maßnahmen an zwei Stellen an: Zum einen kann die Industrie Rücknahme- und Sammelsysteme aufbauen, beispielsweise in branchenweiten Konsortien. Zum anderen ist die Politik gefordert, Vollzugsprozesse zu digitalisieren, Notifizierungsverfahren zu vereinfachen und bestehende Hürden bei Transport und Rücknahme abzubauen. Gleichzeitig sind EU-weit klare Kriterien zur Abgrenzung von Gebrauchtprodukten und Abfällen erforderlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Deutschland bei verschiedenen Metallschrottfraktionen zugleich Importland ist. Ziel ist daher kein pauschales Einschränken des Handels oder der tatsächlichen Wiederverwendung im Ausland. Von zentraler Bedeutung ist vielmehr die Etablierung europäischer Kreisläufe, die im Rahmen der nächsten fünf Handlungsfelder erläutert wird.

Zusätzlich begrenzen Produktdesign und fehlende Datentransparenz die Kreislauffähigkeit vieler Güter. Bei Fahrzeugen erschweren eingeschränkte Demontagefähigkeit und komplexe Komponentenstrukturen die Verwertung. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf das Ziel, die Materialien wieder in anspruchsvollen Anwendungen wie dem Mobilitätssegment einzusetzen – auch wenn das *International Dismantling Information System (IDIS)* bereits einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Demontageinformationen leistet. Im Bausegment erschweren historisch gewachsene Bauweisen und schwer trennbare Verbundmaterialien eine sortenreine Erfassung, und im Textilsektor führen Mischfasern, mehrlagige Konstruktionen und Störfaktoren zu erheblichen Hürden für ein Faser-zu-Faser-Recycling. Diese Herausforderungen können durch *Design for Circularity (DfC)*, standardisierte Materialien und Komponenten, verbesserte Datentransparenz sowie eine optimierte Sortierung adressiert werden.

Höhere Kreislaufverwertbarkeit erfordert kreislauffähigeres Design, Datentransparenz und verbesserte Sortiertechnologien



ABBILDUNG 71 | B. Kreislaufverwertbarkeit sicherstellen

Ziele	Tangierte Segmente	Handlungen der Industrie	Tangierte Segmente	Rahmen der Politik
Kreislauf-fähiges Design etablieren	● ● ● ● ●	DfC/DfD1 als Designprinzip verankern, z. B. Retrofit-, Demontage-, Recycling-Fähigkeit durch Modularität und Optimierung v. Verbundarten ("De-Bonding", z. B. bei Rotorblättern) und Einbindung v. Verwertern bei Design	● ● ● ● ● ○ ○ ● ● ●	Designanforderungen (bspw. ESPR) prüfbar konkretisieren ³ u. praxisnah auslegen, z. B. Kunststoff-Verbundarten ⁴ DfC-/DfD-Kriterien in öffentlichen Ausschreibungen und Bauordnungen verankern
Materialien und Komponenten standardisieren	● ● ● ● ●	Industriestandards setzen bzw. in Normungs-/Standardisierungsinitiativen engagieren, z. B. zur Vereinheitlichung von Materialstandards und -auswahl, Kennzeichnungen für Demontage		
Datentransparenz schaffen	● ● ● ● ●	Software für zirkuläre Geschäftsmodelle integrieren, z. B. Rückverfolgungssoftware, DGP und DPP ² , Predictive-Maintenance- und Analytics-Software (z. B. Batterien für Anwendungen im 2nd Life)	● ● ● ● ●	DGP/DPP und Verwertungsnachweise wirksam und proportional umsetzen und vollziehen, z. B. durch fokussierten Stufenplan, Kerndaten-Standardisierung, einheitliche Leitfäden, digitale Schnittstellen in Vollzug
Sortier-/ Demontage-technologie verbessern	○ ● ● ● ●	Gezielt Forschung und Entwicklung betreiben, insb. für komplexe Abfallströme, z. B. sortenreine Trennung von Automaterialfraktionen durch Sensor- und KI-gestützte Sortiertechnik (siehe Exkurs 5)	● ● ● ● ●	Förderprogramme etablieren für Pilotanlagen bzw. die Nachrüstung bestehender Anlagen mit Zukunftstechnologien (siehe Exkurs 7), etwa Sonderabschreibungen und Zuschüsse, z. B. für PU-Bauabfälle

Zutreffend für: ● Mobilität ● Maschinenbau ● Bauwesen ● Energie ● Textil

1. Design for Circularity/Design for Deconstruction 2. Digitaler Gebäudepass und digitaler Produktpass 3. Über delegierte Rechtsakte der ESPR (inkl. Textil, energiebezogene Produktgruppen wie PV), Batterieverordnung, AltfahrzeugeVO (II) 4. Im Sinne von weniger oder optimierten Klebeverbindungen bei Automobilanwendungen

Entscheidend ist dabei das aktive Handeln der Unternehmen; eine wesentliche Bedeutung kommt aber auch dem regulatorischen Rahmen zu. Mit der Ökodesign-Verordnung (unter anderem für ausgewählte Textilien und Elektroprodukte) sowie der Bauprodukteverordnung und der EU-Batterieverordnung wurden bereits wichtige Weichen für *Design for Circularity*, *Design for Disassembly/Deconstruction (DfD)* sowie für eine verbesserte Datentransparenz hinsichtlich digitaler Produkt- bzw. Gebäudepässe gestellt. Dabei kommt es darauf an, dass die Anforderungen an den digitalen Produktpass differenziert nach Materialrelevanz und Produktkomplexität ausgestaltet werden und keine unnötige Datenlast oder operative Überforderung der Unternehmen verursachen. Die Unternehmen müssen diese Instrumente aktiv und sinnvoll einsetzen, auf ihre spezifischen Anwendungsfelder übertragen und daraus einen wirtschaftlichen Nutzen ableiten. Hieraus ergeben sich für sie direkte Vorteile, nicht nur durch effizientere Wartung, sondern auch durch eine verbesserte Compliance sowie geringere Haftungsrisiken. Viele insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sind jedoch im Hinblick auf die skizzierten digitalen Instrumente noch nicht aus-

reichend in der Lage, Daten zu erfassen, zu verarbeiten und zu nutzen.

4.2.2 Wettbewerbsfähige Verwertung erfordert Kapazitäten und Wirtschaftlichkeit (C, D)

Viele Recycling- und Wiederaufbereitungsverfahren stehen erst am Übergang zur industriellen Skalierung. Daher genügt es nicht, allein die Verfügbarkeit an verwertbaren Produkten und Materialien zu erhöhen – der Mangel an Verarbeitungskapazitäten für bestimmte Stoff- und Produktströme²⁵⁵ muss abgebaut werden, sowohl im Recycling als auch in der Wiederaufbereitung. Dabei sind drei Punkte zentral:

1. Aktuelle technische Barrieren bzw. Qualitätsgrenzen müssen bei bestimmten Stoffströmen durch Zukunftstechnologien überwunden werden, zum Beispiel bei Seltenerdmetallen. Wie in Exkurs 7 dargestellt, eröffnet dies zugleich Chancen für Innovationsführerschaft und Export.

²⁵⁵ Nicht relevant zum Beispiel für Aluminium.

Weiterentwicklung und Skalierung von Verarbeitungstechnologie nötig, Politik mit fördernder Funktion



ABBILDUNG 72 | C. Technologiereife und Verarbeitungskapazitäten erreichen

Ziele	Tangierte Segmente	Handlungen der Industrie	Tangierte Segmente	Rahmen der Politik
Gezielt Know-how aufbauen und Technologien entwickeln	● ● ● ● ●	Entwicklungskooperationen eingehen , z. B. über Aufbau strategischer Partnerschaften und Ökosysteme entlang der Wertschöpfungskette, gemeinsame Gründung spezialisierter Initiativen oder Start-ups	● ● ● ● ●	Pilotanlagen mit kurzen Genehmigungszeiten¹ fördern , zur Verprobung von Technologien mit geringem Reifegrad (siehe Exkurs 3), z. B. für seltene Erden, Verbundstoffe, Textilien (Faser-zu-Faser)
Remanufacturing-Infrastruktur aufbauen	● ● ● ● ●	Remanufacturing- und Refurbishment-Systeme aufbauen , inkl. Linien , Rückführungsinfrastruktur (i. S. v. <i>Reverse Logistics</i>), Prüf-, Reinigungs- und Wiederaufbereitungsprozesse		
Recycling-Anlagen skalieren und Technologien industrialisieren	● ● ● ● ●	Referenzprojekte realisieren , z. B. zur Aufbereitung von Metallen aus Altfahrzeugen, Umsetzung voll-automatisierter Linien	● ● ● ● ●	Skalierung fördern , z. B. durch Zuschüsse und Anschubfinanzierungen, Darlehen mit Tilgungszuschuss, Risikoabsicherung für Inputschwankungen, z. B. für Stahl, Kunststoffe, Beton, aber auch ganze Produkte wie PV-Anlagen
Nachgelagerte Verarbeitung etablieren	● ● ● ● ●	Veredelungs-/Produktionskapazitäten aufbauen , z. B. Grundstoffindustrien (Aluminium-Ofentechnologien mit H ₂ -Einsatz und EAF-Stahlproduktion) sowie Wachstumsmärkte wie Zell-, Magnet-, Halbleiterproduktion	● ● ● ● ●	Industriepolitische Rahmenbedingungen für Wachstumsmärkte setzen , neben aktiver Förderung für strategisch wichtige Verarbeitung, z. B. durch wettbewerbsfähige Energieversorgung und Bürokratieabbau

Zutreffend für: ● Mobilität ● Maschinenbau ● Bauwesen ● Energie ● Textil

1. Analog IPCEI (Important Projects of Common EU Interest)

2. Bereits entwickelte Technologien (z. B. *Remanufacturing*, Hydrometallurgie bei Batterien – siehe Case-Study 3: PreZero) müssen in deutlich größerem Maßstab skaliert werden, was bisher unter anderem noch durch hohe Investitionskosten, geringe Materialverfügbarkeit und regulatorische Unsicherheiten gebremst wurde.
3. Zudem ist der gezielte Aufbau von Kapazitäten in ausgewählten nachgelagerten und strategisch wichtigen Prozessen erforderlich, um Kreislaufücken in Europa zu schließen und die Versorgungssicherheit sowie Resilienz innerhalb Europas zu stärken. Dazu zählen Zellproduktionskapazitäten im Batteriebereich, die geplanten EAF-Kapazitäten sowie Sekundär- und Umschmelzkapazitäten für Aluminium, die entscheidend sind, um die Grundstoffindustrie in Deutschland zu halten.

Gerade in diesem Handlungsfeld ist die enge Zusammenarbeit zwischen allen Stakeholdern entscheidend. Die Industrie muss eigenes Know-how und eine entsprechende Verwertungsinfrastruktur auf-

bauen, dabei gewinnen Partnerschaften und Ökosysteme an Bedeutung. Denn mit dem Übergang von weitgehend linearen Wertschöpfungsketten zu zirkulären Systemen verändern sich Rollen und Verantwortlichkeiten grundlegend: Der Endkunde – ob Konsument oder Industrieunternehmen – wird zunehmend zum Lieferanten von *Feedstock* für den Wiederaufbereitungs- und Recycling-Prozess. Dadurch werden eine koordinierte Zusammenarbeit und ein Wissenstransfer entlang des gesamten Kreislaufs unverzichtbar. Ergänzend bleibt eine aktive Förderung durch die öffentliche Hand unabdingbar, zum Beispiel durch Zuschüsse, Anschubfinanzierungen oder Darlehen mit Tilgungszuschuss.

Der Aufbau neuer Recycling-Kapazitäten scheitert aktuell nicht nur an hohen Anfangsinvestitionen, sondern auch an der wirtschaftlichen Stabilität im laufenden Betrieb. Allein in Europa sieht sich Deutschland gegenüber anderen Ländern zum Beispiel beim Kunststoff-Recycling mit strukturellen Nachteilen im Bereich Lohn- und Energiekosten konfrontiert (siehe Abbildung 80 im Anhang). Wie bereits in vergangenen Studien ausgeführt²⁵⁶, müssen

²⁵⁶ BCG, IW und BDI (2024).

Adressierung der Kostennachteile vor allem durch die Politik, zusätzlich Effizienzsteigerung durch die Industrie gefragt



ABBILDUNG 73 | D. Strukturelle Kostennachteile adressieren und überwinden

Ziele	Tangierte Segmente	Handlungen der Industrie	Tangierte Segmente	Rahmen der Politik
Standortfaktor kompensieren <i>(für internationale Wettbewerbsfähigkeit)</i>		Automatisierungs- und (KI-)Digitalisierungshebel zur Effizienzsteigerung nutzen , z. B. datengetriebene Prozessoptimierung, Predictive Maintenance, digitale Qualitätskontrolle sowie Energie- und Materialeffizienzprogramme		Industriepolitische Maßnahmen forcieren , z. B. Abbau von Bürokratie, wettbewerbsfähige Industriestrompreise, Steueranreize für Automatisierung und Digitalisierung Faire Wettbewerbsbedingungen herstellen , insb. bei Batterien, z. B. durch Grenzausgleichsmaßnahmen, Anforderungen an EU-Wertschöpfungsanteile
Verwertungsentscheidungen steuern <i>(für Wettbewerbsfähigkeit gegenüber linearen Lösungen)</i>			(Temporäre) Verwertungs-/Rezyklateinsatzquoten einführen für ausgewählte strategische/kritische Stoffströme (z. B. Magnete ¹), um kritische Masse zu erreichen Gestaffelte Entsorgungsentgelte einführen , z. B. für thermische Verwertung (Ökomodulation) Prüfung von Sanierungs- oder Teilrückbauoptionen in Abrissgenehmigungen integrieren ; nationales Monitoring der Einsatzströme von Recycling-Materialien etablieren Bestehende Vorgaben zu Verwertungsentscheidungen konsequenter vollziehen und Zeitleiste zur Umsetzung geplanter Vorgaben klar definieren	

Zutreffend für: Mobilität Maschinenbau Bauwesen Energie Textil

1. Inklusive der enthaltenen seltenen Erden

ein effizienter Ausbau des Stromsystems, die Entlastung industrieller Verbraucher und der Zugang zu emissionsarmen Molekülen gesichert werden, um wettbewerbsfähige Energiekosten zu gewährleisten. Bei Flachstahl oder Beton wiederum hängt die Wettbewerbsfähigkeit von Rezyklaten maßgeblich mit dem EU-ETS zusammen. Die Circular Economy ist damit eng mit der Klimaschutzpolitik verknüpft und ein zentraler Enabler für CO₂-Einsparungen. Vor dem Hintergrund steigender CO₂-Preis-Erwartungen und rascher technologischer Weiterentwicklungen in Recycling-Technologien könnten Rezyklate bis 2045 auch ohne zusätzliche politische Eingriffe mit der Primärproduktion wettbewerbsfähig sein. Dies muss jedoch langfristig durch industriepolitische Rahmenbedingungen für ein *Level Playing Field*, insbesondere durch einen funktionierenden Carbon-Leakage-Schutz und harmonisierte Regelungen, abgesichert werden (siehe Kapitel 4.4.2).

