



WWF



**Den Kreislauf in die Energie-
intensive Industrie bringen:
10 Schlüsseltechnologien für die deutsche
Stahl-, Zement- und Chemieindustrie**

IMPRESSUM

| | |
|----------------------|---|
| Herausgeber | WWF Deutschland (Stiftung bürgerlichen Rechts, vertreten durch die Vorständin Meike Rothschädl), Reinhardtstraße 18, D-10117 Berlin |
| Stand | Mai 2025 |
| Koordination | Lisa-Maria Okken (WWF) |
| Autoren | Marlene Kick, Julia Okatz, Sophie Herrmann (Systemiq) |
| Kontakt | lisa-maria.okken@wwf.de |
| Redaktion | Lisa-Maria Okken, Thomas Koeberich (WWF) |
| Bildredaktion | Sonja Ritter (WWF) |
| Mitarbeit | Lisa-Maria Okken, Rebecca Tauer, Tom Ohlendorf, Tina Kussin, Silke Küstner (WWF) |
| Design | Silke Roßbach |

© SMS group GmbH (Titelbild)

1. Auflage

© 2025 WWF Deutschland, Berlin. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers.

Inhalt

| | |
|---|----|
| Vorwort | 4 |
| Empfehlungen des WWF | 6 |
| Kernbotschaften | 10 |
| Methode | 13 |
|  1. Kreislaufwirtschaft in der Stahlindustrie: Wichtigste Hebel, Umweltpotenziale und Technologien | 15 |
| Zirkuläre Technologiefelder und ihre Potenziale | 15 |
| Wichtige Kreislaufwirtschaftstechnologien | 17 |
| Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) | 17 |
| Trennverfahren zur Kupferentfernung | 19 |
| Herstellung von Grünem Stahl durch H ₂ -DRI-EAF | 21 |
|  2. Kreislaufwirtschaft in der Zementindustrie: Wichtigste Hebel, Umweltpotenziale und Technologien | 25 |
| Zirkuläre Technologiefelder und ihre Potenziale | 25 |
| Wichtige Kreislaufwirtschaftstechnologien | 26 |
| Fertigteile/Vorfertigung/Vorgefertigte Einheiten in Kombination mit digitaler Effizienzoptimierung | 26 |
| Herstellung und Einsatz von kalziniertem Ton | 29 |
|  3. Kreislaufwirtschaft in der Chemieindustrie: Wichtigste Hebel, Umweltpotenziale und Technologien | 33 |
| Zirkuläre Technologiefelder und ihre Potenziale | 33 |
| Wichtige Kreislaufwirtschaftstechnologien | 35 |
| Wiederverwendungssysteme: IoT-gestützte Verpackungssysteme | 35 |
| Intelligente Sortierverfahren zur Verbesserung des mechanischen Recyclings | 38 |
| Chemisches Recycling: Nischenlösung mit spezifischen Anwendungsfällen | 41 |
| Zirkuläre Methanolnutzung über MtX-Verfahren aus katalytischer Hydrierung | 45 |
| 4. Digitale Zwillinge als Beispiel einer sektorübergreifenden Technologie für mehr Kreislaufwirtschaft | 49 |
| Einsatzbereiche für digitale Zwillinge in der Kreislaufwirtschaft | 50 |
| International Energy Agency (IEA) Technology Readiness Scala | 52 |
| Glossar | 53 |

Vorwort des WWF

Liebe Leserinnen und Leser,

für ein wettbewerbsfähiges Europa müssen wir jetzt in den Bau und die Produktion von Technologien investieren, die auf Klimaschutz und Kreislaufwirtschaft einzahlen. Innovative Technologien bringen den Klima- und Umweltschutz entscheidend voran. Sie liefern Lösungen für die Herausforderungen unserer Zeit und sichern unsere Lebensgrundlage. Deutschland verfügt über eine ingenieurwissenschaftliche Exzellenz, die großes Potenzial zur Skalierung hat, wenn sie zur Dekarbonisierung eingesetzt und erst recht, wenn sie mit der Kreislaufwirtschaft kombiniert wird. Damit kann Deutschland eine führende Rolle im globalen Wettbewerb behaupten. **Nötig ist dafür eine europäische Industriepolitik, die Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität als Grundpfeiler der Wettbewerbsfähigkeit begreift.**

Dieser Bericht stellt zehn Technologien vor, die zur Kreislaufwirtschaft beitragen und damit das Klima schützen:

Mit Lasern lassen sich Kupferreste im Stahlschrott finden und entfernen, um so dessen Qualität zu verbessern. Mit modularem Bauen kann Beton im Bau eingespart werden. Digitales Tracking hilft, Verpackungen zurückzuverfolgen, sodass sie seltener im Müll landen. Die Kreislaufführung von Rohstoffen steigert zudem die Effizienz und verringert fossile Energieabhängigkeiten um bis zu 20 Prozent. Sie macht unsere Wirtschaft resilienter. Je mehr Rohstoffe wir einsparen und wiederverwenden, desto weniger müssen wir importieren. In Zeiten instabiler Lieferketten sorgt das für Sicherheit und Wettbewerbsvorteile. Die jüngste Energiepreiskrise hat uns vor Augen geführt, welche Folgen die Gasabhängigkeit für die deutsche Wirtschaft haben kann. **Die hier vorgestellten Technologien haben Marktreife.** Schon heute könnten Produzenten sie in den energieintensiven Industrien Stahl, Chemie und Zement, die besonders unter Transformationsdruck stehen, anwenden. Sie tun dies aber noch viel zu selten. **Der WWF möchte das ändern und legt in diesem Bericht das Potenzial dieser Technologien für Klima, Kreislaufwirtschaft und Wettbewerbsfähigkeit offen.** Der Bericht zeigt: Jede Technologie bringt eigene Anforderungen, Barrieren und Herausforderungen in ihrer Anwendung mit sich. Aber um den Einsatz dieser Technologien voranzutreiben, weiterzuentwickeln und zu skalieren, bringt uns Techno-



Viviane Raddatz
Fachbereichsleiterin
Klimaschutz und Energiepolitik



Rebecca Tauer
Teamleitung
Circular Economy

logieoffenheit als politisches Instrumentarium nicht weiter. Damit würde Deutschland die Chance verpassen, Pionier auf diesen Gebieten zu werden, und relevante Technologien würden auf der Strecke bleiben.

Die Politik hat das Potenzial der Kreislaufwirtschaft bei der klimaneutralen Transformation energieintensiver Industrien lange übersehen. Dabei verfügt die Kreislaufwirtschaft über Vorteile, die bisher viel zu wenig Beachtung finden. Eine zirkuläre Wirtschaft schützt Klima und Natur und stärkt die europäische Wettbewerbsfähigkeit! Mit der Entwicklung grüner Technologien stellen wir uns in Europa zukunftssicher auf: beim Erreichen unserer Klimaziele, als Vorbild für Länder jenseits unseres Kontinents sowie zur langfristigen Bewahrung unserer Wettbewerbsfähigkeit. Darauf können wir bauen – vorausgesetzt, die Investitionen kommen wirklich grünen Technologien zugute. Dazu will dieser Bericht einen Beitrag leisten.