In anderen Stoffströmen ist hingegen ein gezieltes politisches Adressieren erforderlich, insbesondere bei strategischen oder kritischen Materialien. Bei Magneten oder Batterien ist Entsorgung und Neubeschaffung – etwa über Importe – kurzfristig oft kostengünstiger als der Aufbau geschlossener Kreisläufe in Deutschland oder Europa. Um Wert-

schöpfung aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive zu sichern und dadurch Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit der davon abhängigen Sektoren aufzubauen, sind Maßnahmen notwendig, die die bestehenden Nachteile gezielt ausgleichen. Temporäre Verwertungs- und Rezyklateinsatzquoten können hierbei ein wirksames Instrument sein, um den Markthochlauf zu ermöglichen und Planungssicherheit in spezifischen Stoffströmen zu erzeugen. Ergänzend dazu sind besondere Anreizmechanismen erforderlich, auf die im nächsten Handlungsfeld näher eingegangen wird.

4.2.3 Die Nachfrage nach zirkulären Produkten muss gestärkt werden (E, F)

Eine stabile Nachfrage nach Rezyklaten und wiederaufbereiteten Produkten ist entscheidend, um eine Verwertung wirtschaftlich und ohne staatliche Vorgaben betreiben zu können. Maßnahmen zum Ausgleich bestehender Kostennachteile (siehe 4.2.2) schaffen dafür eine wesentliche Grundlage. Darüber hinaus gibt es aber weitere Maßnahmen, um Absatzmärkte zu stärken und die richtigen Rahmenbedingungen zu schaffen.

Stärkung der Nachfrage kann vorrangig durch die Industrie vorangetrieben werden, Politik muss passende Anreize setzen



ABBILDUNG 74 | E. Nachfrage und Absatzmärkte stärken

Ziele	Tangierte Segmente	Handlungen der Industrie	Tangierte Segmente	Rahmen der Politik
Beschaffung auf Zirkularität ausrichten	● ● ● ● ●	In Richtlinien und Ausschreibungen des Einkaufs verankern, z. B. durch bevorzugte Lieferantenauswahl nach CE-Kriterien, dazu Lieferkettenresilienz intern transparent machen	● ● ● ● ●	In öffentlichen Ausschreibungen verankern, z. B. verbindliche Mindestanforderungen im öffentlichen Bau, innovationsorientierte Vergabeverfahren
Nachfrage bündeln	● ● ● ● ●	Mengen konsolidieren und Markt durch Kooperation stabilisieren, z. B. durch kollektive Beschaffung (Offtake-Pools, JVs, Demand-Alliances), Aufbau von (digitalen) Aggregatoren, langfristige Abnahmeverträge	● ● ● ● ●	Öffentliche Nachfrage bündeln, z. B. durch zentrale und interkommunale Beschaffung, Einsatz von Rahmenvereinbarungen/Mehrjahresverträgen, digitale Beschaffungsplattformen zur Aggregation
Zirkuläre Produkte attraktiver machen	● ● ● ● ●	Zirkuläre Produkte aktiv in Portfolio verankern, z. B. durch Positionierung als Produktlinie, Anpassung von Vertrieb und Incentivierung sowie Bepreisung, Service-Geschäftsmodelle, Etablierung von Marktplätzen	● ● ● ● ●	Nachteile zirkulärer Produkte heilen, z. B. Capex-Bias im Netzausbau auflösen ² , Garantie-/Versicherungshürden beseitigen, Eluatwerte statt Feststoffwerte in Baubestimmungen
	● ● ● ● ●	Transparenz herstellen, insb. über verfügbare Mengen, Preise und Qualitäten von Rezyklaten und zirkulären Produkten	● ● ● ● ●	Anrechenbarkeit zirkulärer Maßnahmen sicherstellen in EU-Flottenregulierung, EU-Taxonomie ⁴
			● ● ● ● ●	Preisvorteile schaffen, z. B. durch steuerliche Impulse ¹ (reduzierte MwSt., Sonderabschreibungen bei Nutzung von Rezyklaten ³), wirksame Ökomodulation

Zutreffend für: ● Mobilität ● Maschinenbau ● Bauwesen ● Energie ● Textil

1. U. a. auch bei Spenden von Neuwaren durch Unternehmen 2. Gleichstellung Refurbishment mit Neuproduktion 3. Im Bau wirkt sich die lange Lebensdauer negativ auf die Verfügbarkeit von Rezyklaten aus. Die Verfügbarkeit von Rezyklaten muss sichergestellt sein 4. Etwa Aufnahme aller relevanten Services im Zshg. mit der Circular Economy in Aktivitätenkatalog

Nur wenn Unternehmen Zirkularität in Angebot und Beschaffung strategisch verankern und die Politik entsprechende Anreize setzt, können verlässliche Märkte entstehen. Unternehmen müssen Absatzmärkte sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite aktiv entwickeln. Bei der Nutzungsdauerverlängerung durch *Remanufacturing* und *Refurbishment* liegen die Hemmnisse weniger in externen Vorgaben, sondern primär in strategischen Prioritäten und kulturellen Mustern der Unternehmen. Hier gilt es, die Angebote bewusst im Portfolio zu verankern und Vertriebsstrukturen entsprechend auszurichten. Marktsicherheit entsteht durch langfristige Abnahmeverträge über ausreichend Volumen, die Investitionsbereitschaft und verlässliche Mengenströme sicherstellen. Die Politik könnte das durch Impulse wie steuerliche Vorteile, eine Anrechenbarkeit im Rahmen der EU-Taxonomie (im Sinne von Circular-Economy-Services-Aktivitäten²⁵⁷) sowie Vorgaben im Rahmen der Flottenregulierung incentivieren. Direkte politische Instrumente sind insbesondere dort entscheidend, wo die öffentliche Hand selbst als Abnehmer auftritt (z. B. öffentlicher Wohnungsbau) oder Vergütungslogiken vorgibt (z. B. Netzausbau).

An mehreren Stellen begrenzen strukturelle und methodische Rahmenbedingungen noch den Einsatz zirkulärer Produkte. *Remanufacturing*-Teile und Rezyklate werden in Freigaben, Garantien und Abrechnungslogiken nicht durchgängig gleichgestellt. Zudem können produktspezifische Regulierungen (z. B. Typgenehmigungen) diese Ansätze ausbremsen, und es fehlen etablierte Verfahren, Prozesse und Marktplätze. Die Schaffung dieser Anwendbarkeit bildet den letzten Baustein, um die Nachfrage nach zirkulären Produkten nachhaltig zu stärken.

²⁵⁷ Zum Beispiel sind heute nicht alle relevanten Maschinenbau-Cluster (als NACE-Codes) enthalten.

Industrie und Politik müssen durch angepasste Standards und Strukturen die Anwendbarkeit zirkulärer Produkte sicherstellen



ABBILDUNG 75 | F. Anwendbarkeit sicherstellen und Rahmenbedingungen schaffen

Ziele	Tangierte Segmente	Handlungen der Industrie	Tangierte Segmente	Rahmen der Politik
Anerkennung und Genehmigung verankern	● ● ● ● ●	Test- und Genehmigungsverfahren aufbauen , z. B. für wiederverwendete Maschinen und Bauteile	● ● ● ● ●	Prüfanforderungen definieren , z. B. zur Anerkennung neuer Recycling- und Aufbereitungsverfahren, Vereinheitlichung der Prüfanforderungen für Rezyklate (Beton)
Normen und Standards anpassen	○ ○ ● ● ○	Technische Industriestandards anpassen , z. B. von Rezyklaten aus Kunststoffabfällen wie PU-Dämm-schäumen; gleichwertige Prüfanforderungen für Rezyklate, insb. bei Beton	● ● ● ● ●	GefahrenEinstufung von Abfall vereinheitlichen , EU-weite und segmentübergreifende Definitionen und konzeptionelle Harmonisierung (z. B. von Massenbilanz, Rezyklatqualitäten)
Strukturen für Markteinbindung schaffen	● ● ● ● ●	Digitale Marktplätze und Rohstoffdatenbanken etablieren , um Angebot und Nachfrage für wieder-verwendbare Produkte und Rezyklate transparent zusammenzubringen	○ ○ ○ ● ○	Regulatorischen Rahmen für bidirektionales Laden schaffen mit Regelungen für Datenaustausch, Netz-anschluss u. Vermarktung, inkl. Abschaffung d. Doppel-belastung bei Stromnebenkosten, Beschleunigung Smart-Meter-Rollout, pragmatische Messkonzepte
			● ○ ○ ● ○	Rechtssicherheit bei 2nd-Life-Batterien , z. B. einheit-liche Sicherheits- und Haftungsregeln (Standardisierung von SoH-Schwellen, Testprotokolle im DPP)

Zutreffend für: ● Mobilität ● Maschinenbau ● Bauwesen ● Energie ● Textil

Digitale Lösungen können die anderen sechs Handlungsfelder weiter vorantreiben



ABBILDUNG 76 | G. Digitale Lösungen entwickeln und ausrollen

Ziele	Tangente Segmente	Handlungen der Industrie	Tangente Segmente	Rahmen der Politik
Stoffströme sichtbar machen und Rückführung sichern (A, B)	● ● ● ● ●	Digitale Tracking- und Rücknahmesysteme etablieren, z. B. digitale Begleitdokumente/ Serialisierung, IOT-gestützte Container-/Transportverfolgung, automatisierte Registrierung/ Zuordnung und Vergütung von Rückläufern (Take-back)	● ● ● ● ●	Digitale Nachweis- und Datenstandards harmonisieren, z. B. interoperable Register (Transport/ Export), einheitliche Datenmodelle und Schnittstellen, verpflichtende digitale Dokumentation für kritische Stoffströme
Effizienz und Qualität datenbasiert steigern (C, D)	● ● ● ● ●	Digitale Zwillinge, Sensorik und datengetriebene Prozesssteuerung skalieren, z. B. Predictive Main-tenance, optimierte Auslastung/ Qualität, Energie- und Betriebskostenmonitoring; KI-gestützte Sortierung zur höheren Trennschärfe und Rezyklatqualität	● ● ● ● ●	Digitale Vollzugsprozesse und Prüfmechanismen etablieren, z. B. digitaler Verwertungsnachweis, automatisierte Plausibilitäts-/Risikoprüfungen, datenbasierte Marktaufsicht, verbindliche Reporting-Formate und Zugriffsmöglichkeiten für Behörden
Nachfrage durch Transparenz erleichtern (E, F)	● ● ● ● ●	Digitale Marktplätze und standardisierte Nachweise integrieren, z. B. Plattformen für Rezyklate/wieder-aufbereitete Produkte und Anbindung an Einkaufs-/Ausschreibungssysteme; DPP-basierte Nachweise zu Rezyklatanteil, Herkunft und Performance	○ ○ ● ● ●	Digitale Nachweise in Beschaffung/Ausschreibungen verankern, z. B. DPP/Zertifikate als Eignungs-/Zuschlags-kriterien, Harmonisierung von Zertifikatsstandards, klare Anforderungen an Datenqualität/Prüfbarkeit

Zutreffend für: ● Mobilität ● Maschinenbau ● Bauwesen ● Energie ● Textil

4.2.4 Digitalisierung als zentraler Enabler (G)

Die Entwicklung und der Einsatz digitaler Lösungen durch Industrie und Politik in allen Handlungsfeldern sind wichtig, um die Wettbewerbsfähigkeit der Hebel zu stärken.

Digitale Lösungen sichern verwertbare Abfallströme und vereinfachen Design und Dismantling (A, B). Digitale Tracking-Systeme machen Stoffströme sichtbar – von der Sammlung über die Sortierung bis zum Export, etwa über digitale Begleitdokumente, IoT-gestützte Container-Verfolgung oder Exportregister. Gleichzeitig können digitalisierte Take-back-Systeme Rückläufer eindeutig registrieren, automatisch zuordnen und vergüten – und damit Rücklaufquoten erhöhen.²⁵⁸ Digitale Produkt- und Gebäudepässe könnten relevante Material- und Produktinformationen – etwa zu Zusammensetzung, Demontierbarkeit und kritischen Komponenten – verfügbar machen. Dadurch entstünde Transparenz hinsichtlich bislang nicht berücksichtigter Materialwerte (z. B. Kupfer in Gebäuden) sowie eine Grundlage,

Rückbau und Rückgewinnung künftig gezielt wirtschaftlich zu incentivieren, während zugleich Design- und Demontageprozesse verbessert werden.

Digitalisierung erhöht die Effizienz des Technologieaufbaus und verbessert die Kostenposition von Recycling-, Repair-, Refurbishment- und Remanufacturing-Prozessen (C, D). Digitale Zwillinge, vernetzte Sensorik und datengetriebene Prozesssteuerung beschleunigen die Skalierung von Pilotanlagen, optimieren Auslastung und Qualität und senken die Energie- und Betriebskosten. KI-gestützte Sortiertechnologien verbessern die Trennschärfe und steigern die Qualität der Rezyklate. Gleichzeitig schafft digitale Transparenz hinsichtlich der Kosten, der Ausbeute und der CO₂-Effekte die Basis für gezielte Förderinstrumente und tragfähige Business-Cases und hilft auf diese Weise, Kostennachteile gegenüber dem Primärmaterial abzubauen. Dies ist eine Voraussetzung für Investitionen in die Sammel-, Sortier- und Aufbereitungsinfrastruktur. Zugleich erlauben digitalisierte Vollzugsprozesse eine effizientere und konsistentere Kontrolle bereits bestehender bzw. geplanter Vorgaben.

²⁵⁸ Umfang und Tiefe sind dabei materialspezifisch und verhältnismäßig auszugestalten, da bei Produkten mit geringem Materialwert auch KI-gestützte Sortierlösungen effizient sein können.

Digitale Lösungen unterstützen eine stärkere Nachfrage nach zirkulären Produkten (E, F). Digitale Marktplätze für Rezyklate, standardisierte Zertifikate und Anbindungen an Einkaufs- und Ausschreibungssysteme erleichtern es, Recycling-Anteile und Zirkularitätskriterien verbindlich in der Beschaffung zu verankern – sowohl in der öffentlichen Hand als auch in der Industrie. Digitale Produktpässe machen Recycling-Anteile, Materialherkunft und Leistungsdaten transparent und erhöhen so die Marktgängigkeit zirkulärer Produkte. Sie sind dabei nicht nur Instrument zur Umsetzung von Anforderungen, sondern haben auch selbst ein erhebliches Markt- und Wertschöpfungspotenzial, das von Industrie und Dienstleistern aktiv adressiert werden kann. Zudem ermöglichen automatisierte Prüfalgorithmen und digitalisierte Vollzugsprozesse es Behörden, Sortiervorgaben oder Rezyklateinsatzquoten verlässlich zu kontrollieren, anstatt sich auf analoge Dokumentationen und Selbstauskünfte zu stützen.

Viele insbesondere kleine und mittlere Unternehmen sind jedoch oft für die skizzierten digitalen Instrumente noch nicht ausreichend in der Lage, Daten zu erfassen, zu verarbeiten und zu nutzen.

In einer Befragung von VDI-ZRE und IW gelten 57 % der industriellen KMU, die bereits zirkuläre Maßnahmen umsetzen, als nicht digitalisiert.²⁵⁹ Der Stand der Vorbereitung auf digitale Produktpässe ist gering: Nur 15 % der Unternehmen haben bereits entsprechende Maßnahmen ergriffen oder planen diese. Häufig fehlt zudem die Grundlage in Form standardisierter und teilbarer Produktdaten, was insbesondere kleinere Unternehmen betrifft.²⁶⁰ Zugleich verdeutlichen die Befunde die Grenzen umfassender Datentransparenz: Ohne wirksamen Schutz von Geschäftsgeheimnissen und geistigem Eigentum drohen Akzeptanzprobleme. Da Unternehmen als primäre Datenquelle den Großteil der Investitionskosten tragen, hängt der Erfolg maßgeblich von einer pragmatischen und verhältnismäßigen Ausgestaltung der Anforderungen ab.