So sehr diese und andere Technologien bei der Dekarbonisierung der Industrie helfen – **für eine umfassende Transformation kommen wir an einem systemischen Ansatz und gesellschaftlichen Wandel nicht vorbei.** Technologien lösen nicht alle Probleme, sind aber ein wichtiger Teil der Lösung. Neue Pfade zu Net Zero kann die Industrie dann erfolgreich gehen, wenn technologische Innovationen, Politik und gesellschaftliche Veränderungen als kohärente Bestandteile eines umfassenden Ansatzes zum Einsatz kommen. Eine Kreislaufwirtschaft erfordert einen Wandel von linearen zu zirkulären Geschäftsmodellen, die auf Langlebigkeit, Reparierbarkeit und Wiederverwendung setzen.

Viviane Raddatz
Fachbereichsleiterin
Klimaschutz und Energiepolitik

Rebecca Tauer
Teamleitung
Circular Economy

Empfehlungen des WWF

Empfehlungen an die Industrie

- ▶ **Kreislaufwirtschaft strategisch zur Dekarbonisierung und Ressourcenschonung nutzen:** Die Industrie soll systemische Kreislaufwirtschaftshebel entlang der gesamten Wertschöpfungskette einsetzen, um CO₂-Emissionen zu senken und Ressourcenverbrauch zu reduzieren. Langlebiges Design, materialeffiziente Prozesse und zirkuläre Geschäftsmodelle können dabei größere Wirkungen erzielen als rein technologische Maßnahmen. Zugleich müssen wir diese parallel skalieren.
- ▶ **Digitale Technologien wie digitale Zwillinge und IoT (Internet of Things) einsetzen:** Diese Technologien sollen zur Effizienzsteigerung, zur besseren Designplanung und zur Nachverfolgung von Materialien und Produkten genutzt werden, um Materialeinsparungen, CO₂-Reduktion und verlängerte Lebenszyklen zu ermöglichen.
- ▶ **Zukunftsfähige Bau- und Designstrategien etablieren:** Im Bauwesen sollen modulare Vorfertigung und digitale Planungsmethoden wie Building Information Modeling (BIM) genutzt werden, um Materialeinsparungen von bis zu 40 Prozent zu erzielen und CO₂-Emissionen drastisch zu reduzieren.
- ▶ **Zusammenarbeit bei Mehrweg- und Wiederverwendungssystemen fördern:** Unternehmen sollen gemeinsam in standardisierte, interoperable und digital unterstützte Mehrweg- und Wiederverwendungssysteme investieren. Solche Kooperationen entlang der Lieferkette – etwa bei Logistik, Reinigung oder Pfandsystemen – senken Kosten, schaffen Skaleneffekte und erleichtern den Zugang für kleinere Akteure.
- ▶ **Innovative Recyclingtechnologien skalieren:** Technologien wie chemisches Recycling sollen dort genutzt werden, wo alle vorgelagerten Optimierungsmöglichkeiten ausgeschöpft wurden und die Aufbereitung der Kunststoffabfälle für ein mechanisches Recycling zu aufwendig ist – in diesem Fall unter der Voraussetzung transparenter Ökobilanzen, klarer rechtlicher Definitionen und Zuordnungsmethoden, die die tatsächlichen Stoffströme der beteiligten Prozesse widerspiegeln.

Empfehlungen an die Politik

- ▶ **Eine moderne Industriepolitik muss Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität als zentrale Säulen der Wettbewerbsfähigkeit integrieren:** Es braucht eine europäische und deutsche Industriepolitik, die kohärent die Transformation in der Grundstoffindustrie ermöglicht und anreizt. Diese muss auf einer integrierten Transformationsstrategie basieren, die zukunftsfähige, zirkuläre Modelle im Kontext von realistischen Standortfaktoren identifiziert, Barrieren analysiert und klare Lösungen vorschlägt, inklusive innereuropäischer und internationaler Partnerschaften. Die Kreislaufwirtschaft muss als integraler Bestandteil einer modernen Industriepolitik verankert werden. Die Bundesregierung sollte eine technologie- und standortbezogene Strategie für die Stahl-, Zement- und Chemieindustrie auflegen, die gezielt in emissions- und ressourcensparende Kreislaufwirtschaftslösungen investiert. Dazu zählen u. a. der Ausbau nationaler EAF-Kapazitäten, die Förderung von Digital- und Sortiertechnologien und ein regulatorischer Rahmen mit Mindestzyklusquoten und Designanforderungen. Nur so lassen sich neue Wertschöpfungsketten aufbauen und lässt sich Deutschland als Exportstandort für zirkuläre Technologien positionieren.
- ▶ **Der CO₂-Preis muss Innovationen und Investitionen in die Transformation in Gang setzen:** Seit Einführung des Europäischen Emissionshandels (ETS) profitiert die Industrie von der kostenlosen Zuteilung, zahlt dabei aber nicht in vollem Umfang für das CO₂, das sie ausstößt, und auch das Verursacherprinzip findet keine Anwendung. Die Emissionen der Anlagen, die im ETS verzeichnet sind, sind seit Einführung des Emissionshandels nur geringfügig gesunken. Durch die Vergabe der kostenlosen Zuteilung wird der CO₂-Preis geschwächt, kann seine Lenkungswirkung nicht entfalten und setzt keine Anreize für innovative Investitionen. In der Reform des EU-Emissionshandels 2023 wurde beschlossen, die kostenlose Zuteilung erst zum Jahr 2034 auslaufen zu lassen. Dieses Ambitionsniveau muss mindestens beibehalten werden. Jedes frühere Auslaufen hätte bereits Anreize geschaffen. Um bis dahin weitere Fehlanreize zu vermeiden, muss die freie Zuteilung an Gegenleistungen geknüpft werden. Zu diesen sollte gehören, dass sich Unternehmen wissenschaftlich fundierte Klima- und Umweltziele setzen (Science Based Targets) und mittel- bis langfristige Transformationspläne vorlegen. Zudem sollten die erhaltenen Gelder an Investitionen seitens der Unternehmen in Energieeffizienz, klimafreundliche Prozesse und den Ausbau erneuerbarer Energien gebunden werden.

- ▶ **Verbindliche Ressourcenziele gesetzlich verankern:** Um die Transformation hin zu einer klimaneutralen und ressourcenschonenden Industrie zu ermöglichen, ist ein ambitioniertes politisches Rahmenwerk nötig, das Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft systematisch fördert. Analog zu den Klimazielen braucht es politisch vereinbarte, verbindliche Ressourcenziele, die im Rahmen eines Ressourcenschutzgesetzes konkretisiert, implementiert und wirksam überwacht werden.

Notwendig sind auch die direkte finanzielle Unterstützung von Investitionen und die Förderung von Nachfrage nach nachhaltigen Materialien und Produkten.