Die Circular-Economy-Roadmap lässt erkennen, dass die Erschließung zirkulärer Potenziale ein koordiniertes Zusammenspiel von unternehmerischem Handeln und politischer Rahmensetzung erfordert. Aktive Maßnahmen der Unternehmen sind unerlässlich. Zudem wird aber auch ein klarer, konsistenter und langfristig angelegter politischer Ordnungsrahmen benötigt, der wirksame Anreize setzt, Vollzug sicherstellt und damit Planungssicherheit schafft (siehe Kapitel 4.4).

4.3 Der Maximierungspfad erfordert eine stärkere Weiterentwicklung bestehender Marktdynamiken

Der Maßnahmenkatalog der Roadmap ist auf den Intensivierungspfad ausgelegt. Für den Maximierungspfad wären an einzelnen Stellen weitergehende gesellschaftliche Anstrengungen und Veränderungsprozesse erforderlich:

- **Hebel zur Nachfragereduktion bzw. zur Suffizienz** (wie *Vehicle to Grid* im Energiesegment) entfalten ihr Potenzial nur im Maximierungspfad, da sie Produktion reduzieren (V2G) oder Eingriffe in Konsum- und Nutzungsgewohnheiten erfordern würden.
- **Hebel zur Nutzungsdauerverlängerung** (*Remanufacturing* im Mobilitäts- oder *Resale* im Textilsegment) erfordern im Maximierungspfad eine stärkere Marktdurchdringung. Zu ihrer Umsetzung wären bindende Rücknahmequoten oder die Verpflichtung zum Angebot wiederaufbereiteter Ersatzteile (als Mindestanteil im Portfolio) nötig.
- **Recycling-Hebel** (in allen Segmenten) nehmen im Maximierungspfad technische Maxima Stoffströme hinweg an. Zur Umsetzung wären ambitionierte Einsatz- und Verwertungsquoten nötig.

Solche Maßnahmen bringen jedoch indirekte Effekte mit sich: Produkte könnten teurer werden, ein tiefgreifender Strukturwandel von Produktions- hin zu Dienstleistungsindustrien wäre möglich und damit eine Verschiebung von Wertschöpfungsstrukturen. Zudem wären tiefere Eingriffe in Konsum- und Nutzungsgewohnheiten erforderlich.

Ein vollständig zirkuläres Wirtschaftssystem ginge über den Maximierungspfad hinaus. Entsprechende Hebel wurden in dieser Studie zwar analysiert, jedoch depriorisiert, da das Ziel nicht maximale Zirkularität, sondern die Identifizierung von Maßnahmen mit signifikantem Wertschöpfungspotenzial war. Beispiele sind die Gewichtsreduktion von Pkw, alternative Mobilitätsmodelle (Carsharing/ÖPNV) oder Co-Working-Konzepte im Bausegment. In einer rein ökonomischen Betrachtung der Bruttowertschöpfung würden diese Hebel keinen positiven Beitrag zur deutschen Industrie leisten und zugleich tief in Konsum-, Nutzungs- und Produktionsmuster eingreifen.

²⁵⁹ Lichtenthäler et al. (2025).

²⁶⁰ Büchel und Neligan (2025).

4.4 Eine wettbewerbsfähige Circular Economy erfordert das Zusammenspiel von Industrie und Politik

4.4.1 Die Transformation setzt aktives Handeln von Unternehmen voraus

Zentrale Erfolgsfaktoren bilden die Voraussetzung dafür, dass Unternehmen zirkuläre Geschäftsmodelle etablieren und wirtschaftliche Potenziale erschließen können. Es existiert bereits eine Vielzahl von Studien, die die entscheidenden Handlungsfelder zusammenfassen.^{261,262,263} Sie zeigen konsistent, dass eine Skalierung der Circular Economy nur dann gelingt, wenn sie als Top-Management-Agenda verankert wird. Wesentlich sind dabei eine Operationalisierung über klare Zielbilder, wenige, steuerbare Kennzahlen und eine robuste Governance sowie die Übersetzung in tragfähige Investitions- und Geschäftsmodelle über priorisierte Material- und Produktcluster.

Darüber hinaus lassen sich aus den Case-Studies dieser Studie zentrale unternehmensbezogene Ableitungen gewinnen:

- **Zirkuläre Wertschöpfung skaliert dort, wo Unternehmen den Ansatz über Jahre konsequent im Kerngeschäft verankern.** Dabei sind klare Verantwortlichkeiten, Investitionspfade und Standards entlang des Produktlebenszyklus unverzichtbar. Erfolgreich ist nicht der Einzelhebel, sondern die Fähigkeit, Rückführung, Wiederverwendung und Verwertung als wiederholbares Betriebsmodell aufzusetzen (siehe Case-Study 4: Wilo). Hierfür müssen Ambitionen deutlich quantifiziert werden, einschließlich der Monetarisierung von Effekten auf die Stabilisierung der Rohstoffversorgung und auf Treibhausgasemissionen.
- **Kreisläufe sind in der Praxis Ökosysteme.** Wertschöpfung entsteht gemeinsam, aber nur dann, wenn Rollen, Datenbeiträge, Risiken und Erlöse transparent geregelt sind. Gerade bei komplexen Industriegütern wird Skalierung durch abgestimmte Modelle zwischen OEMs, Betreibern und Verwertern erreicht (siehe Case-Study 1: Siemens). Vor diesem Hintergrund sind die Einbindung von Forschungsclustern sowie die strategische Betrachtung und Integration von Kooperationen mit Start-ups zentrale Erfolgsfaktoren.

- **Digitale Lösungen sind unerlässlich.** Ohne zuverlässige Datenbasis (Zustand, Materialzusammensetzung, Demontage /Qualitätsinformation) scheitern zirkuläre Ansätze schnell an Prozesskosten und Unsicherheit. Über digitale Plattformen, Nachverfolgbarkeit und zunehmend KI-gestützte Service- und Modernisierungskonzepte ist es möglich, Verwertung und Aufarbeitung in Kernprozesse zu integrieren (siehe Case-Study 5: ANDRITZ Kaiser sowie Case-Study 8: E.ON).
- **Zirkuläre Märkte benötigen nicht nur mehr Mengen, sondern vor allem höhere Qualität** – und diese wird oft erst durch Innovationen in den Bereichen Sortierung, Aufbereitung und Rückgewinnung erzielt. Schrittweise Technologieverbesserungen entscheiden damit über die Wettbewerbsfähigkeit (siehe Case-Study 2: TSR).

Aus den vorhandenen Studien sowie den aufgeführten Case-Studies wurden die acht wichtigsten Handlungsschritte für Unternehmen abgeleitet.

Die Umsetzung der Circular Economy erfordert das Zusammenspiel verschiedener Akteure entlang ganzer Wertschöpfungskreisläufe – von der Identifizierung zentraler Gestaltungsmöglichkeiten (einschließlich Normung und Standardisierung) über die Beschaffung und Rückwärtslogistik bis hin zum Aufarbeitungs- bzw. Verwertungsprozess. Trotz unternehmensspezifischer Unterschiede lassen sich dabei entscheidende Erfolgsfaktoren identifizieren, die eine wirksame und skalierbare Umsetzung unterstützen. An ihnen ist erkennbar, wie unternehmerisches Handeln an Strategie, Organisation und Umsetzung wirksam ausgerichtet werden kann.

4.4.2 Die Politik muss einen verlässlichen Umsetzungsrahmen schaffen

Dem unternehmerischen Handeln kommt zentrale Bedeutung zu, doch erfordert die Transformation der deutschen Industrie auch einen verlässlichen regulatorischen Rahmen. Unternehmen benötigen konsistente und langfristige Rahmenbedingungen, um Investitionen in Technologien, Anlagen und Infrastruktur sicher planen zu können.

Derzeit wirkt der regulatorische Rahmen jedoch teilweise hemmend: Er wird in der EU uneinheitlich angewendet, ist oft komplex ausgestaltet und verzögert Prozesse. Zudem fehlt es vielerorts an einer konsequenten Umsetzung, sodass trotz bestehender Regelungen keine ausreichende Investitionssicherheit

²⁶¹ WBCSD und BCG (2018).

²⁶² WBCSD und BCG (2019).

²⁶³ WBCSD und BCG (2022).

Die Transformation der Circular Economy erfordert ein aktives Handeln von Unternehmen

8 Schritte zur Verankerung der Circular Economy in Unternehmen

- 1 Zirkularität als Wettbewerbs- und Resilienz-Agenda im Top-Management verankern
- 2 Klares Zielbild für Zirkularität definieren und konzernweit kommunizieren
- 3 Ambitionen quantifizieren und in wenige, steuerbare KPIs übersetzen
- 4 Governance und Verantwortlichkeiten entlang des Wertschöpfungskreislaufs festlegen
- 5 Prioritäre Material-/Produkt-Cluster auswählen und Kreislaufhebel konsequent fokussieren
- 6 Business-Cases und Innovationsentwicklung für priorisierte Hebel absichern (inkl. kontinuierlicher Technologieverbesserung)
- 7 KI und digitale Lösungen als Enabler skalieren und in Kernprozesse integrieren
- 8 Partnerschaften und Ökosysteme orchestrieren: Value-Pools transparent machen und fair verteilen

Anmerkung: Beispielhafte Ausgestaltung auf Basis von WBCSD & BCG (2018): The new big circle.

Die Politik muss einen verlässlichen Rahmen für die Umsetzung schaffen

ABBILDUNG 77 | Anstoßpunkte für regulatorische Rahmenbedingungen in den Segmenten

	Regulatorik auf EU-Level harmonisieren	Regulatorik vereinfachen	Regulatorik schärfen/stärker vollziehen
Mobilität	Z. B. Überarbeitung der EU-Abfallverbringungsverordnung zur Vereinheitlichung der Prozesse für Batterien, Metalle und Kunststoffe (i. S. v. Einführung einheitlicher Risikokategorien)	Z. B. Beschleunigung EU-Abfallverbringungsverfahren für Batterien, z. B. durch Schnellverfahren für zertifizierte Recycler	Z. B. Einhaltung von Demontagepflichten; Präzisierung und Vollzug Kriterienkatalog zur Abfalleinstufung (neue ELV-Regulierung)
Energie			Z. B. in Bezug auf PV-Rücknahmepflichten aus WEEE, Deponieverbot für Rotorblätter
Bauwesen	Z. B. durch einheitliche End-of-Waste-Kriterien und Gefahreneinstufung von Abfall, einheitliche Prüfanforderungen für RC-Materialien (Beton)	Z. B. Eluatwerte statt Feststoffwerte in technischen Baubestimmungen	Z. B. durch klarere Zuständigkeiten und Vollzugsmechanismen der Gewerbeabfallverordnung (Getrenntsammlung)
Maschinenbau	Z. B. DPP-Harmonisierung inkl. delegierter Rechtsakte im Rahmen der ESPR, Aufnahme des Maschinenbaus in EU-Taxonomie-Service-Kriterien	Z. B. Transport- und Rücknahmeanforderungen (EU-Abfallverbringungsverordnung, KrWG) und stoffrechtliche Vorgaben bei <i>Reman./Refurb.</i>	Z. B. durch Schärfung der Marktaufsicht (Sammelungs-, Trennungs-, Verwertungsziele in GewAbfV, KrWG, ElektroG)
Textil	Z. B. EU-Abfallverbringungsverordnung (inkl. <i>Green List</i>), EPR, End-of-Waste-Kriterien, Ökodesign inkl. DPP und Ökomodulation	N. a.	Z. B. durch klare Schaffung von Rechtssicherheit in EU und Drittstaaten
Übergreifend	Z. B. EU-weite u. segmentübergreifende Definitionen in Richtlinien/Verordnungen (Massebilanz, Rezyklatqualitäten), Kriterien zur Anerkennung neuer Recycling- und Aufbereitungsverfahren	Z. B. durch beschleunigte Anlagenehmigung, Übergangsregeln für historisch eingesetzte Stoffe in zirkulären Produkten (Stoffrecht), Abbau steuerl. Hürden (Metall-Umarbeitung über Firmengrenzen)	Z. B. durch bessere Verifizierung von Rezyklaten aus Drittstaaten, durch Ausweitung der Marktüberwachung

Quelle: BCG-Analyse

entsteht. Daher müssen im Kontext der Circular Economy zentrale Vorgaben – zum Beispiel zur Dekarbonisierung auf EU-Ebene – harmonisiert werden, eine Vereinfachung komplexer oder unnötig belastender Regulierungen ist erforderlich, und bestehende Vorgaben sind konsequenter zu vollziehen, damit Marktakteure Planungssicherheit erhalten und zirkuläre Lösungen verlässlich skaliert werden können.

Die Roadmap macht deutlich, dass die übergeordnete Industriepolitik eine Schlüsselrolle für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Circular Economy spielt. Sie adressiert Kostennachteile im internationalen Wettbewerb und schafft die Voraussetzungen, um nachgelagerte Wertschöpfungsstufen in Deutschland zu sichern und auszubauen. Die Ableitung entsprechender Maßnahmen steht nicht im Zentrum dieser Studie, wurde aber bereits im Rahmen der Transformationspfade-Studie holistisch durchgeführt. Die dortige Auseinandersetzung mit zentralen Standortfaktoren verdeutlicht, dass eine wettbewerbsfähige deutsche Industrie vor allem verlässliche und langfristige Rahmenbedingungen für Energie-, Infrastruktur- und Digitalinvestitionen benötigt. Ergänzend sind der konsequente Abbau bürokratischer Hürden, die gezielte Schließung von Fachkräftelücken sowie die systematische Stärkung industrieller Resilienz erforderlich. Die genannten Handlungsfelder zur **Sicherung der industriellen Basis und Beschleunigung neuen Wachstums** sind eng verwoben mit den Erkenntnissen der vorliegenden Studie.

Die Circular Economy ist ein zentrales Handlungsfeld für die industrielle Transformation. Sie ist selbst einer der 14 Pfeiler einer wettbewerbsstärkenden Industriepolitik – und gleichzeitig auf deren wirksame Ausgestaltung angewiesen.

Die Roadmap macht deutlich, dass die Transformation zur Circular Economy kollektives Handeln von Unternehmen und Politik entlang der sieben wesentlichen Handlungsfelder erfordert. Sie ist weder allein durch Regulierung noch allein durch Marktkräfte zu erreichen. Eine erfolgreiche Skalierung gelingt nur, wenn die Wettbewerbsfähigkeit sowohl gegenüber der Primärproduktion als auch im internationalen Vergleich sichergestellt ist. Entscheidend ist dabei, dass unternehmerische Umsetzungskraft auf einen klaren, konsistenten und verlässlich umsetzungsorientierten politischen Rahmen trifft. Gelingt dieses Zusammenspiel, kann die Circular Economy zu einem tragenden Pfeiler der industriellen Wettbewerbsfähigkeit in Deutschland werden; dafür spricht die zirkuläre Bruttowertschöpfung der in dieser Studie betrachteten Hebel kumuliert im Umfang von 700 bis 920 Mrd. Euro. Als systemischer Ansatz verbindet die Circular Economy wirtschaftliche Leistungsfähigkeit, strategische Souveränität und Klimaschutz. Sie bildet damit einen zentralen Baustein einer zukunftsfähigen deutschen Industrie.

Transformationspfade definieren 14 industriepolitische Handlungsfelder

ABBILDUNG 78 | Handlungsfelder der Transformationspfade

Wettbewerbsfähigkeit des Standorts wiederherstellen	Energieversorgung wettbewerbsfähig machen (Kosteneffizienterer Ausbau des Stromsystems; gezielte Entlastung von Strompreisen; Zugang zu günstigen erneuerbaren Molekülen)
	Infrastrukturen modernisieren und ausbauen (Beschleunigung von Stromnetzen und EE; H ₂ - und CO ₂ -Infrastruktur; Straße, Schiene und Wasserstraßen; E-/H ₂ -Ladeinfrastruktur)
	Digitalisierung offensiv voranbringen (Ausbau digit. Infrastr.; Unterstützung digit. Innovation u. Bildung; Digitalisierung öfftl. Sektor; Vereinfachung u. Schutz v. Datenaustausch; KI-Offensive)
	Verfahren beschleunigen und Bürokratie abbauen (Digitalisierung und techn. Verbesserungen; Bündelung von Zuständigkeiten und Prozessen; rechtliche Vereinfachungen; Änderungen im materiellen Recht)
	Fachkräftelücke schließen (Ausschöpfen des Arbeitskräftepotenzials; nationale Bildungsoffensive; Förderung qualifizierter Zuwanderung; Digitalisierung und Automatisierung)
Industrielle Basis sichern	Kritische Abhängigkeiten minimieren (Steigerung der Materialeffizienz; Verringerung von Importrisiken; Stärkung des EU-Rohstoffabbaus; Lokalisierung kritischer Produkte)
	Industrietransformation und -dekarbonisierung unterstützen (Ausreichende KSV; Ausweitung von Investitionsförderung neuer Anlagen; industr. Strompreisentlastung; Unterstützung d. Wärmewende; grüne Leitmärkte)
	Optionenraum für Dekarbonisierung erweitern (Entwicklung des regulatorischen Rahmens für CCUS in DE und EU; breiten CCUS-Einsatz ermöglichen; Schaffung gesellschaftlicher Akzeptanz für CCUS)
	Circular Economy stärken <i>In dieser Studie ausgearbeitet</i>
Neues Wachstum beschleunigen	Effektiven Carbon-Leakage-/Außenschutz herstellen (Reduktion CBAM-Bürokratie; Schutz von Exporten; flankierende Stärkung internationaler Zusammenarbeit)
	Nachfrage nach grünen Technologien stärken (Vor allem in Antriebswende, Energiewende, Wärmewende und Molekülwende)
	Innovation in Zukunftstechnologien fördern (Rahmen und Vision für langfristige Innovation; Stärkung des Transfers von Forschung in Wirtschaft; Förderung F & E; Mobilisierung von Wagniskapital)
	Ansiedlung neuer Produktion attraktiv machen (Vor allem gezielte Förderung durch direkte Subvention und Steueranreize; qualitative Lokalisierungskriterien)
	Fairen Freihandel ausbauen (Vereinfachung von Freihandelsabkommen; Abschluss neuer Freihandelsabkommen; Anpassung von Freihandelsabkommen an veränderte Güter)



Quelle: BCG & IW & BDI (2024): Transformationspfade für das Industrieland Deutschland.

Die Publikation **Transformationspfade für das Industrieland Deutschland** gibt weitere gezielte Einblicke.

Wir laden Sie ein, tiefer einzutauchen:



Anhang

Definition zentraler Stoffströme

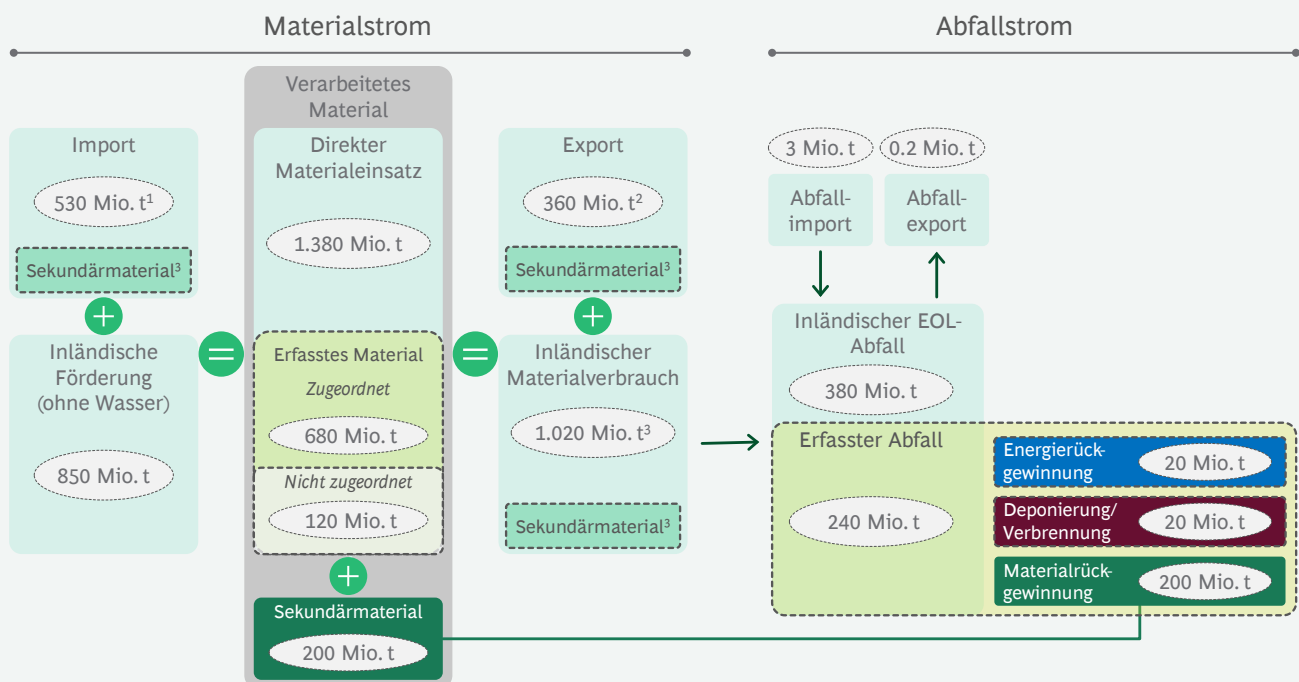
In dieser Analyse werden ausschließlich wertstoffbasierte Ströme betrachtet – Metalle, Minerale und industrielle Materialien, die in Produkten und Anlagen gebunden sind. Biomasse und fossile Energieträger bleiben weitgehend unberücksichtigt, ausgenommen sind beispielsweise Holz für Möbel sowie Öl für die Produktion von Kunststoffen.

Die Datengrundlage umfasst ca. 800 Mio. Tonnen Material, wovon etwa 680 Mio. Tonnen in die Analyse einfließen. Das Stoffstromdiagramm der deutschen Wirtschaft bildet dabei die Basis für die Berechnung material- und abfallspezifischer Intensitäten der Industrie.

Der ausgewiesene Abfallimport und -export liegt unter den registrierten Handelsvolumina, da hier nur das Material ausgewiesen wird, das nicht weiterverwertet oder recycelt, sondern endgültig deponiert, verbrannt oder anderweitig entsorgt wird.

Das Stoffdiagramm der deutschen Wirtschaft dient als Grundlage für die Berechnung der material- und abfallspezifischen Intensitäten der Industrie

ABBILDUNG 79 | Stoff- und Abfallstromdiagramm der deutschen Wirtschaft

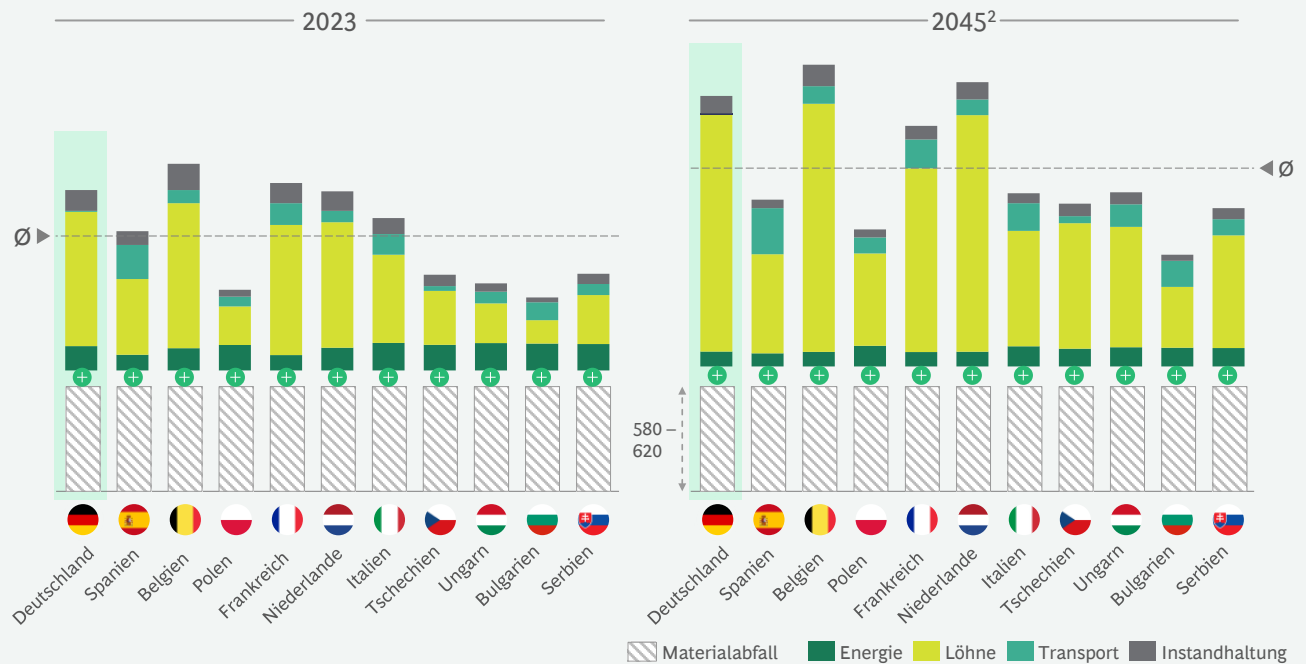


1. Umfasst Abfallimporte (3,2 Mio. t) und unbekannte Menge an Sekundärmaterial 2. Umfasst Abfallexporte (0,2 Mio. t) und unbekannte Menge an Sekundärmaterial 3. Umfasst unbekannte Menge an Sekundärmaterial Anmerkung: Der Materialfluss folgt dem Ansatz des Umweltbundesamtes und Eurostat
Quelle: Eurostat, Materialflussrechnungen (env_ac_mfa); Destatis, Statistischer Bericht – Abfallbilanz 2023; BCG-Analyse

Recycling-Kosten: Europäischer Vergleich

Deutschland bei relativen Prozesskosten im Mittelfeld Westeuropas, dabei weit über Süd- und Osteuropa

ABBILDUNG 80 | Mechanisches Kunststoff-Recycling¹, relative Prozesskosten



1. Mechanisches Recycling PET 2. Energiepreise ab 2031 werden aufgrund von Volatilität und Prognoseunsicherheit auf dem Niveau von 2031 fortgeschrieben
Anmerkung: Ziel ist die Bewertung der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands bei der Verarbeitung von in Deutschland anfallenden Abfällen. Es wird angenommen, dass die Kosten für die Abfallakquisition in allen Ländern identisch sind; "Materialabfall" spiegelt den Preis wider, den Recycling-Betreiber an Sortierunternehmen zahlen. Die Transportkosten umfassen den Versand der Abfälle von Deutschland in das jeweilige Zielland
Quelle: Oxford Economics; BCG-Analyse

Zentrale Annahmen

TABELLE 1 | Materialpreisentwicklung (nominal)

Material	Einheit	2023	2035	2045
Aluminium	Euro/t	1.939	2.548	3.110
Flachglas	Euro/t	497	644	786
Graphit	Euro/t	977	476	582
Gusseisen	Euro/t	377	452	552
Holz	Euro/t	811	1.090	1.330
Kobalt	Euro/t	25.939	39.371	48.054
Kunststoff (PP)	Euro/t	2.416	3.246	3.962
Kupfer	Euro/t	7.295	9.304	11.355
Lithium	Euro/t	34.697	22.575	19.350
Mangan	Euro/t	189	254	310
Nickel	Euro/t	18.508	19.681	24.022
Seltene Erden	Euro/t	82.522	75.045	91.596
Silber	Euro/t	656.219	1.295.715	1.581.484
Stahl (<i>Hot Rolled Coil</i>)	Euro/t	606	643	1.205
Textil – Polyester	Euro/t	1.957	2.236	2.729
Textil – Baumwolle	Euro/t	2.016	2.143	2.615
Zement	Euro/t	131	143	174
Zink	Euro/t	2.488	3.602	4.396
Zinn	Euro/t	21.148	36.102	44.065

TABELLE 2 | Deutsche Wertschöpfungsanteile von Primärmaterialien
 Basierend auf Förderung vorgelagerter Rohstoffen und Verarbeitungsschritten

Material	Einheit	
Aluminium	%	25
Flachglas	%	60
Graphit	%	2
Gusseisen	%	40
Holz	%	70
Kobalt	%	0
Kunststoff (PP)	%	70
Kupfer	%	4
Lithium	%	0
Mangan	%	0
Nickel	%	0
Seltene Erden	%	0
Silber	%	0
Stahl (<i>Hot Rolled Coil</i>)	%	45
Textil – Polyester	%	0
Textil – Baumwolle	%	0
Zement	%	90
Zink	%	5
Zinn	%	0

TABELLE 3 | Recycling-Quoten

Die Bandbreiten beruhen auf segmentspezifischen Annahmen und berücksichtigen nur Materialien, deren Recycling-Quoten durch Kreislaufhebel verändert werden. Angegeben ist jeweils der Anteil der im Inland getrennt gesammelten Mengen.

Material	Einheit	2023	Basispfad 2045	Int.-Pfad 2045	Max.-Pfad 2045
Aluminium	%	94 – 95	94 – 95	94 – 95	95 – 98
Flachglas zur Flachglasherstellung	%	< 12	< 12	< 12	20 ¹
Flachglas für andere Anwendungen	%	83 ¹	83 ¹	83 ¹	< 78
Graphit	%	0	0	60	60
Holz	%	30	30	30	65
Kobalt ²	%	0	0	95	95
Kunststoff (PP)	%	19 – 25	25 – 30	25 – 30	30 – 60
Kupfer	%	45	45	60	80
Lithium ²	%	0	0	80	80
Mangan ²	%	0	0	30	30
Nickel ²	%	0	0	95	95
Seltene Erden	%	0	0	25	60
Silber (in PV)	%	5	5	90	90
Stahl	%	90 – 95	90 – 95	90 – 98	95 – 98
Textil – Faser zu Faser	%	0	0	5	22
Textil – <i>Open Loop</i>	%	8	11	13	7
Bauabbruch zur Zementherstellung	%	< 1	< 1	6	6
Bauabbruch zur Betonherstellung	%	< 1	< 1	40	40
Recycling-Baustoffe für andere Anwendungen	%	94	94	91	50
Zink	%	32	32	50	60

¹ In vereinzeltten Anwendungen (z. B. PV-Anlagen) höher.

² Aufgeführt ist der Anteil, der in europäischen Kreisläufen wiedergewonnen wird (durch Hydro-/Pyrometallurgie).