- ▶ **Kreislaufwirtschaft mit einer ressourcenorientierten Finanz- und Steuerpolitik fördern:** Eine effektive Kreislaufwirtschaft verlangt gezielte fiskalische Anreize. Die Bundesregierung sollte Umweltsteuern auf Primärrohstoffe einführen, Steuernachlässe für zirkuläre Dienstleistungen wie Reparatur- oder Sharingangebote gewähren und umweltschädliche Subventionen abbauen. Gerade für den Mittelstand braucht es Fördermodelle wie „As a Service“-Ansätze, um Investitionen in innovative Kreislaufwirtschaftstechnologien wie LIBS-Systeme, Kupferentfernungsverfahren oder elektrolichtbogenofenbasierte (EAF-basierte) Stahlherstellung anzureizen.
- ▶ **Leitmärkte klimafreundlich und zirkulär ausrichten:** Die öffentliche Beschaffung allein in Deutschland umfasst ein jährliches Investitionsvolumen von 500 Milliarden Euro. Trotz der im Klimaschutzgesetz unter § 13 Abs. 2 verankerten Vorschrift für den Umgang mit den Klimaszzielen bei haushaltswirksamen Entscheidungen des Bundes, insbesondere bei Investitionen und Beschaffungen, entscheidet bei der Vergabe von Aufträgen noch primär das Kriterium der Wirtschaftlichkeit ohne Einbezug der wahren Klima- und Umweltkosten.
- ▶ **Klimaschutzverträge** sind ein sinnvolles Finanzierungsinstrument, um Investitionen in die Transformation zu fördern. Sie können der Industrie die nötige Planungs- und Investitionssicherheit geben, solange der CO₂-Preis nicht die notwendige Höhe erreicht hat und solange er keinen Anreiz zur Umstellung auf klimafreundliche Technologien und Produktionsprozesse bietet. Sie sollten in dieser Legislaturperiode weitergeführt werden. Die Technologieförderungen sollten nicht nur auf Klimaschutztechnologien, sondern auch auf Lösungen für die Kreislaufwirtschaft einzahlen.

- ▶ **Strenge Rahmenbedingungen für den Einsatz von Carbon Capture and Utilization (CCU) umsetzen:** Da die bekannten Kreislaufstrategien (Reduzieren, Wiederverwenden, Recyceln) voraussichtlich nicht ausreichen werden, um Klimaneutralität in der Kunststoffindustrie herbeizuführen, können weitere Ansätze wie Produktion von Kunststoffen aus CO₂ (CCU) und Verwendung biotischer Rohstoffe zur Kreislaufwirtschaft im Kunststoffsektor beitragen. Dabei ist unbedingt eine Hierarchie zwischen den Strategien zu beachten, die sich am Energiebedarf und Landnutzungsbedarf orientieren sollte. Außerdem sollte eine dauerhafte Bindung des CO₂ im Produkt von mindestens 200 Jahren gewährleistet werden. Sonst führt die Kohlenstoffspeicherung in Produkten nur zu einer verzögerten Emission, nicht aber zu einer dauerhaften Speicherung, und entfaltet so keine langfristig gesicherte Klimaschutzwirkung.
- ▶ Auch **Biomasse** kann der Chemieindustrie als Kohlenstoffquelle dienen oder in der Zementindustrie als Brennstoff im Drehrohrofen. Der WWF spricht sich für strikte Regelungen vom lokalen bis zum internationalen Level aus, die eine energetische Nutzung von Biomasse erst dann erlauben, wenn keine andere Verwendung **größeren ökologischen Gewinn** verspricht. Denn für Pflanzen- und Tierarten bedeutet Biomasse Lebensraum. Wälder sind wichtige Kohlenstoffsenken, da sie CO₂ im Laufe ihres Lebens aufnehmen. Gleichzeitig sind Wälder neben ihrer Rolle für Biodiversität ein Erholungsgebiet für Menschen.

Kernbotschaften

Mit der Kombination von Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft hält die deutsche Industrie im globalen Wettbewerb eine starke Karte in der Hand.

- ▶ Mit kreislaufwirtschaftlichen Technologien lassen sich die Kosten auf dem Weg zur Klimaneutralität um bis zu 45 Prozent und die Energieabhängigkeiten um bis zu 20 Prozent verringern.¹ Die Effizienzgewinne der Kreislaufwirtschaftsheber können unter anderem den Bedarf an kostspieligem grünem Wasserstoff und die Notwendigkeit von teurem Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) senken, also den Bedarf am Abscheiden, Nutzen und Speichern von CO₂.
- ▶ Zudem leisten Materialeinsparungen und -substitutionen einen Beitrag zur Resilienz geopolitisch instabiler Lieferketten und volatiler Rohstoffpreise – z. B. im Bausektor, in dem sich die Materialimporte in den letzten Jahren stark verteuert haben.
- ▶ Deutschland kann sich in einigen der Kreislaufwirtschaftstechnologien mit seiner traditionell starken Ingenieursexzellenz in Szene setzen und so neue Exportmärkte erschließen, z. B. im modularen, digital optimierten Bau von Gebäuden oder Materialsortiersystemen für Kunststoffabfälle.

Während systemische Hebel entlang der ganzen Wertschöpfungskette benötigt werden (z. B. neue Geschäftsmodelle, um Verpackung zu vermeiden, oder besseres Fahrzeugdesign für sauberere Demontage und Materialwiedergewinnung), **sind innovative Technologien essenziell, um systemische Hebel zu ermöglichen und zu ergänzen.**

- ▶ Kreislaufwirtschaftstechnologien helfen, exzessiven Materialeinsatz zu vermeiden und Stoffkreisläufe zu schließen. Sie sind zudem attraktive Exportgüter für den Maschinenbau, die digitale Technologieproduktion und für Ingenieurdienstleistungen.

Viele Kreislaufwirtschaftstechnologien für Stahl, Zement und Chemie sind bereits erprobt und bieten große Emissionsminderungs- und Wirtschaftspotenziale (siehe Abb.1).

- ▶ Im Sinne der Wettbewerbsfähigkeit bestehen in Deutschland besondere Chancen für neue Geschäftsfelder – in Deep-Tech-Innovationen (z. B. Digital Twins im Bau oder Batterieoptimierung) und zirkulären Techniken in nachgelagerten Branchen (z. B. zirkuläre, grüne Stahlproduktion).
- ▶ Deutschland hat dank seiner Ingenieursexzellenz die Möglichkeit, diese Technologien zu entwickeln, oft eng kombiniert mit Dienstleistungen und teilweise Maschinenbau – auch für den Export.
- ▶ Die Potenziale einzelner Technologien für den spezifischen Standort Deutschland und Europa sollten jedoch im Kontext industrieller und geopolitischer Entwicklungen, z. B. Energiepreise und öffentliche Investitionen, weiter analysiert werden.