TABELLE 4 | CO₂ Emissionen

Material	Einheit	Primärmaterial	Rezyklat
Aluminium	t CO ₂ e/t	9,9	0,3
Flachglas	t CO ₂ e/t	1,0	0,6
Holz	t CO ₂ e/t	0,1	0,03
Kobalt	t CO ₂ e/t	45,3	1,7
Kunststoff (PP)	t CO ₂ e/t	1,9	0,6 (mechanisch)
Kupfer	t CO ₂ e/t	6,9	1,7
Lithium	t CO ₂ e/t	20,4	2,3
Nickel	t CO ₂ e/t	17,5	1,1
Seltene Erden (Neodym)	t CO ₂ e/t	23,5	31,8
Silber	t CO ₂ e/t	458	11
Stahl (<i>Hot Rolled Coil</i>)	t CO ₂ e/t	2,08 (BOF)	0,55 (EAF)
Textil – Baumwolle	t CO ₂ e/t	11,6	0,4 (mechanisch) 2,2 (chemisch)
Textil – Polyester	t CO ₂ e/t	2,8	1,0 (mechanisch) 3,1 (chemisch)
Zement	t CO ₂ e/t	0,8	0,6
Zink	t CO ₂ e/t	2,7	N. a.
Zinn	t CO ₂ e/t	10,4	3

TABELLE 5 | Investitionen in Recycling-Kapazität

Material	Einheit	Sammlung	Sortierung	Verarbeitung/ Recycling
Metalle	Euro/t	20	85	350
Batterien	Euro/t	135	460	10.0000 (inkl. Hydro- metallurgie)
Holz	Euro/t	35	35	36 (mechanisch), 190 (chemisch)
PV-Anlagen	Euro/t	135	-	2.000
Kunststoff	Euro/t	100	160	420 710
Seltenerdminerale	Euro/t	Anwendungs-/ segmentabhängig	-	ca. 100.000 (langfristig abflachend)
Beton zur Zement-/ Betonherstellung	Euro/t	-	1	200
Beton zur Zement-/ Betonherstellung	Euro/t	-	1	10
Textil	Euro/t	35	165	380 (mechanisch), 840 (chemisch)

TABELLE 6 | Annahmen zu Remanufacturing und Refurbishment

Einheit		
Preis gegenüber Neuprodukt	%	60 – 70
Verlängerung der Nutzungsdauer	%	30 – 40
Kosten gegenüber Neuprodukt	%	30 – 40
Anteil dt. Bruttowertschöpfung	%	80 – 100

Relevant für Hebel in den Segmenten Maschinenbau, Mobilität, Energie

Abbildungen

- Abbildung 1 | Importierte Waren und Dienstleistungen 2023 im europäischen und weltweiten Vergleich
- Abbildung 2 | Einstufung und Quantifizierung der kritischen Rohstoffe gemäß Critical Raw Materials Act der EU
- Abbildung 3 | Indikative Schäden der deutschen Industrie bei Disruptionen
- Abbildung 4 | Die Circular Economy entlang des Wertschöpfungszyklus
- Abbildung 5 | Die 10 R-Strategien der *Circular Economy*
- Abbildung 6 | *Global Circularity Protocol User Journey*
- Abbildung 7 | Direkte CO₂e-Emissionen der deutschen Sektoren zwischen 1990 und 2023
- Abbildung 8 | Direkter Materialeinsatz der deutschen Industrie nach Materialgruppe
- Abbildung 9 | Deutscher Primärmaterialeinsatz nach Materialwert
- Abbildung 10 | Direkter Materialeinsatz der vier meistgenutzten Materialien pro Industrie
- Abbildung 11 | Bilanz Abfälle am Ende des Lebenszyklus, Deutschland
- Abbildung 12 | Rückgewonnene Materialien aus stofflicher Verwertung
- Abbildung 13 | Zentrale Bewertungsmetriken der Studie
- Abbildung 14 | Ambitionsniveaus der möglichen Entwicklungspfade
- Abbildung 15 | Bruttowertschöpfung pro Industrie
- Abbildung 16 | Bruttowertschöpfung Deutschland nach Industrien und Aktivitäten
- Abbildung 17 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Segment bis 2045
- Abbildung 18 | Materialbedarfsveränderung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2045
- Abbildung 19 | Materialeinsatz in der Pkw-Produktion
- Abbildung 20 | Basisannahmen für Automobilbestand
- Abbildung 21 | Seltene Erden in (B)EVs
- Abbildung 22 | Materialaufkommen aus verwerteten Pkw in Deutschland
- Abbildung 23 | Stoffströme von Gebrauchtfahrzeugen in Deutschland
- Abbildung 24 | Ansatzpunkte der *Circularity Solution Suite*
- Abbildung 25 | Metalle aus Rückläufen von Zugwagen
- Abbildung 26 | Recycling-Prozess von Stahl über TSR40
- Abbildung 27 | Wertschöpfungskette im Mobilitätssegment über TSR40
- Abbildung 28 | Prozessschritte des EV-Batteriekreislaufs
- Abbildung 29 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Kreislaufhebel bis 2045
- Abbildung 30 | Materialbedarfsveränderung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2045
- Abbildung 31 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Mobilitätssegment
- Abbildung 32 | Umfrageergebnisse: Anteil am Gesamtumsatz durch *Remanufacturing/Refurbishment*
- Abbildung 33 | Umfrageergebnisse: Anteil etablierter Maßnahmen zur Rückgewinnung kritischer Rohstoffe
- Abbildung 34 | Umfrageergebnisse: Relevanz von Software im Kontext zirkulärer Geschäftsmodelle
- Abbildung 35 | Globaler Softwaremarkt für zirkuläre Geschäftsmodelle
- Abbildung 36 | Marktgröße für Sortierungs- und Recycling-Technologie in Europa
- Abbildung 37 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Kreislaufhebel bis 2045
- Abbildung 38 | Materialbedarfsveränderung in den Pfaden nach Segment bis 2045
- Abbildung 39 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Maschinenbausegment
- Abbildung 40 | Materialbedarf im Bausegment

Abbildung 41 | Verwertung Recycling-Baustoffe

Abbildung 42 | Recycling-Prozess von Abbruchbeton vor und nach Projektimplementierung

Abbildung 43 | Anteile an produzierten Gesteinskörnungen nach Herkunft

Abbildung 44 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Kreislaufhebel bis 2045

Abbildung 45 | Materialbedarfsveränderung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2045

Abbildung 46 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Bausegment

Abbildung 47 | Treiber des Nettostrombedarfs in Deutschland gemäß aktueller politischer Ambition

Abbildung 48 | Ausbaugeschwindigkeit von Schlüsselinfrastrukturen der Energiewende

Abbildung 49 | Materialbedarf und *EOL*-Aufkommen von Schlüsselinfrastrukturen der Energiewende

Abbildung 50 | Annahmen zu Netzerweiterung und -erneuerung

Abbildung 51 | Lebenszyklus von Betriebsmitteln mit und ohne *Circular Place*

Abbildung 52 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Kreislaufhebel bis 2045

Abbildung 53 | Materialbedarfsveränderung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2045

Abbildung 54 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Energiesegment

Abbildung 55 | Fünf wesentliche Schritte der Wertschöpfungskette von FUREC

Abbildung 56 | Quantifizierung des Mengengerüsts textiler Abfallströme

Abbildung 57 | Materialströme von Textilabfällen in Deutschland

Abbildung 58 | Sammelquoten textiler Abfälle in ausgewählten Ländern

Abbildung 59 | Faserzusammensetzungen je Textilkategorie

Abbildung 60 | Resultierende Massenverteilungen entlang der Pfade

Abbildung 61 | Bruttowertschöpfungswachstum in den Entwicklungspfaden nach Kreislaufhebel bis 2045

Abbildung 62 | Materialbedarfsveränderung und Rezyklatverfügbarkeit in den Pfaden nach Segment bis 2045

Abbildung 63 | Zentrale Herausforderungen der Hebel im Textilsegment

Abbildung 64 | Vergleich der Opex-Kosten für mechanisches Recycling in europäischen Ländern

Abbildung 65 | Stoffstrombeziehungen in Kalundborg

Abbildung 66 | Investitionsbedarfe zur Umsetzung der Kreislaufhebel

Abbildung 67 | Investitionsbedarfe von 2026 bis 2045 in Recycling-Infrastruktur

Abbildung 68 | Barrieren der fünf betrachteten Segmente

Abbildung 69 | Sieben Handlungsfelder für deutsche Unternehmen und Politik

Abbildung 70 | A. Verlust verwertbarer Abfallströme minimieren

Abbildung 71 | B. Kreislaufverwertbarkeit sicherstellen

Abbildung 72 | C. Technologiereife und Verarbeitungskapazitäten erreichen

Abbildung 73 | D. Strukturelle Kostennachteile adressieren und überwinden

Abbildung 74 | E. Nachfrage und Absatzmärkte stärken

Abbildung 75 | F. Anwendbarkeit sicherstellen und Rahmenbedingungen schaffen

Abbildung 76 | G. Digitale Lösungen entwickeln und ausrollen

Abbildung 77 | Anstoßpunkte für regulatorische Rahmenbedingungen in den Segmenten

Abbildung 78 | Handlungsfelder der Transformationspfade

Abbildung 79 | Stoff- und Abfallstromdiagramm der deutschen Wirtschaft

Abbildung 80 | Mechanisches Kunststoff-Recycling, relative Prozesskosten

Exkurse und Case-Studies

Exkurs 1: Kritische Rohstoffe als geopolitischer Hebel

Exkurs 2: Von der linearen zur zirkulären Wertschöpfung – das Prinzip der R-Strategien

Exkurs 3: *Global Circularity Protocol (GCP)*

Exkurs 4: Definition zentraler Stoffströme

Exkurs 5: Zirkuläre Materialnutzungsrate und andere Zirkularitätsindikatoren

Exkurs 6: Internationale Rahmenannahmen 2045 – *Belief Parameters der Studie*

Exkurs 7: Recycling- und Sortiertechnologien – heute und in Zukunft

Exkurs 8: Bau kleinerer Wohnungen – ein Gedankenexperiment

Exkurs 9: Industrielle Nebenprodukte als verfügbarer Baustoff für Klimaschutz und Circular Economy

Exkurs 10: *Waste to Energy*

Case-Study 1: Die *Circularity Solution Suite* für Recycling und Reuse in der Bahnbranche

Case-Study 2: TSR – Post-Konsumenten-Materialien als Meilenstein für eine nachhaltige Stahlproduktion

Case-Study 3: PreZero – Batterie-Recycling als strategische Investition zur Rohstoffsicherung in Deutschland

Case-Study 4: Wilo – Zirkularität als Schlüsselstrategie für seltene Erden

Case-Study 5: ANDRITZ Kaiser – *Remanufacturing* als Wachstums- und Dekarbonisierungshebel im Maschinenbau

Case-Study 6: Heidelberg – von der Deponie zu neuen Kreisläufen durch Brechsand in der Zementproduktion

Case-Study 7: Speira – Wiederverwendung von *Low Grades* im Aluminiumkreislauf durch Innovation

Case-Study 8: E.ON – der *Circular Place* von E.ON für einen resilienteren Netzausbau

Case-Study 9: REMONDIS – mit eigenen Kapazitäten für die erste Rückbauwelle bei Photovoltaikmodulen

Case-Study 10: Covestro – chemisches Recycling für die Circular Economy im Matratzenmarkt

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Abkürzung	Definition
Abfall		Alle Stoffe oder Gegenstände, deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss (siehe KrWG)
Abfallende-Kriterien		Regulatorische Kriterien zur Abgrenzung von Gebrauchsgüterprodukten und Abfall, u. a. relevant für Exportregelungen und Genehmigungsprozesse
Abfallhierarchie		Fünfstufige Hierarchie bei der Behandlung von Abfällen, denen beispielsweise die zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017) zugeordnet werden können
Altfahrzeug		Fahrzeug am Ende seines Lebenszyklus; unterliegt der EU-Altfahrzeugverordnung (ELV-Verordnung)
Basispfad		Szenario mit Fortschreibung bestehender regulatorischer und marktlicher Rahmenbedingungen bis 2045; einer von drei modellierten Entwicklungspfaden der Studie
Batterieelektrisches Fahrzeug	BEV	Fahrzeug mit elektrischem Antrieb und Traktionsbatterie
Bauwesen (Bausegment)		Industriesegment; umfasst im Umfang dieser Studie die Bauwirtschaft (Hoch- und Tiefbau einschließlich Baustellenarbeit und Bauinstallation) sowie die zugehörige Baustoffindustrie
Beseitigung		Teil der Abfallhierarchie; jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden (siehe KrWG)
Bruttowertschöpfung	BWS	Volkswirtschaftliche Kennzahl zur Messung des ökonomischen Mehrwerts auf branchen- oder volkswirtschaftlicher Ebene
<i>Carbon Capture and Storage</i>	CCS	Abscheidung und Speicherung von CO ₂
<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i>	CCUS	Abscheidung und Nutzung bzw. Speicherung von CO ₂
<i>Carbon Leakage</i>		Verlagerung von Produktion in Länder mit geringeren Klimaschutzanforderungen etwa zur Vermeidung höherer CO ₂ -Kosten
Circular Economy		Kreislaufwirtschaft; Wirtschaftsmodell zur Schließung von Stoff-, Energie- und Produktkreisläufen mit dem Ziel der Reduktion von Primärrohstoffverbrauch und Abfall
<i>Circular Economy Action Plan</i>	CEAP 2.0	EU-Aktionsplan zur Förderung einer zirkulären Wirtschaft (2020)

Begriff	Abkürzung	Definition
<i>Circular Economy Act</i>	<i>CEA</i>	Geplanter EU-Rechtsakt zur Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft
<i>Circular Material Use Rate</i>	<i>CMUR</i>	Zirkuläre Materialnutzungsrate; Anteil rückgewonnener Materialien am inländischen Materialverbrauch (Eurostat-Indikator)
<i>Circular Transition Indicators</i>	<i>CTI</i>	Indikatorensystem des WBCSD zur Messung zirkulärer Zu- und Abflüsse
<i>Clean Industrial Deal</i>	<i>CID</i>	EU-Rahmen zur Verknüpfung von Dekarbonisierung und Wettbewerbsfähigkeit
Co-Processing		Mitverwertung von Abfällen (hier: Rotorblätter von Windkraftanlagen) im Zementklinkerofen
CO ₂ -Äquivalente	CO ₂ e	Einheit zur Vergleichbarkeit verschiedener Treibhausgase
<i>Critical Raw Materials Act</i>	<i>CRMA</i>	EU-Gesetz zu kritischen Rohstoffen
<i>Design for Circularity</i>	<i>DfC</i>	Produktgestaltung zur Ermöglichung von Reparatur, Wiederverwendung und Recycling
<i>Design for Disassembly</i>	<i>DfD</i>	Produktgestaltung zur erleichterten Demontage
<i>Digital Product Passport</i>	<i>DPP</i>	Digitaler Produktpass zur Dokumentation von Materialzusammensetzung und Lebenszyklusdaten
Direkter Materialeinsatz	DMI	Direct Material Input: Summe aus inländischer Förderung und Importen bzw. inländischem Materialverbrauch (DMC) und Exporten laut Eurostat-Materialflussrechnungen
<i>Distribution System Operator</i>	<i>DSO</i>	Verteilnetzbetreiber; verantwortlich für die regionale und lokale Verteilung durch Mittel- und Niederspannung
Elektrolichtbogenofen	EAF	Electric Arc Furnace: Stahlerzeugungsverfahren auf Basis von Schrott
Endgültig abgemeldetes Fahrzeug		Endgültig stillgelegtes Fahrzeug
<i>End of Life</i>	<i>EOL</i>	Lebensende eines Produkts oder Materials
Energetische Verwertung		Thermische Nutzung (Verbrennung) von Abfällen zur Energiegewinnung