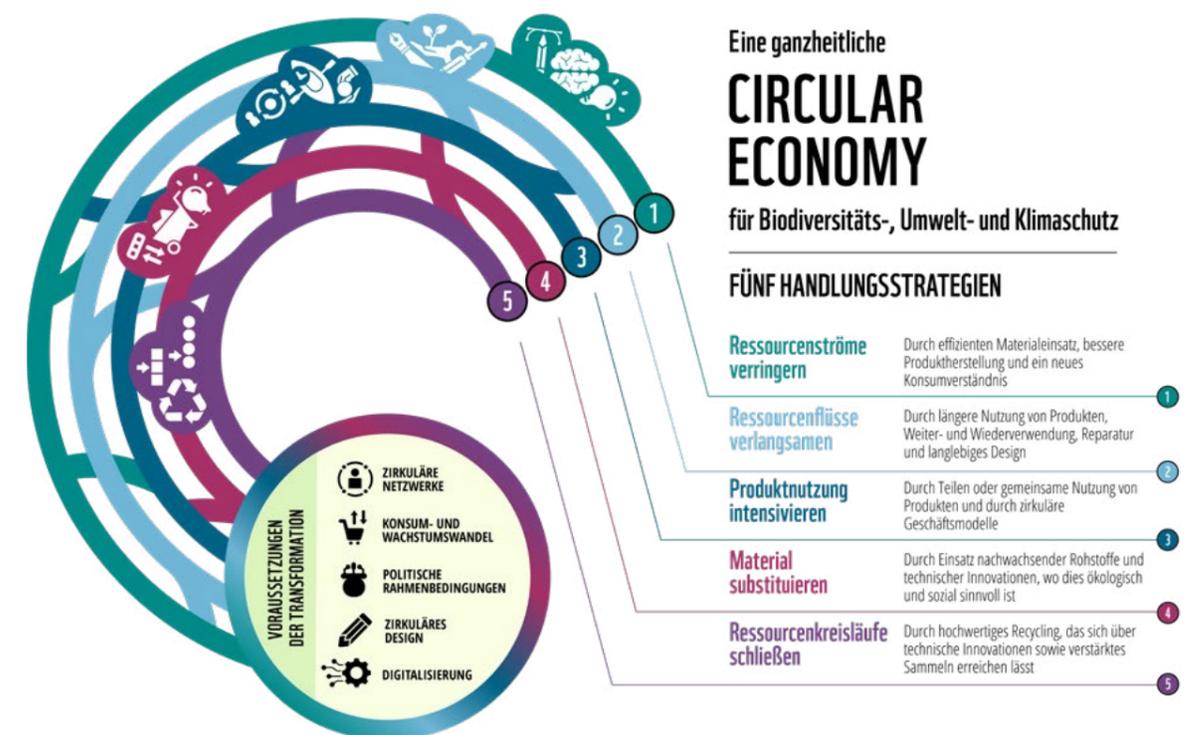


Abbildung 1: eigene Darstellung; © epqstudio.com

¹ Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) [s. <https://www.agora-industrie.de/publikationen/resilienter-klimaschutz-durch-eine-zirkulaere-wirtschaft/>] (2023): Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft. Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien, online verfügbar [hier](#).

| | | | Umweltpotenzial | | Wirtschaftliches Potenzial | | |
|------------------|--|------------------------|---|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|
| Industrie | Technologie | R-Strategie | Emissions-einsparpotenzial ² | Primärmaterial-einsparpotenzial | Kostenpotenzial ³ | Importresilienz ⁴ | Marktpotenzial ⁵ |
| Stahl | Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) | Recycle | ▶ | ▶ | ▲ | ▲ | Mittleres Exportpotenzial aufgrund sektorübergreifender Anwendbarkeit, aber begrenzter Anlagenanzahl weltweit |
| | Trennverfahren zur Kupferentfernung | Recycle | ▶ | ▲ | ▼ | ▲ | Vor allem inländisches Wachstumspotenzial aufgrund hohen Stahlschrottaufkommens |
| | Grüne Stahlproduktion über EAF-Route | Reduce, Reuse | ▲ | ▶ | ▼ | ▲ | Wachsender Markt für Green Steel mit Exportpotenzial für Anlagen und Know-how |
| Zement | Fertigbauteile | Reduce | ▲ | ▶ | ▲ | ▼ | Großes inländisches Potenzial |
| | Kalziniertes Ton | Reduce | ▲ | ▼ | ▲ | ▶ | Großes inländisches Potenzial |
| Chemie | IoT-gestützte Verpackungssysteme | Reuse | ▶ | ▲ | ▶ | ▲ | Wachstumspotenzial für neue Reuse-Märkte in DE und Europa |
| | Mechanisches Kunststoffrecycling | Recycle | ▲ | ▲ | ▶ | ▲ | Regulierungsbedingtes Marktwachstum in DE und Europa (z. B. PPWR) |
| | Chemisches Kunststoffrecycling | Recycle | ▼ | ▲ | ▼ | ▲ | Mittleres Exportpotenzial für Produkte und Technologien aufgrund limitierter Anwendungsbereiche Geringes Potenzial für inländische HVC ⁶ -Produktion |
| | Katalytische Hydrierung zu Methanol/MtO | Reduce, Recycle | ▶ | ▲ | ▼ | ▶ | Marktentwicklung für Weiterverarbeitung von importiertem Methanol über MtO-Verfahren in DE denkbar |
| Sektoragnostisch | Digital Twins | Reduce, Reuse, Recycle | ▲ | ▲ | ▶ | ▼ | Hohes Wachstums- und Exportpotenzial durch starke deutsche Player |

Abbildung 2: Mögliche Kreislaufwirtschaftstechnologien und ihre Potenziale für Deutschland; © Systemiq

2 Kumuliertes Einsparpotenzial im Sektor; Grundannahme ist der Einsatz von 100 % erneuerbaren Energien.
3 Beinhaltet Einsparpotenzial für Energiekosten, Prozess- und Produktionskostenreduktion sowie Potenzial für geringere Rohstoffkosten.
4 Beitrag zu Importunabhängigkeit; Resilienz gegenüber Marktschwankungen.
5 Marktpotenzial für den Standort Deutschland und als Exportgut.
6 High-Value Chemicals.

Technologiepotenzial gegenüber bestehender Praxis:

▲ Hoch, ▶ mittel, ▼ gering

Methode

Die Auswahl der zehn zentralen Kreislaufwirtschaftstechnologien basiert auf einer pragmatischen Bewertung entlang von CO₂- und Materialeinsparpotenzial, Wirtschaftlichkeit und Skalierbarkeit. Der Fokus liegt auf den energieintensiven Sektoren Stahl, Zement und Chemie, in denen Reduce-, Reuse- und Recycle-Strategien erhebliche Emissionsreduktionen ermöglichen. Dabei wurden sowohl Low- als auch High-Tech-Lösungen berücksichtigt – von Fertigbau (Modularbau) und LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) bis hin zu digitalen sowie hardwarebasierten Ansätzen, darunter digitale Zwillinge und chemisches Recycling.

Pro Industrie werden zwei bis vier Technologien vorgestellt, die aufgrund ihrer Relevanz, Datenverfügbarkeit und Anschlussfähigkeit ausgewählt wurden. Es handelt sich hierbei ausdrücklich nicht um eine vollständige, quantitative Analyse; es existieren zahlreiche weitere Kreislaufwirtschaftstechnologien mit verschiedenen Vor- und Nachteilen.

Kriterien zur Berücksichtigung bei der Technologieauswahl

- 1. Klimawirkung:** Fokus auf Technologien entlang der Kreislaufwirtschaftshebel mit dem kumulativ höchsten Emissionsreduktionspotenzial.⁷ Das beschriebene Emissionsreduktionspotenzial bezieht sich auf den Kreislaufwirtschaftshebel, nicht direkt auf die jeweilige Technologie. Die zugrunde liegenden Daten wurden nicht neu berechnet, sondern basieren auf bestehenden Analysen.⁸ In der Stahlindustrie liegen beispielsweise die größten CO₂e-Einsparpotenziale im Recycling. Deshalb wurden technische Lösungen, die das Recycling, beispielsweise durch eine bessere Sammlung, Sortierung und Aufbereitung, verbessern, näher betrachtet. Aufgrund des begrenzten Rahmens (max. zehn Technologien) wurden beispielhaft drei Technologien für Stahl ausgewählt: LIBS, Verfahren zur Kupferentfernung und Elektrolichtbogenöfen (EAF).
- 2. Marktreife:** Um in der Praxis eine schnelle Anwendung zu finden, sollten die Technologien mindestens ein Technology Readiness Level (TRL) > 7 aufweisen, also in der Demonstrationsphase oder weiter sein. Die TRL und Technologiebeschreibungen basieren dabei – wo vorhanden – auf der Datenbank der International Energy Agency.⁹

Analyse der Technologie

Die Technologien wurden, basierend auf Literaturanalysen und gezielten Experteninterviews, qualitativ hinsichtlich ihrer Kosten- und Resilienzvorteile bewertet. Dabei wurde relevante Literatur zusammengetragen und durch Experteneinschätzungen ergänzt.

1. Wesentliche wirtschaftliche Vorteile:

- **Kostenvorteile:** Analyse möglicher Kostenvorteile der Technologie, laufende Betriebskosten, Skalierbarkeit und generelle Wirtschaftlichkeit (bspw. in Bezug auf Energiekosten) im Vergleich zu bestehenden Alternativen
- **Internationale Wettbewerbsvorteile:** Bewertung des Potenzials zur Sicherung der Rohstoffversorgung, Importresilienz und Marktpotenzial im In- und Ausland (bspw. Exportfähigkeit). Zudem wurde berücksichtigt, ob die Technologie auf vorhandenen Stärken Deutschlands aufbaut und ob sie zur Positionierung Deutschlands als Innovationsführer in relevanten Bereichen beiträgt.

2. Weiterhin betrachtet wurden ökologische Aspekte, primär das Emissionseinsparpotenzial und das Primärmaterialeinsparpotenzial, aber auch Wasserverbrauch und Toxizität.

3. Die Analyse führt zudem illustrative Projektbeispiele an ...

4. ... sowie mögliche Barrieren und dazugehörige, mögliche Maßnahmen auf einer übergeordneten Ebene. Die spezifischen Technologieförderinstrumente müssen jedoch in weiterführenden Studien näher beleuchtet werden.

⁷ Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

⁸ Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

⁹ IEA (2024). ETP Clean Energy Technology Guide. Database, online verfügbar [hier](#).

1. Kreislaufwirtschaft in der Stahlindustrie: Wichtigste Hebel, Umweltpotenziale und Technologien



Zirkuläre Technologiefelder und ihre Potenziale

Der deutsche Stahlsektor verursacht 54,7 Millionen Tonnen CO₂e, was etwa sieben Prozent der gesamten CO₂e-Emissionen Deutschlands entspricht.¹⁰ Der Großteil der Emissionen entsteht bei der Eisenherstellung (Pig Iron & DRI, 2021). Um klimaneutral zu werden, muss die Stahlindustrie auf klimaneutrale Produktionsverfahren¹¹ umstellen und gleichzeitig die Kreislaufwirtschaftslösungen zur Effizienz- und Schrottroutensteigerung nutzen. Kreislaufwirtschaftshebel beschleunigen die Dekarbonisierung, reduzieren ihre Kosten und reduzieren Abhängigkeiten von Eisenerz und fossilen Energieträgern, das heißt sie verringern das Risiko globaler Lieferkettenunterbrechungen und steigern die europäische Rohstoffsicherheit für die wirtschaftlich zentralen Sektoren Maschinen- und Fahrzeugbau.

- ▶ Eine saubere Primärproduktion von Stahl, vor allem durch Elektrifizierung, kann die Emissionen des Sektors um 65 bis 75 Prozent bis 2045 gegenüber 2020 reduzieren. Allerdings erfordert dies enorme Mengen an erneuerbarer Energie und grünem Wasserstoff. Ohne begleitende Maßnahmen wie Recycling, verbesserte Produktgestaltung oder Wiederverwendung müsste deutlich mehr neuer Stahl produziert werden, was den Transformationsprozess aufwendig, kostenintensiv, ineffizient und insgesamt zu langsam machen würde.¹²
- ▶ Kreislaufwirtschaftshebel in den nachgelagerten Sektoren der Stahlindustrie können weitere 20 bis 30 Prozent der Emissionen einsparen. Dazu gehört sowohl die effizientere Nutzung von Materialien in den Abnahmesektoren wie Bau und Fahrzeuge (Einsparpotenzial von zehn bis 15 Prozent der kumulativen Emissionen), als auch ein verbessertes Recycling, inkl. Demontage (weitere zehn bis 15 Prozent).¹³

Folgende **Hebel der Kreislaufwirtschaft** können genutzt werden:

- ▶ **Optimiertes Produktdesign** kann in den nachgelagerten Branchen der Stahlindustrie wie Automobil und Bau den Stahlverbrauch senken. Dabei ist ein verbessertes Produktdesign der effektivste Weg zu höherer Stahlschrottqualität. Allerdings hilft besseres Design nur für neue Produkte, nicht für die vielen Fahrzeuge, Maschinen und Gebäudeteile, die bereits im Umlauf sind.

10 Oliver Wyman, IW Consult im Auftrag der Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024): Die Stahlindustrie am Scheidepunkt. Wegbereiter für Transformation und gesamtwirtschaftliche Resilienz, basierend auf IEA, World Steel Association, IEFA calculation, online verfügbar [hier](#).

11 Bspw. wasserstoffbasierte Direktreduktion, Molten Oxide Electrolysis und Electrowinning.

12 Oliver Wyman, IW Consult (2024).

13 Effizientere Materialnutzung: leistungsfähige Module, optimiertes Design sowie effiziente Produktions- und Bauprozesse; erhöhtes Recycling: Sammlung, Sortierung und Recyclinglösungen.

D. h. dass übergangsweise Technologien das bessere Sortieren und Trennen suboptimaler Produkte ermöglichen müssen.¹⁴ Dieser Hebel macht ca. ein Drittel des zirkulären Einsparungspotenzials aus.

- ▶ **Hochwertige Stahlschrottnutzung** – besseres Recycling ist wichtig, um mehr Wert aus Stahlschrott generieren zu können. In Deutschland ist hochwertiger Stahlschrott verfügbar¹⁵ und es bestehen potenzielle Abnehmermärkte für kostengünstigen, CO₂-reduzierten Stahl in Maschinenbau, Fahrzeugbau und Tiefbau.¹⁶ Deutschland recycelt bereits 90 Prozent seines Stahls, doch oft für minderwertige Produkte oder den steigenden Export.¹⁷ In Deutschland wird beispielsweise viel hochwertiger Flachstahl in Karosserien bei End of Life (EoL) exportiert. Diese hochwertigen Schrottvorkommen gehen somit zumindest der inländischen EAF-Schrottroute verloren.¹⁸
- ▶ **Bessere Sammlung und Sortiertechnologien** sind nötig, um die Qualität von Recyclingstahl zu steigern und so den Einsatz in anspruchsvollen Anwendungen zu ermöglichen. In den nächsten Jahren wird immer mehr Stahlschrott anfallen, da viele Maschinen und Gebäude ihr Lebensende erreichen – eine hochwertige Aufbereitung ist entscheidend, um diesen Schrott effizient für klimafreundlichen Stahl in stahlintensiven Sektoren zu nutzen.
- ▶ **Deshalb ist es besonders wichtig, technologische Lösungen für das höherwertige Stahlrecycling sowohl aus Umwelt- als auch aus wirtschaftlichen Gründen zu fördern und genauer zu erforschen.** Während politische Fördermaßnahmen eine Vielzahl kreativer, nachhaltiger Innovationen unterstützen können, zeigt die Marktanalyse, dass die folgenden Technologien ein hohes Potenzial haben:
 - Technologien zur verbesserten Materialerkennung als Voraussetzung eine bessere Trennverfahren – insbesondere laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS)
 - fortschrittliche Trennverfahren zur Kupferentfernung für höhere Schrottqualität und bessere Wiederverwertung von Stahl
 - mehr (H₂-DRI)-Elektrostahl-Kapazitäten (EAF) zur CO₂-armen Verarbeitung von Stahlschrott zu hochwertigem recycelten Stahl

14 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

15 Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024): Statistischer Bericht – Stahlschrott 2024.