Begriff	Abkürzung	Definition
Energiesegment		Industriesegment; umfasst im Umfang dieser Studie Komponenten und Anlagen der Energieversorgung
<i>European Union Emissions Trading System</i>	<i>EU-ETS</i>	EU-System zur CO ₂ -Bepreisung
Extrahiertes CO ₂		CO ₂ , das aus Prozessen industrieller oder energiebezogener Art aus der Luft extrahiert, komprimiert, transportiert und direkt oder nach Umwandlung zur Herstellung eines neuen Produkts genutzt sowie in Kohlenstoffkreisläufen geführt wird (siehe Carbon Capture and Utilization); Teil der Rohstoffe der Circular Economy
Faser-zu-Faser-Recycling	F2F	Verfahren des Recyclings von Textilien zu spinnbaren Fasern
Hydrometallurgie		Chemisches Verfahren zur Metallrückgewinnung aus stofflicher Verwertung
Industrielle Symbiose		Institutionalisierte Nutzung von Stoff- und Energieströmen über Unternehmensgrenzen hinweg
Intensivierungspfad		Szenario mit beschleunigter Transformation durch gezielte Schaffung von Rahmenbedingungen; einer von drei modellierten Entwicklungspfadern der Studie
Inländischer Materialverbrauch	DMC	Domestic Material Consumption: direkter Materialeinsatz abzüglich Exporte laut Eurostat-Materialflussrechnungen
Inländische Förderung	DE	Domestic Extraction: direkter Materialeinsatz abzüglich Importe laut Eurostat-Materialflussrechnungen
Kritische Rohstoffe		Im Kontext des CRMA: Rohstoffe mit hoher ökonomischer Bedeutung für Europa und gleichzeitig hohem Risiko von Lieferengpässen
Kreislaufwirtschaftsgesetz	KrWG	Deutsches Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft
Limitationspfad		Nicht modelliertes Szenario mit Einhaltung planetarer Grenzen
LFP-Batterie	LFP	Lithium-Eisenphosphat-Batterie ohne Nickel und Kobalt
<i>Material Circularity Indicator</i>	<i>MCI</i>	Produktbezogener Zirkularitätsindikator (gemäß Ellen MacArthur Foundation)
Maximierungspfad		Szenario mit maximaler Kreislaufschießung und struktureller Transformation; einer von drei modellierten Entwicklungspfadern der Studie
Maschinenbausegment		Industriesegment; umfasst im Umfang dieser Studie die Produktion von Anlagen sowie verbundene Services (inklusive Reparatur, Installation, Handel und Vermietung)

Begriff	Abkürzung	Definition
Mobilitätssegment		Industriesegment; umfasst im Umfang dieser Studie die Herstellung und den Handel von Kraftwagen und Kraftwagenteilen sowie deren Instandhaltung, Reparatur und Vermietung. Umfasst zusätzlich die Herstellung von Schienenfahrzeugen und die Beförderung durch Zug und Nahverkehr
Nebenprodukte		Stoffe oder Gegenstände bei einem Herstellungsverfahren, dessen hauptsächlicher Zweck nicht auf die Herstellung dieser Stoffe oder Gegenstände gerichtet ist. Einstufung als Nebenprodukt ist an die Erfüllung weiterer Kriterien geknüpft
NMC-Batterie	NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Batterie
Nachwachsende Rohstoffe		Umfassen die gesamte organische Substanz, die durch Pflanzen und Tiere terrestrisch oder aquatisch anfällt oder erzeugt wird, inkl. biogenen Abfalls. Einsatz erfolgt ausschließlich außerhalb des Lebensmittel- und Futterbereichs
Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie	NKWS	Deutsche Strategie zur Verzahnung von Industrie-, Klima- und Rohstoffpolitik
<i>Open-Loop-Recycling</i>		Recycling in Anwendungen, die nicht ihren ursprünglichen Anwendungen entsprechen (zum Beispiel Textil-Recycling für nicht spinnbare Fasern)
Planetare Grenzen		Wissenschaftliches Konzept zu ökologischen Belastungsgrenzen der Erde
Post-Konsumenten-Materialien		Stoffströme nach Nutzung durch Endverbraucher
Primärmaterial		Material aus Primärgewinnung (Rohstoffabbau)
Primärrohstoffeinsatz	RMI	Raw Material Input: Rohstoffäquivalent-basierter Materialeinsatz (nach Eurostat)
Primärrohstoffverbrauch	RMC	Raw Material Consumption: Exportbereinigter Rohstoffbedarf; Material Footprint
<i>Production as a Service</i>	<i>PaaS</i>	Nutzungsbasiertes Geschäftsmodell im Maschinenbau
ProgRess		Deutsche Ressourceneffizienzprogramm
Recycle	R8	Materialen zur Verwendung in anderen Produkten verarbeiten. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)
Recycling-Quote		Sinngemäß: bezogen auf die Menge an (getrennt) gesammelten Materialien
<i>Recover</i>	R9	„Rückgewinnen“: verbrennen zur Rückgewinnung von Energie sowie Materialkleinstmengen und aus Abfall. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)

Begriff	Abkürzung	Definition
<i>Reduce</i>	R2	„Reduzieren“: Effizienz in der Produktion oder Nutzung steigern, um Rohmaterial/Input zu reduzieren. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)
<i>Refurbish</i>	R5	„Aufbereiten“: gebrauchte Produkte für weitere Nutzung aufwerten. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)
<i>Refuse</i>	R0	„Nicht nutzen“: Funktion anders bereitstellen und Produkt überflüssig machen. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)
<i>Remanufacture</i>	R6	„Wiederaufbereiten“: ein neues Produkt bereitstellen auf Basis von Komponenten alter Produkte mit derselben Funktion. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)
<i>Repair</i>	R4	„Reparieren“: zur weiteren Nutzung auf den ursprünglichen Stand bringen. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)
<i>Repurpose</i>	R7	„Umnutzen“: Komponenten eines alten Produkts in einem neuen Produkt mit anderer Funktion nutzen. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)
<i>Rethink</i>	R1	„Überdenken“: zur Verstärkung der Produktnutzung umgestalten. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)
<i>Reuse</i>	R3	„Wiederverwenden“: Anzahl der Nutzungszyklen eines Produkts erhöhen, zum Beispiel durch Zweitnutzermärkte. Eine der zehn R-Strategien nach Kirchherr et al. (2017)
Rezyklate		Sekundäre Rohstoffe, die durch die Verwertung von Abfällen gewonnen werden oder bei der Beseitigung von Abfällen anfallen und für die Herstellung von Erzeugnissen geeignet sind (vgl. KrWG)
Rezyklateinsatzquote		Quote für den Einsatz von Rezyklaten in der Neuproduktion von Produkten
Rohstoffe der Circular Economy		Rezyklate und Abfall zur stofflichen Verwertung, die in den Kreislauf zurückgeführt werden, sowie Nebenprodukte, nachwachsende Rohstoffe und aus Prozessen sowie aus der Luft extrahiertes CO ₂
Rückgewonnene Stoffe		Recovery; Stoffe, die durch Verwertung von Abfällen zu Produkten, Materialien oder Substanzen aufbereitet werden, um wiederverwendet zu werden. Umfasst Recycling sowie Verfüllungsmaßnahmen
R-Strategien	R0 – R9	Strategien zur Umsetzung der Circular Economy nach Kirchherr et al. (2017), hierarchisch organisiert nach Grad der Zirkularität
Sammelquote		Bezogen auf den Teil der Gesamtmenge, der gesammelt und nicht exportiert wird
Schwarzmasse		Produkt des Recycling-Prozesses von EV-Altbauteilen, das aus metallhaltigen Pulvern, Kupfer, Aluminium, Kunststoffen und dem Elektrolyt besteht. Erlaubt die Rückgewinnung von Materialien durch hydrometallurgische Verfahren
Sekundärrohstoffe		Umfasst Rezyklate, Abfälle zur stofflichen Verwertung, Nebenprodukte und extrahiertes CO ₂

Begriff	Abkürzung	Definition
Seltene Erden		Gruppe strategisch relevanter Metalle für Hochtechnologien
Siedlungsabfälle		Abfälle, die aus Privathaushalten sowie gewerblichen, industriellen oder institutionellen Einrichtungen als den Endverbrauchern eines Endprodukts stammen (siehe KrWG)
Stoffliche Verwertung		(Nichtthermische) Aufbereitung von Abfällen zu neuen Erzeugnissen. Umfasst auch Recycling
Substitutionsquote		Anteil ersetzter Primärrohstoffe durch Sekundärmaterial
Textilsegment		Industriesegment; umfasst im Umfang dieser Studie die Produktion sowie den Handel von Textilien
<i>Transmission System Operator</i>	<i>TSO</i>	Übertragungsnetzbetreiber; verantwortlich für den Ferntransport über große Entfernungen auf der Höchstspannungsebene
<i>Vehicle to Grid</i>	<i>V2G</i>	Nutzung von Fahrzeugbatterien als Netzspeicher
Vermeidung		Teil der Abfallhierarchie; umfasst jede Maßnahme, die ergriffen wird, bevor ein Stoff, Material oder Erzeugnis zu Abfall geworden ist, um die Abfallmenge zu verringern
<i>Waste to Energy</i>	<i>WtE</i>	Thermische Verwertung von Abfällen zur Energieerzeugung
<i>Waste to Molecules</i>		Umwandlung von Abfällen in chemische Rohstoffe
Zirkularität		Grad der Kreislaufführung in einem Wirtschafts- oder Industriesystem

Quellen

ACEA (2024). EU-China Vehicle Trade. Erreichbar unter: https://www.acea.auto/files/ACEA_fact_sheet_EU_China_vehicle_trade_June_2024.pdf. [26.02.2026]

[Amt für Veröffentlichungen der EU] Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union (2017). Methodology for establishing the EU list of critical raw materials. Erreichbar unter: <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1>. [26.02.2026]

ASA et al. (2024). Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2024. Erreichbar unter: https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/wp-content/uploads/2024/01/Statusbericht_2024_25012024_opt.pdf. [26.02.2026]

Bardt und Neligan (2019). IW-Kurzbericht 25/2019: Der Rohstoffverbrauch in Europa nimmt ab. Erreichbar unter: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2019/IW-Kurzbericht_2019_Entkopplungsdebatte.pdf. [26.02.2026]

[BBSR] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2020). Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Erreichbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3. [27.02.2026]

[BBSR] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2024). Ergebnisse für Deutschland zum Wohnungsleerstand aus den Zensusdaten 2022. Erreichbar unter: https://www.wohnungsmarktbeobachtung.de/bund-und-laender/bak/ht-2024/copy_of_herbsttermin-2024-in-hamburg/bak_2024-2_bbsr-wohnungsleerstand-aus-den-zensusdaten.pdf. [26.02.2026]

BCG und BDI (2021). Klimapfade 2.0: Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Erreichbar unter: <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf>. [26.02.2026]

BCG, IW und BDI (2024). Transformationspfade für das Industrieland Deutschland. Erreichbar unter: <https://www.bcg.com/publications/2024/germany-transformationspfade-industrie-deutschland-agenda>. [26.02.2026]

BDI (2023). Circular Economy als wichtige Säule der Rohstoffversorgung. Erreichbar unter: <https://bdi.eu/en/publications/die-circular-economy-als-wichtige-saeule-der-rohstoffversorgung>. [26.02.2026]

BDI und BCG (2025). Energiewende auf Kurs bringen – Impulse für eine wettbewerbsfähigere Energiepolitik. Erreichbar unter: https://energiewende.bcg.com/home/?utm_medium=email&utm_source=email&utm_campaign=energiewende&utm_description=organic&utm_topic=sustainability&utm_geo=de&utm_content=press. [26.02.2026]

[BEPA und BATT4EU] Batteries European Partnership Association und Batteries European Partnership (2023). Batteries Regulation Brief Overview. Erreichbar unter: <https://bepassociation.eu/batteries-regulation-brief-overview/#:~:text=By%202031:%2016%25%20cobalt%2C,%2C%20and%2061%25%20by%202031>. [26.02.2026]

Bergische Universität Wuppertal (2023). Entwicklung und Validierung einer Methode zur Erfassung der Sammelraten von Bauprodukten aus Metall. Erreichbar unter: https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32396_01-Hauptbericht.pdf. [26.02.2026]

Bergische Universität Wuppertal (2024). Quantifizierung der Technologiebedarfe in deutschen Verteilnetzen. Erreichbar unter: <https://www.zvei.org/themen/quantifizierung-der-technologiebedarfe-in-deutschen-verteilnetzen>. [26.02.2026]

[BGR und DERA] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Deutsche Rohstoffagentur (2020). Kies – der wichtigste heimische Baurohstoff! Erreichbar unter: https://www.bgr.bund.de/SharedDocs/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/62_kies.pdf?__blob=publicationFile&v=1. [26.02.2026]

[Blanco Perez et al.] Joint Research Centre, Blanco Perez et al. (2025). Defining low-carbon emissions steel: A comparative analysis of international initiatives and standards. Erreichbar unter: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC141817>. [26.02.2026]

[BMJV] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2016). Verordnung zur Bestimmung kritischer Anlagen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung - BSI-KritisV), § 10 Sektor Siedlungsabfallentsorgung. Erreichbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bsi-kritisv/_10.html. [26.02.2026]

[BMJV] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017). Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen 1. Erreichbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/index.html. [26.02.2026]

[BMUKN] Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020). Überblick zum Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Erreichbar unter: [https://www.bundesumweltministerium.de/themen/ressourcen/deutsches-ressourceneffizienzprogramm#:~:text=ProgRess%20beschreibt%20Ma%C3%9Fnahmen%20zur%20Steigerung%20der%20Ressourceneffizienz%20entlang,Produktgestaltung%2C%20Produktion%20und%20Konsum%20bis%20hin%20zur%20Kreislaufwirtschaft](https://www.bundesumweltministerium.de/themen/ressourcen/deutsches-ressourceneffizienzprogramm#:~:text=ProgRess%20beschreibt%20Ma%C3%9Fnahmen%20zur%20Steigerung%20der%20Ressourceneffizienz%20entlang,Produktgestaltung%2C%20Produktion%20und%20Konsum%20bis%20hin%20zur%20Kreislaufwirtschaft.). [26.02.2026]

[BMUKN] Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2024a). Kreislaufwirtschaftsgesetz. Erreichbar unter: <https://www.bundesumweltministerium.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz>. [26.02.2026]

[BMUKN] Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2024b). Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). Erreichbar unter: <https://www.bundesumweltministerium.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaftsstrategie>. [26.02.2026]

[BMUKN] Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2025). Getrennte Sammlung von Textilabfällen. Erreichbar unter: <https://www.bundesumweltministerium.de/faqs/getrennte-sammlung-von-textilabfaellen>. [26.02.2026]

[BMUKN und UBA] Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Umweltbundesamt (2023). Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2023. Erreichbar unter: https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/jahresbericht_alfahrzeug_verwertungsquoten_2023_bf.pdf. [26.02.2026]

[BMWE] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020). Rohstoffstrategie der Bundesregierung. <https://www.publikationen-bundesregierung.de/pp-de/publikationssuche/rohstoffstrategie-der-bundesregierung-1732238>. [26.02.2026]

[BMWE] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2024). Neue Langfristszenarien für die Energiewende. Erreichbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Infografiken/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2024/04/05-langfristszenarien-energiewende-download.pdf>. [03.03.2026]

[BPB] Bundeszentrale für politische Bildung (2024). Deutschland: Export und Import nach Waren. Erreichbar unter: [https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52848/deutschland-export-und-import-nach-waren/#:~:text=Infolge%20des%20russischen%20Angriffskriegs%20auf,16%2C5%20Prozent](https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52848/deutschland-export-und-import-nach-waren/#:~:text=Infolge%20des%20russischen%20Angriffskriegs%20auf,16%2C5%20Prozent.). [26.02.2026]

Büchel und Neligan (2025). Digital Product Passport: Finding the Right Balance Between Transparency for Circularity and Added Red Tape. *Intereconomics*, 60(3). Erreichbar unter: <https://www.intereconomics.eu/pdf-download/year/2025/number/3/article/digital-product-passport-finding-the-right-balance-between-transparency-for-circularity-and-added-red-tape.html>. [26.02.2026]

Bundesagentur für Arbeit (2024). Zum Tag des Handwerks: Weiterhin hohe Fachkräfteengpässe bei den Handwerksberufen. Erreichbar unter: <https://www.arbeitsagentur.de/presse/2024-39-zum-tag-des-handwerks-weiterhin-hohe-fachkraefteengpaesse-bei-den-handwerksberufen>. [26.02.2026]

Bundesministerium der Finanzen (2026). Das Sondervermögen für Infrastruktur und Klimaneutralität. Erreichbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Oeffentliche_Finanzen/SVIK/sondervermoegen-infrastruktur-klimaneutralitaet.html. [26.02.2026]

Bundesregierung (2025). Infrastruktur-Zukunftsgesetz beschleunigt Bau neuer Schienen, Straßen und Brücken. Erreichbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/infrastruktur-zukunftsgesetz-2399998>. [26.02.2026]

[bvse] Fachverband Glasrecycling (2025). Glasrecycling in Deutschland steuert auf eine Krise zu. Erreichbar unter: <https://www.bvse.de/recycling-glas/pressemitteilungen-glas/12418-glasrecycling-in-deutschland-steuert-auf-eine-krise-zu.html>. [26.02.2026]

Chertow (2007). "Uncovering" Industrial Symbiosis. Erreichbar unter: https://cie.research.yale.edu/sites/default/files/uncovering_ie.pdf. [26.02.2026]

Circle Economy und Deloitte (2024). The Circularity Gap Report 2024. Erreichbar unter: <https://www.circularity-gap.world/2024#download>. [26.02.2026]

[CORDIS] Community Research and Development Information Service (2026). Wie die Industriesymbiose funktionieren kann. Erreichbar unter: <https://cordis.europa.eu/article/id/443712-let-me-show-you-how-to-make-industrial-symbiosis-work/de>. [26.02.2026]

Cristobal Garcia et al. (2024). Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management in the European Union. Erreichbar unter: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135470>. [26.02.2026]

Dehio et al. (2025). Rohstoffnachfrage 2045: Ressourcen sichern, Zukunft bauen – Perspektiven für mineralische Primär- und Sekundärrohstoffe. Erreichbar unter: https://www.rwi-essen.de/fileadmin/user_upload/RWI/Publikationen/Projektberichte/RWI_Projektbericht_Rohstoffnachfrage_2025.pdf. [26.02.2026]

[DERA] Deutsche Rohstoffagentur (2026). Preismonitor Januar 2026. Erreichbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Themen/Rohstoffpreise/Preismonitor/preismonitor_node.html#:~:text=Der%20DERA-Preismonitor%20liefert%20monatlich%20eine%20kompakte%20Darstellung%20der,mineralischen%20Rohstoffen%20sowie%20mehr%20als%2015%20Recycling%20Rohstoffen. [26.02.2026]

[Destatis] Statistisches Bundesamt (2023a). Materialflüsse in Millionen Tonnen. Erreichbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Tabellen/material-energiefluesse.html>. [26.02.2026]

[Destatis] Statistisches Bundesamt (2023b). Unternehmen, tätige Personen, Umsatz und weitere Kennzahlen nach Wirtschaftsabschnitten. Erreichbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Unternehmen/Struktur-Taetigkeit/Tabelle/wirtschaftsabschnitte-bj2022-wz2008.html>. [26.02.2026]

[Destatis] Statistisches Bundesamt (2024). 16,3 Millionen Tonnen Abfälle und Schrott im Jahr 2023 aus Deutschland exportiert, 13,4 Millionen importiert. Erreichbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_106_51.html. [26.02.2026]

[Destatis] Statistisches Bundesamt (2025). Ein Großteil der importierten Seltenen Erden kamen 2024 aus China. Erreichbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/04/PD25_N019_51.html. [26.02.2026]

[Destatis] Statistisches Bundesamt (2026a). Baufertigstellungen im Hochbau: Deutschland, Jahre, Bautätigkeiten, Gebäudeart. Erreichbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/31121/table/31121-0001>. [26.02.2026]

[Destatis] Statistisches Bundesamt (2026b). Abfallwirtschaft. Erreichbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html. [26.02.2026]

Deutscher Bundestag (2022). Dokumentation zur benötigten Anlagenzahl für den Ausbau der Windenergie an Land. Erreichbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/920010/1b3b64814f254ca223d8a9eb85b7ea24/WD-8-062-22-WD-5-101-22-pdf-data.pdf>. [26.02.2026]

Deutscher Bundestag (2024). Gesetz zur Anpassung des Batterierechts an die Verordnung (EU) 2023/1542 (Batterierecht-EU-Anpassungsgesetz - Batt-EU-AnpG). Erreichbar unter: <https://dip.bundestag.de/vorgang/gesetz-zur-anpassung-des-batterierechts-an-die-verordnung-eu-2023/317505>. [26.02.2026]

Deutscher Bundestag (2025). Importabhängigkeit für Metallerze liegt bei fast 100 Prozent. Erreichbar unter: <https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-989086>. [26.02.2026]

Deutsche Umwelthilfe (2024). Leitfaden: Integration von Kreislaufwirtschaftskriterien in der öffentlichen Beschaffung von Bauleistungen. Erreichbar unter: https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Baustoffe/241031_Leitfaden_oeffentliche_Beschaffung_Bau.pdf. [26.02.2026]

[DGNB] Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (2025). Klimawirkungen von Sanierungen: Eine lebenszyklusbasierte Analyse. <https://www.dgnb.de/de/dgnb-richtig-nutzen/newsroom/hintergrundinformationen-und-studien>. [26.02.2026]

[DPG] Deutsche Pfandsystem GmbH (2025). Pfandsysteme in Europa – Schlüsselrolle für die Kreislaufwirtschaft. Erreichbar unter: <https://dpg-pfandsystem.de/de/das-einwegpfandsystem/wissenswertes/mitteilungen/pfandsysteme-in-europa-im-vergleich.html>. [26.02.2026]

Draghi (2024). Die Zukunft der europäischen Wettbewerbsfähigkeit. Erreichbar unter: https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961_de?filename=The%20Draghi%20report%20A%20competitiveness%20strategy%20for%20Europe%20%28Part%20A%29-DE.pdf. [26.02.2026]

[EAA und TU Delft] European Aluminium Association und TU Delft (2022). Collection of Aluminium from Buildings in Europe. Erreichbar unter: <https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/10/collection-of-aluminium-from-buildings-in-europe.pdf>. [26.02.2026]

[EEA] European Environment Agency (2021). Emerging waste streams: Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective. Erreichbar unter: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emerging-waste-streams-opportunities-and-challenges-of-the-clean-energy-transition-from-a-circular-economy-perspective>. [26.02.2026]

[EEA] European Environment Agency (2023). How far is Europe from reaching its ambition to double the circular use of materials? Erreichbar unter: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/how-far-is-europe-from>. [27.02.2026]

[EEA] European Environment Agency (2025). Circular material use rate in Europe. Erreichbar unter: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/circular-material-use-rate-in-europe>. [26.02.2026]

Ellen MacArthur Foundation (2021). Circular Business Models: Redefining growth for a thriving fashion industry. Erreichbar unter: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/60926fc64dbab81d/original/Circular-business-models.pdf>. [26.02.2026]

Ellen MacArthur Foundation und ANSYS Granta (2019). Methodology: An approach to measuring circularity. <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/77e62bc9924c20d0/original/Circularity-Indicators-Methodology.pdf>. [26.02.2026]

ENGIE Impact (2021). Kalundborg's Eco-Industrial Park Transformed Waste into Savings. Erreichbar unter: <https://www.engieimpact.com/insights/eco-industrial-park-case-study-kalundborg>. [26.02.2026]

EU4Environment (2022). Industrial Symbiosis is at the core of the EU work with the industrial sector. Erreichbar unter: <https://www.eu4environment.org/news/industrial-symbiosis-is-at-the-core-of-the-eu-work-with-the-industrial-sector/>. [26.02.2026]

EUR-Lex (2023). Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries. Erreichbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>. [26.02.2026]

EUR-Lex (2024). Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products. Erreichbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj>. [26.02.2026]

EUR-Lex (2025). Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on packaging and packaging waste. Erreichbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2025/40/oj>. [26.02.2026]

Europäische Kommission (2024). EU imposes duties on unfairly subsidised electric vehicles from China while discussions on price undertakings continue. Erreichbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/ip_24_5589/IP_24_5589_EN.pdf. [26.02.2026]

Europäische Kommission (2025a). Übergang zu einer stärker kreislaforientierten Automobilindustrie – Einigung zu Altfahrzeugen. Erreichbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_25_3043. [26.02.2026]

Europäische Kommission (2025b). Deal für eine saubere Industrie: Ein Plan für eine wettbewerbsfähige und klimaneutrale EU. Erreichbar unter: https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/clean-industrial-deal_de. [26.02.2026]

Europäische Kommission (2025c). Plan to boost circular and efficient products on the European market. Erreichbar unter: https://green-forum.ec.europa.eu/news/2025-2030-working-plan-2025-07-11_en. [26.02.2026]

Europäische Kommission (2026). Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Erreichbar unter: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en. [26.02.2026]

Europäisches Parlament (2026). Circular economy act. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2026/782628/EPRS_BRI\(2026\)782628_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2026/782628/EPRS_BRI(2026)782628_EN.pdf). [26.02.2026]

European Aluminium (2021). Environmental Profile Report for the Aluminium Refining Industry. Erreichbar unter: https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/08/2021-11-16_european-aluminium_environmental-profile-report-for-the-aluminium-refining-industry-1.pdf. [26.02.2026]

European Circular Economy Stakeholder Platform (2019). Kalundborg Symbiosis: six decades of a circular approach to production. Erreichbar unter: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/good-practices/kalundborg-symbiosis-six-decades-circular-approach-production>. [26.02.2026]

Eurostat (2025a). Material flow accounts. Erreichbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_mfa__custom_18411530/default/table. [26.02.2026]

Eurostat (2025b). Circular material use rate. Erreichbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_cur/default/table. [26.02.2026]

EUWID Recycling und Entsorgung (2024). Abfall- und Recyclingtechnikanbieter erwarten 2024 Umsatzrückgang. <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/abfall-und-recyclingtechnikanbieter-erwarten-2024-umsatz-rueckgang/>. [26.02.2026]

Fashion for Good (2022). Sorting For Circularity Europe. Erreichbar unter: <https://www.fashionforgood.com/case-study/sorting-for-circularity-europe-an-evaluation-and-commercial-assessment-of-textile-waste-across-europe/>. [26.02.2026]

[FMI] Future Market Insights (2025). Digital Product Passport (DPP) Platforms Market Size and Share Forecast Outlook 2025 to 2035. Erreichbar unter: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/digital-product-passport-dpp-platforms-market>. [26.02.2026]

Fraunhofer ISE (2022). Kupfer statt Silber: Neuer Schub für die Solarzellen-Produktion. Erreichbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2022/september-2022/kupfer-statt-silber-neuer-schub-fuer-solarzellen.html>. [26.02.2026]

[Fraunhofer ISI, FU Berlin und Öko-Institut] Fraunhofer ISI, Freie Universität Berlin und Öko-Institut (2023). Modell Deutschland Circular Economy: Modellierung und Folgenabschätzung einer Circular Economy in 9 Sektoren in Deutschland. Erreichbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Modell-Deutschland-Circular-Economy-Modellierung.pdf>. [26.02.2026]

Fraunhofer Materials (2024). Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Erreichbar unter: https://www.materials.fraunhofer.de/content/dam/materials/dokumente/broschueren_prospekte/Diskussionspapier%20Ressourceneffizienz-Resourceneffizienz-2024-11-Einzelseiten-150dpi.pdf. [26.02.2026]

Hailo (2026). Was passiert mit dem Restmüll? Erreichbar unter: <https://www.hailo.de/de/shop/inspiration/alles-rund-um-muell/was-passiert-mit-dem-restmuell>. [26.02.2026]

Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (2026). Zahlen & Fakten. Erreichbar unter: <https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/>. [26.02.2026]

Heck et al. (2024). Industrial symbiosis as enabler and barrier for defossilization: The case of Höchst Industrial Park. Erreichbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186424003262>. [26.02.2026]

Höffgen et al. (2022). Entwicklung einer Strategie zum Umgang mit Betonbrechsanden in Baden-Württemberg. Erreichbar unter: https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2024/04/RZ_THINKTANK_Betonbrechsanden_A4_DE_Web.pdf. [26.02.2026]

[IEA] International Energy Agency (2018). Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling. Erreichbar unter: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Life_Cycle_Assesment_of_Current_Photovoltaic_Module_Recycling_by_Task_12.pdf. [26.02.2026]

[IEA] International Energy Agency (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Erreichbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>. [26.02.2026]

[IEA] International Energy Agency (2024). Batteries and Secure Energy Transitions. Erreichbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb39c1bf-d2b3-446d-8c35-aae6b1f3a4a0/BatteriesandSecureEnergyTransitions.pdf>. [26.02.2026]

[ifeu] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (2021). Sekundärrohstoffe in Deutschland. Erreichbar unter: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcenmuell/2104-22-ifeu-studie-sekundaer-rohstoffe_in_deutschland.pdf. [26.02.2026]

ifo Institut (2021a). ifo Institut schätzt Produktionsausfälle der Industrie auf 40 Milliarden Euro. Erreichbar unter: <https://www.ifo.de/pressemitteilung/2021-10-29/ifo-institut-schaetzt-produktionsausfaelle-der-industrie>. [26.02.2026]

ifo Institut (2021b). Materialmangel in der Industrie verschärft sich. Erreichbar unter: <https://www.ifo.de/pressemitteilung/2021-12-23/materialmangel-der-industrie-verschaerft-sich>. [26.02.2026]

ift Rosenheim (2019). Recycling von Flachglas im Bauwesen – Analyse des Ist-Zustandes und Ableitung von Handlungsempfehlungen. Erreichbar unter: https://www.ift-rosenheim.de/fileadmin/IFT/Forschung/Forschungsberichte/2019/767060_Forschungsbericht_Flachglasrecycling_Shop_web.pdf. [26.02.2026]

Industriepark Höchst (2025). Industriepark Höchst: Carbon Capture-Pilotanlage geht in Betrieb. Erreichbar unter: <https://www.industriepark-hoechst.com/de/stp/nachbarn/presse/pressemeldung-78592.html>. [26.02.2026]

[IW und Fraunhofer ISI] IW Consult und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2024). Kritisches für die Wertschöpfung – Rohstoffabhängigkeit der deutschen Wirtschaft. Erreichbar unter: https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Studien-und-Materialien/Studie-Rohstoffabhaengigkeit_IWC_ISI.pdf. [26.02.2026]