16 (1) Anpassung bestehender Anlagen durch Blue oder Open Blast Furnaces (offene Hochöfen), die den externen Kohlenstoffeintrag minimieren, sowie KI-gestützte Steuerung zur Optimierung von Materialausbeute (Yield) und Energieeffizienz; (2) neue Produktionsmethoden wie die wasserstoffbasierte Direktreduktion (H₂-DRI), wobei Standortfaktoren wie die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien eine zentrale Rolle spielen; (3) innovative Geschäftsmodelle, etwa Servicepakete für die kontinuierliche Prozessoptimierung, die langfristige Effizienzgewinne ermöglichen.

17 Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024).

18 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

Wichtige Kreislaufwirtschaftstechnologien im Stahlrecycling

Erkennungstechnologie zur besseren Trennung: Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS)

LIBS ermöglicht eine schnelle und zerstörungsfreie In-line-Analyse (d. h. Analyse innerhalb bestehender Sortieranlagen) der chemischen Zusammensetzung von Materialien, durch die Verunreinigungen¹⁹ frühzeitig identifiziert und aussortiert werden können.

LIBS hat in Deutschland ein erhebliches Marktpotenzial, da die Anwendung nicht nur im Stahlsektor, sondern weit darüber hinaus eingesetzt werden kann.²⁰ Allein in Deutschland gibt es knapp 950 Sortieranlagen. Bei einer realistischen Marktdurchdringung im Stahlsektor von 30 Prozent (heute weniger als zehn Prozent) ergibt das ein Potenzial von ca. 250 Millionen Euro.²¹ Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Integration mit KI werden dieses Potenzial in den kommenden Jahren weiter steigern.

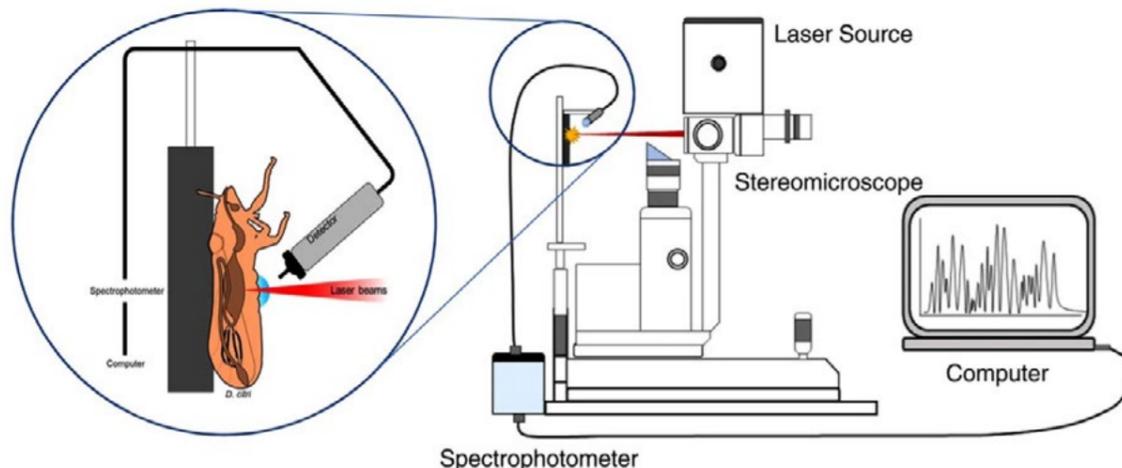


Abbildung 3: Schematische Darstellung der laserinduzierten Plasmaspektroskopie²²;

© CC-BY-4.0/Nabil Killiny et al./Springer Nature/https://www.nature.com/articles/s41598-019-39164-8#Bib1

19 Beispielsweise Bestimmung des Mangengehalts und anderer Legierungsbestandteile wie Phosphor, Chrom, Titan.

20 Beispielsweise zur Aluminium- und Batteriesortierung und zum Recycling von Polymerverbundstoffen, aber auch in der Automobilindustrie (Qualitätskontrolle), Luft- und Raumfahrt (Materialprüfung) sowie im Bereich Bergbau & Rohstoffanalyse (Erzsartierung).

21 Systemiq-Analyse, basierend auf Destatis (2022): Abfallentsorgungsanlagen, online verfügbar [hier](#).

22 Kiliny N. et al. (2019). Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) as a novel technique for detecting bacterial infection in insects

| Technologie | TRL | R-Strategie |
|---|-----|-------------|
| Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) | 11 | Recycle |

Internationale Wettbewerbsvorteile

- ▶ Die Entwicklung und Anwendung von LIBS-Technologien stärkt Deutschlands Position als Innovationsführer im Bereich Recyclingtechnologien.
- ▶ Verbesserte Recyclingprozesse tragen zur Sicherung der Rohstoffversorgung bei und reduzieren die Abhängigkeit von Importen – im Stahl und darüber hinaus.
- ▶ Die Fähigkeit, auf hochreine lokal produzierte Sekundärrohstoffe zugreifen zu können, verschafft der deutschen Industrie einen Wettbewerbsvorteil.²⁴

Ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen

- ▶ Insgesamt überwiegen die ökologischen Vorteile, d. h. Materialeinsparung und Emissionseinsparung, dennoch ist es wichtig die Technologie unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten (aufgrund des Lasereinsatzes) verantwortungsvoll einzusetzen.

Projektbeispiele

- ▶ Die deutsche Firma **cleansort GmbH** entwickelt und liefert schlüsselfertige Laser-Sortieranlagen für Metallschrott. Seit der Gründung 2018 hat sie zehn Anlagen installiert, die jeweils rund 290.000 Megawattstunden Primärenergie einsparen.²⁵
- ▶ Das **Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT** entwickelt laserinduzierte Emissionsspektroskopie (LIBS), um in Abfallströmen wiederverwendbare Rohstoffe präzise zu identifizieren. Zudem plant das Institut, die Integration von LIBS mit **künstlicher Intelligenz (KI)** voranzutreiben, um die Datenanalyse zu optimieren und die Effizienz der Recyclingprozesse weiter zu steigern.²⁶

Barrieren und mögliche Maßnahmen

- ▶ Die verbreitete Anwendung von LIBS-Technologien wird insbesondere im Mittelstand, vor allem durch folgende Faktoren gehemmt:
 - fehlende Fachkräfte für Industrieautomatisierung
 - geringe Bekanntheit der Technologie
- ▶ Mögliche Maßnahmen zur Förderung umfassen beispielsweise:
 - praxisnahe Projekt- und Prototypförderungen, um Anwendungspotenziale für die Kreislaufwirtschaft zu untermauern und anschaulich zu kommunizieren
 - Fachkräfteausbildung, beispielsweise durch stärkere Integrierung von innovativen Technologien im Ausbildungsprogramm
 - Unterstützung für Unternehmen, um neue Technologien als „As a Service“-Modelle anzubieten, da solche Modelle die CAPEX-Kosten, Installierungs- und Wartungskomplexität für mittelständische Recyclingunternehmen senken können

23 Fraunhofer IPM (o. D.). Laser-induced breakdown spectroscopy LIBS, online verfügbar [hier](#).

24 Ciupek, Martin (2023): Hightech-Sortieranlage identifiziert Metall blitzschnell per Laser. VDI nachrichten (19.05.2023).

25 Cleansort GmbH (2024): Innovationen aus der Lasertechnik für die Industrie, Dr. Markus Kogel-Hollacher (Pressekontakt), online verfügbar [hier](#).

26 Fraunhofer ILT (2024) Lasertechnik und KI beflügeln die Kreislaufwirtschaft.

Trennverfahren zur Kupferentfernung

Die Fähigkeit, hochwertigere Stahlprodukte aus recyceltem Material ohne Kupfer herzustellen, stärkt die Unabhängigkeit von Rohstoffimporten und erhöht die Ressourceneffizienz. Mit innovativer Extraktion von Kupfer als unerwünschtem Begleitelement könnten mehr als 70 Prozent des heutigen Stahlbedarfs technisch durch recycelten Stahl gedeckt werden.²⁷ In Deutschland enthält Automobilschrott zunehmend höhere Mengen an Kupfer (0,2 Massenprozent), was auf die wachsende Elektromobilität zurückzuführen ist.²⁸

Die aktuellen Verfahren zur Kupferentfernung können zwar prinzipiell Kupfer aus recyceltem Stahl entfernen, ihr Skalierungspotenzial aber ist durch hohe technische und ökonomische Herausforderungen eingeschränkt.²⁹ Einige Verfahren wie die Vakuum-entgasung oder Vakuumschmelzöfen werden zum Beispiel bereits in hochreinen Stahlsektoren (bspw. Luft- und Raumfahrt) genutzt, sind jedoch aufgrund ihres hohen Energiebedarfs (300 bis 2.000 Kilowattstunden pro Tonne) für den Massenmarkt unrentabel und erzielen nur mäßige Wirkung.

Deshalb braucht es neue Ansätze für bessere Trennung. Verfahren wie die Laugung bei Umgebungstemperatur zur Entfernung von Kupferverunreinigungen befinden sich noch in einer frühen Entwicklungsphase, gelten aber aufgrund ihres geringen Energiebedarfs (null bis 20 Kilowattstunden pro Tonne) und ihrer hohen Effektivität (bis zu 80 Prozent) als vielversprechend.

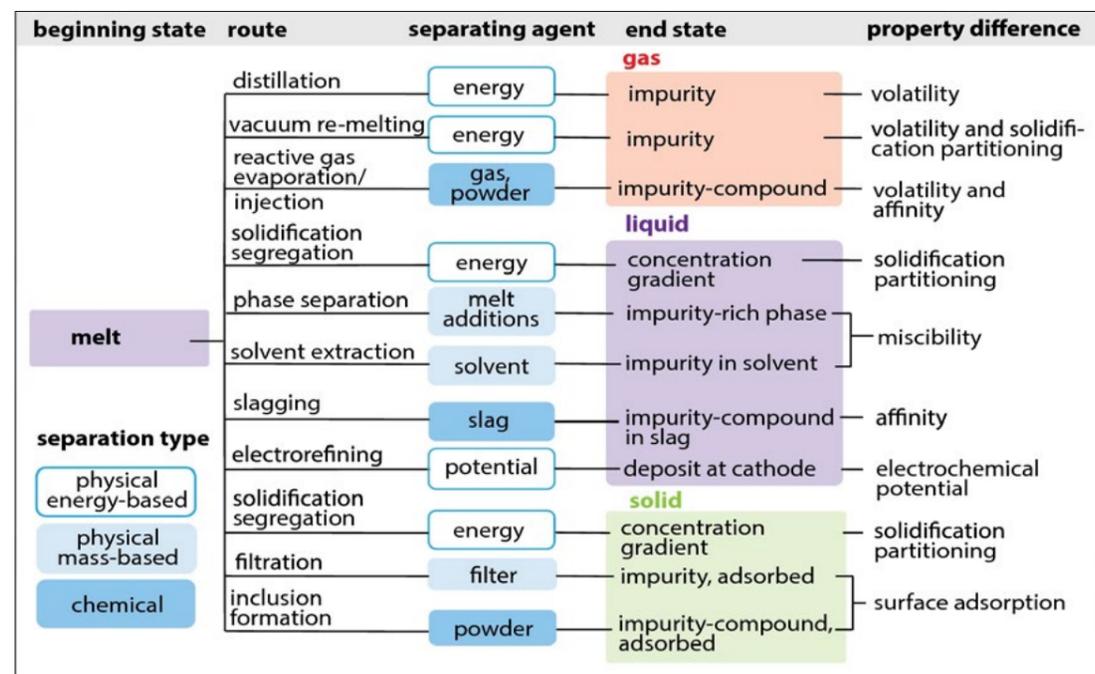


Abbildung 4: Wege zur Entfernung der Verunreinigung aus der Stahlschrottschmelze;

© CC-BY-4.0/Kathrin E. Daehn et al./Springer Nature/https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-019-01537-9

27 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

28 Dworak, S. et al. (2023): Stahlrecycling – Potenziale und Herausforderungen für innovatives und nachhaltiges Recycling. Österr. Wasser- und Abfallw. 75, 97–107. https://doi.org/10.1007/s00506-022-00903-3

29 Brahmer-Lothss M. et al. (2023): Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg. Erkenntnisse – Erfahrungen – praktische Erfolge.

| Technologien | | Effektivität ³⁰ | Energiebedarf | TRL |
|--|---|----------------------------|----------------------|-----|
| Vakuum-entgasung | Durch stark reduzierten Druck im Stahlbad verdampfen unerwünschte Elemente wie Kupfer oder andere Verunreinigungen. | 0–25 % ▼ | 200–300 kWh/t ▶ | 11 |
| Vakuum-schmelzofen (VAR) | Metall wird unter Vakuum erneut geschmolzen, wodurch Verunreinigungen verdampfen oder oxidiert werden können. | 25–50 % ▶ | 300–2.000 kWh/t ▼ | 11 |
| Mehrfacher Vakuum-schmelzofen | Mehrfaches Umschmelzen im Vakuum verbessert die Reinheit des Metalls weiter und entfernt schwer flüchtige Elemente wie Kupfer effektiver. | 50–80 % | 300–2.000 kWh/t | 11 |
| Laugung bei Umgebungstemperatur | Kupfer wird mithilfe chemischer Lösungen aus dem Schrott gelöst, ohne hohen Energieeinsatz. | 50–80 % | 0–20 kWh/t | 4-5 |

Kostenvorteile der Technologie

- ▶ Eine effektivere Nutzung von recyceltem Stahlschrott reduziert den Bedarf an Primärrohstoffen und senkt somit den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen, was zu einer nachhaltigeren Produktion beiträgt.

Internationale Wettbewerbsvorteile

- ▶ Die Fähigkeit, hochwertigere Stahlprodukte aus recyceltem Material herzustellen, stärkt die Unabhängigkeit von Rohstoffimporten und erhöht die Ressourceneffizienz.
- ▶ Verfahren zur Kupferentfernung würden es Stahlproduzenten ermöglichen, den Kupfergehalt im recycelten Stahl deutlich zu reduzieren – was zu einer verbesserten Materialqualität, höheren Recyclingquoten und geringeren Ausschussraten führt.
- ▶ Weitere ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen

Ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen

- ▶ Die Laugung erfordert chemische Lösungsmittel, die umweltbelastend sein können.