Kalundborg Symbiosis (2026). The ecosystem behind Kalundborg Symbiosis. Erreichbar unter: <https://www.symbiosis.dk/en/okosystem-bag-kalundborg-symbiose/>. [26.02.2026]

van Keeken et al. (2024). The effects of product lifetime extension on short-and long-term supply chain circularity: A case study of the European aluminum automotive supply chain Primary resources Secondary resources Global warming potential System dynamics Resource sufficiency. Erreichbar unter: https://www.researchgate.net/publication/382926318_The_effects_of_product_lifetime_extension_on_short-and_long-term_supply_chain_circularity_A_case_study_of_the_European_aluminum_automotive_supply_chain_Primary_resources_Secondary_resources_Global_war. [26.02.2026]

KME (2025). Historical Copper Values (Ton). Erreichbar unter: <https://www.kme.com/en/services/metal-prices/historical/historical-copper-values/?met=CU&datada=01.01.2023&dataa=31.12.2023&nat=DE&application=pmk025w.pgm>. [26.02.2026]

Kreislaufwirtschaft Bau (2024). Mineralische Bauabfälle Monitoring 2022. Erreichbar unter: <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-14.pdf>. [26.02.2026]

Lichtenthäler et al. (2025). Ressourceneffizienzpotenziale durch digital gestützte zirkuläre Maßnahmen. Erreichbar unter: <https://www.iwkoeln.de/studien/sarah-lichtenthaeler-adriana-neligan-edgar-schmitz-vera-demary-ressourceneffizienzpotenziale-durch-digital-gestuetzte-zirkulaere-massnahmen.html>. [26.02.2026]

Lichtenthäler und Neligan (2023). How Circular Are Businesses in Germany? *Intereconomics*, 58(2), pp. 79–86. Erreichbar unter: <https://www.intereconomics.eu/contents/year/2023/number/2/article/how-circular-are-businesses-in-germany.html>. [26.02.2026]

Mining Technology (2025). China currently controls over 69% of global rare earth production. Erreichbar unter: <https://www.mining-technology.com/analyst-comment/china-global-rare-earth-production/>. [26.02.2026]

Neves et al. (2019). The Potential of Industrial Symbiosis: Case Analysis and Main Drivers and Barriers to Its Implementation. *Sustainability*, 11(24). Erreichbar unter: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/24/7095>. [26.02.2026]

OECD (2019). Global Material Resources Outlook to 2060. Erreichbar unter: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/02/global-material-resources-outlook-to-2060_g1g98d7d/9789264307452-en.pdf. [26.02.2026]

Öko-Institut (2024). Textilrecycling – Status Quo und aktuelle Entwicklungen. Erreichbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Textilrecycling-Status-Quo.pdf>. [26.02.2026]

Papathanasoglou et al. (2016). Institutional Barriers and Opportunities for the Implementation of Industrial Symbiosis in Greece. *Environmental Practice*, 18(4). Erreichbar unter: <https://www.cambridge.org/core/journals/environmental-practice/article/abs/research-article-institutional-barriers-and-opportunities-for-the-implementation-of-industrial-symbiosis-in-greece/047514FB95873E856E705BEB51C1FF24>. [26.02.2026]

Peters et al. (2024). Cradle-to-cradle recycling in terawatt photovoltaics: A vision of perpetual utility. *Joule*, 8(4), pp. 899 – 912. Erreichbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435124000515>. [26.02.2026]

[PIK] Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2025). Sieben von neun planetaren Grenzen überschritten – Ozeanversauerung im Gefahrenbereich. <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/sieben-von-neun-planetaren-grenzen-ueberschritten-ozeanversauerung-im-gefahrenbereich>. [26.02.2026]

Plastics Europe (2026). Kunststoffe in der Bauwirtschaft. Erreichbar unter: <https://plasticseurope.org/de/nachhaltigkeit/klima/bauwirtschaft/#:~:text=ImageDie%20in%20der%20Tabelle%20angezeigten,entspricht.> [26.02.2026]

Pothen und Brock (2021). Schrottbonus konkret. Instrumente für fairen Wettbewerb in den globalen Wertschöpfungsketten der Stahlherstellung und mikrostrukturierender Herstellungsverfahren. Erreichbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/aca233c0-410c-4388-98e0-fe6897941ae5>. [26.02.2026]

[RMIS] Raw Materials Information System der Europäischen Kommission (2026). Critical and Strategic Materials. Erreichbar unter: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/critical-and-strategic-materials>. [26.02.2026]

RWE (2025). RWE completes installation of all recyclable blades at Sofia Offshore Wind Farm, and over half of all turbines. Erreichbar unter: <https://uk.rwe.com/press-and-news/2025-11-10-rwe-completes-installation-of-all-recyclable-blades-at-sofia-offshore-wind-farm/>. [26.02.2026]

Sajdeh et al. (2025) Spinning Textile Waste into Value. BCG. Erreichbar unter: <https://www.bcg.com/publications/2025/spinning-textile-waste-into-value>. [26.02.2026]

Statista (2025). Umsatzanteil von Secondhandkleidung am Bekleidungsmarkt in Deutschland in den Jahren 2018 bis 2025 mit einer Prognose bis 2029. Erreichbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1363438/umfrage/umsatzanteil-von-secondhandkleidung-in-deutschland/>. [26.02.2026]

Systemiq (2025). The Textile Recycling Breakthrough. Erreichbar unter: https://www.systemiq.earth/downloads/Systemiq-The_Textile_Recycling_Breakthrough-Why_policy_must_lead_the_scale-up_of_polyester_recycling_in_Europe-EN.pdf. [26.02.2026]

Textile Exchange (2025). Materials Market Report 2025. Erreichbar unter: <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2025/>. [26.02.2026]

[UBA] Umweltbundesamt (2023). Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2021. Erreichbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltzustand-trends/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib> https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/jahresbericht_altfahrzeug_verwertungsquoten_2021_bf.pdf. [26.02.2026]

[UBA] Umweltbundesamt (2024). Indikator: Treibhausgas-Emissionen der Industrie. Erreichbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-treibhausgas-emissionen-der-industrie#welche-bedeutung-hat-der-indikator>. [26.02.2026]

[UBA] Umweltbundesamt (2025a). GreenTech Atlas 2025. Erreichbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/wirtschaft-umwelt/wirtschaft-fuer-umwelt-klimaschutz/greentech-atlas-2025#undefined>. [26.02.2026]

[UBA] Umweltbundesamt (2025b). Altpapier. Erreichbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier>. [26.02.2026]

[UNCTAD] UN Trade and Development (2025). Goods and services (BPM6): Exports and imports of goods and services, annual. Erreichbar unter: <https://unctadstat.unctad.org/datacentre/dataviewer/US.GoodsAndServicesBpm6>. [26.02.2026]

VDMA (2024). Gemeinsam wachsen – neue Studie „Production as a Service“. Erreichbar unter: <https://www.vdma.eu/de/viewer/-/v2article/render/83390083>. [26.02.2026]

VDMA (2025a). Mangelware Investitionen. Erreichbar unter: <https://www.vdma.eu/de/maschinenbau-zahl-bild>. [26.02.2026]

VDMA (2025b). International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV). Erreichbar unter: <https://vdma.eu/en-GB/international-technology-roadmap-photovoltaic>. [26.02.2026]

[VDZ] Verein Deutscher Zementwerke (2022). Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Erreichbar unter: <https://www.vdz-online.de/ressourcenschonung>. [26.02.2026]

[VEA] Bundesverband der Energie-Abnehmer (2021). Kreislaufwirtschaft von Kunststoff bedeutend für Klimaziele. Erreichbar unter: <https://www.vea.de/newsroom/pressemitteilungen/pressemitteilung/kreislaufwirtschaft-von-kunststoff-bedeutend-fuer-klimaziele>. [26.02.2026]

Verdantix (2023). Market Size and Forecast: Circular Economy Digital Solutions 2021–2027 (Global). Erreichbar unter: <https://www.verdantix.com/venture/report/market-size-and-forecast-circular-economy-digital-solutions-2021-2027-global>. [26.02.2026]

[WBCSD] World Business Council for Sustainable Development (2025). Circular Transition Indicators (CTI) for Buildings – Sector Guidance. <https://www.wbcds.org/resources/circular-transition-indicators-cti-sector-guidance-buildings/>. [26.02.2026]

[WBCSD] World Business Council for Sustainable Development (2026). Circular Transition Indicators (CTI). Erreichbar unter: <https://www.wbcds.org/actions/circular-transition-indicators/>. [26.02.2026]

[WBCSD und BCG] World Business Council for Sustainable Development und BCG (2018). The new big circle. Erreichbar unter: <https://www.wbcds.org/resources/the-new-big-circle/>. [26.02.2026]

[WBCSD und BCG] World Business Council for Sustainable Development und BCG (2019). CEO Guide to the Circular Bioeconomy. Erreichbar unter: <https://www.wbcds.org/resources/ceo-guide-to-the-circular-bioeconomy/>. [26.02.2026]

[WBCSD und BCG] World Business Council for Sustainable Development und BCG (2022). A “Paris Agreement” for recycling the Earth’s resources. Erreichbar unter: <https://www.wbcds.org/resources/a-paris-agreement-for-recycling-the-earths-resources/>. [26.02.2026]

Wind Europe (2020). Accelerating Wind Turbine Blade Circularity. Erreichbar unter: <https://windeurope.org/data/products/accelerating-wind-turbine-blade-circularity/>. [26.02.2026]

[WITS] World Integrated Trade Solution (2026). Germany Silver (including silver plated with gold or platinum); unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form imports by country in 2023. Erreichbar unter: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/DEU/year/2023/tradeflow/Imports/partner/ALL/product/7106>. [26.02.2026]

World Bank Group (2024). Manufacturing, value added (current US\$). Erreichbar unter: <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.CD>. [26.02.2026]

[WTO] World Trade Organization (2026). Leading import countries worldwide in 2024. Erreichbar über Statista unter: <https://www.statista.com/statistics/268184/leading-import-countries-worldwide/#:~:text=The%20United%20States%2C%20China%20and,fuel%2C%20electronic%20equipment%20and%20machinery>. [26.02.2026]

WWF (2023). A Comprehensive Circular Economy for Germany in 2045. Erreichbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-model-germany-circular-economy.pdf>. [26.02.2026]

Über die Autoren

Alexander Meyer zum Felde ist Partner und Director bei BCG in Hamburg. Er verantwortet weltweit das Geschäft für Circular Economy und Recycling-Themen. Sie erreichen ihn unter Meyer.zum.Felde.Alexander@bcg.com.

Dr. Patrick Herhold ist Managing Director und Senior Partner bei BCG in München. Er ist Mitbegründer des BCG Center for Climate & Sustainability, der Klimapfade-Studien sowie der Transformationspfade-Studie. Sie erreichen ihn unter Herhold.Patrick@bcg.com.

Miriam Semmel ist Project Leader bei BCG in Berlin sowie Mitglied der globalen Praxisgruppe Climate & Sustainability und fokussiert sich auf Circular-Economy- und Recycling-Themen.

Leoni Yildiz war Project Leader bei BCG in Berlin und Kernmitglied der globalen Praxisgruppen Climate & Sustainability sowie Industrial Goods.

Koautoren:

Dr. Jonathan Brown (BCG)

Dr. Jens Burchardt (BCG)

Pol Cardona (BCG Vantage)

Martin Feth (BCG)

Anna Hessabi (BCG)

Catharina Martinez-Pardo (BCG)

Dr. Luca Messerschmidt (BCG)

Nicholas Poellinger (BCG)

Dr. Johanna Pütz (BCG)

Alina Schmitz (BCG)

Finja Stampa (BCG)

Theresa Stemmler (BCG)

Anile Tmava (BCG)

Holger Lösch ist stellvertretender Hauptgeschäftsführer des BDI. Sie erreichen ihn unter h.loesch@bdi.eu.

Uta Maria Pfeiffer ist Co-Bereichsleiterin Energie, Mobilität und Umwelt beim BDI. Sie erreichen sie unter u.pfeiffer@bdi.eu.

Dr. Claas Oehlmann ist Senior Referent und Geschäftsführer BDI-Initiative Circular Economy. Sie erreichen ihn unter c.oehlmann@bdi.eu.

Koautoren:

Leonie Heitmüller (BDI)

Susanna Minato-Torkler (BDI)

Viktoria Otte (BDI)

Diese Publikation gibt einen gezielten Einblick in eine der drängendsten wirtschafts- und ressourcenpolitischen Fragen unserer Zeit. Auf unserem Content Hub finden Sie gebündelte Ergebnisse sowie die digitalen Versionen der Studie – auch in kompakter Kurzfassung.



Danksagung

Unser besonderer Dank gilt dem Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) und seinen Mitgliedsverbänden sowie den mehr als 70 Beteiligten und Experten aus Unternehmen und Verbänden. Wir danken ihnen für ihre umfangreichen und konstruktiven Beiträge sowie ihre Unterstützung bei der Validierung der Analysen – sowohl als Mitglieder des Steuerungs- und des Stakeholder-Kreises wie auch als Diskussionsteilnehmer in 15 segmentspezifischen Touchpoints und bilateralen Expertengesprächen im Studienverlauf.

Stellvertretend für die zahlreichen Experten aus den BDI-Mitgliedsverbänden und Unternehmen sei den Mitgliedern des Steuerungskreises gedankt, im Einzelnen:

- Dr. Cassian Behlau, Covestro Deutschland AG
- Dr. Andreas Binder, Covestro Deutschland AG
- Dr. Andreas Brukschen, Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e. V. (BDE)
- Nadine Braun, E.ON SE
- Philipp Eisenmann, Messe München GmbH
- Thorsten Feldt, REMONDIS GmbH & Co. KG
- Sören Grumptmann, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e. V.
- Martin Hauser, Aurubis AG
- Sandra Herkommer, Bundesverband Glasindustrie e. V.
- Inge Hofkens, Aurubis AG
- Clea Kaske-Kuck, WBCSD – World Business Council for Sustainable Development
- Dr. Johannes Kirchhoff, KIRCHHOFF SE & Co. KG & KIRCHHOFF Ecotec SE
- Stefan Kleindienst, Siemens Mobility GmbH
- Andre Koring, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e. V.
- Frederike Krebs, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e. V.
- Christina Labusch, REMONDIS Sustainable Services GmbH
- Dr. Andreas Mehlhorn, Siemens Mobility GmbH
- Tara Nitz, RWE AG
- Andrea Piontkowski, Aluminium Deutschland e. V.
- Michael Püschner, Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA)
- Jörg Schäfer, Aluminium Deutschland e. V.
- Lucas Schmidt-Wehrich, PreZero Stiftung & Co. KG
- Jonas Stracke, Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e. V.
- Christoph Wagener, KIRCHHOFF Automotive Deutschland GmbH

Wir danken auch den Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirats der Studie für ihre methodische Unterstützung sowie viele hilfreiche und konstruktive Kommentare:

Dr. Holger Berg, Prof. Dr. Daniel Goldmann, Prof. Dr. Kathrin Greiff, Dr. Adriana Neligan und Dr. Britta Bookhagen.

Gleichermaßen bedanken wir uns bei Miriam Benedi, Katharina Friedl, Maria Martinez de Lahidalga, Julia Mahler, Michelle Petroll, Sophia Pfrimmer, Christine Schnabl, Julia Schmid, Alina Seehofer, Anna Stanger, Maximilian Uebel, Burkhard Engelmann und Ulrich Kremer für ihre inhaltliche, organisatorische, redaktionelle und grafische Unterstützung.



Für weitere Informationen oder die Erlaubnis zum Nachdruck wenden Sie sich bitte direkt an BCG (permissions@bcg.com).

© Boston Consulting Group 2026. Alle Rechte vorbehalten.
Mai 2026



Druckprodukt mit finanziellem

Klimabeitrag

ClimatePartner.com/12556-2604-1007