Projektbeispiele

- ▶ Die genannten Technologien zur Kupferentfernung befinden sich entweder noch in der Forschungsphase oder werden in anderen Industriezweigen genutzt (z. B. Luft- und Raumfahrt), jedoch nicht speziell zur Kupferentfernung in der Massenproduktion von recyceltem Stahl.

30 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

Barrieren und mögliche Maßnahmen

- ▶ Die Anwendung von Kupferentfernungsverfahren wird vor allem durch folgende Aspekte gehemmt:
 - geringe technologiereife energieeffizienter Methoden
 - Unsicherheiten im strategischen Umgang mit Stahlschrott auf deutscher und internationaler Ebene – d. h. momentan exportiert Deutschland schwer zu sortierenden Stahlschrott für minderwertige Nutzung (z. B. im Tiefbau) im Ausland; der wirtschaftliche und Umwelt-Vorteil von besserer Sekundärstahlnutzung im Inland muss weiter mit Daten unterfüttert werden.
- ▶ Maßnahmen umfassen:
 - Förderung von Pilotanlagen zur Optimierung der Verfahren, um eine höhere Marktreife zu erlangen
 - Anreize zum zirkulären Design, d. h. weniger Stahlverschmutzung mit Kupfer und anderen Stoffen, z. B. durch erweiterte Herstellerverantwortung, z. B. durch ein Pfandsystem

Legende: ▲ Starker Vorteil, ▶ mittlerer Vorteil, ▼ geringer Vorteil oder Nachteil

Herstellung von grünem Stahl durch H₂-DRI-EAF



Abbildung 5: Elektrolichtbogenofen (EAF) (Fotos sind illustrativ und bedeuten keine Unterstützung bestimmter Unternehmen oder Standorte); © SMS group GmbH

Elektrolichtbogenöfen (EAF) ermöglichen eine nahezu emissionsfreie Stahlproduktion, sofern erneuerbarer Strom genutzt wird, mit bis zu 100 Prozent Schrotanteil. In Kombination mit der wasserstoffbasierten Direktreduktion von Eisenerz (H₂-DRI) kann auch Primärstahl nahezu CO₂-frei produziert werden, wodurch eine klimafreundliche Alternative zur Hochofenroute entsteht. Der Produktionsprozess reduziert den Bedarf an Wasser und fossilen Energieträgern, steigert Ressourceneffizienz und senkt Emissionen um bis zu 94 Prozent gegenüber der Hochofenroute.³¹

Bestehende EAFs sind in Deutschland an ihrer Kapazitätsgrenze und sollten weiter ausgebaut werden. Deutschlands Schrottaufkommen steigt von 19 auf 25 Millionen Tonnen bis 2040 – eine Nutzung des hochqualitativen Schrotts würde eine Verdopplung der bestehenden EAF-Anlagen in Deutschland erfordern.^{32, 33} Der Kapazitätsausbau muss unter Berücksichtigung von Standortfaktoren bestimmt werden.

| Technologie | | TRL | R-Strategie |
|--------------------------|--|-----|----------------------|
| H₂-DRI | Eisenerz wird mit grünem Wasserstoff (H ₂) statt Kohlenstoff zu Eisenschwamm (DRI) reduziert, wobei Wasser statt CO ₂ entsteht. Abhängig von hochwertigem Erz und Wasserstoffpreis. | 8 | Reduce ³⁴ |
| EAF | Schmilzt Stahlschrott und DRI mittels starker Lichtbögen, um Rohstahl herzustellen. ³⁵ | 11 | Reduce/ Recycle |

Betriebskostenvorteile der Technologie

- ▶ OPEX-Parität von H₂-DRI-EAF mit Hochofenroute bis 2030er Jahren wegen steigender CO₂-Preise möglich

Internationale Wettbewerbsvorteile

- ▶ Stärkung der heimischen Stahlwirtschaft:
 - Obwohl die Herstellung von Stahl-(vor-)produkten auch in anderen (EU-)Ländern stattfinden könnte³⁶, macht Deutschlands steigender Bedarf nach Niedrig-Emissions-Stahl eine heimische Produktion vorteilhaft – auch für lokale Jobs.³⁷
 - Eine starke Schrottwirtschaft sichert wettbewerbsfähigen, CO₂-armen Stahl für Industriebranchen wie Automobil, Maschinenbau und Bauwesen.³⁸
- ▶ Rohstoffsicherheit und Flexibilität:
 - EAF ermöglicht eine flexible Mischung aus Schrott, Roheisen und DRI, um auf Rohstoffpreise und Verfügbarkeiten dynamisch zu reagieren.

31 Oliver Wyman, IW Consult im Auftrag der Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024): Die Stahlindustrie am Scheidepunkt. Wegbereiter für Transformation und gesamtwirtschaftliche Resilienz, online verfügbar [hier](#).

32 Systemiq-Analyse, basierend auf der Veröffentlichung der Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024).

33 Piégsa, A. et al. (Wuppertal Institut und Prognos) (2022): Gutachten: Optionen für eine klimaneutrale und nachhaltige Grundstoffindustrie in Deutschland

34 Reduziert nur Emissionen, keine Primärproduktion.

35 Piégsa, A. et al. (Wuppertal Institut und Prognos) (2022)

36 In der grünen Stahlwertschöpfungskette kann DRI zu Hot Briquetted Iron (HBI), dt. Eisenschwammbricketts kompaktiert und somit leicht transportierbar gemacht werden.

37 Verpoort et al. (2024): Report: Transformation der energieintensiven Industrie – Wettbewerbsfähigkeit durch strukturelle Anpassung und grüne Importe, online verfügbar [hier](#).

38 Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024).

Ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen

- ▶ Hoher Energiebedarf muss aus erneuerbaren Energiequellen gesichert werden.
- ▶ Effiziente Nutzung von Prozessabfällen (z. B. EAF-Staub, der beim Schmelzen von Stahlschrott entsteht) erforderlich (im Vergleich entstehen in der Hochofenroute jedoch toxische Gase)³⁹

Illustrative Projektbeispiele

- ▶ **Stahl-Holding-Saar (SHS):** Im Rahmen der Power4Steel-Initiative plant SHS den Bau eines der weltweit leistungsstärksten Elektrolichtbogenöfen auf einem festgelegten Brownfield-Gebiet mit einer Anschlussleistung von 300 MVA⁴⁰ bis 2028 zur Verarbeitung einer flexiblen Mischung von bis zu 100 Prozent Schrott oder 80 Prozent Kaltem Eisenschwamm/Eisenschwammbricketts und 20 Prozent Schrott.^{41,42}
- ▶ **SMS group:** Die SMS group sorgt mit ihren Technologien dafür, dass EAFs effizient und netzfreundlich betrieben werden können. Beim neuen 190-Tonnen-EAF von SSAB hilft die SMS group, den hohen Strombedarf zu stabilisieren, Netzstörungen zu vermeiden und den Energieverbrauch optimal zu steuern.⁴³
- ▶ **thyssenkrupp:** SALCOS®-Stahl wird über zwei Routen produziert: die neue DRI-EAF-Route (ab 2026) und die bereits etablierte EAF-Route bei Peiner Träger, die 100 Prozent hochwertigen recycelten Stahlschrott und grünen Strom nutzt. Trotz des vollständigen Schrotteinsatzes erreicht der Stahl die erforderliche Reinheit für den Einsatz in der Automobilindustrie.

Barrieren und mögliche Maßnahmen

- ▶ Barrieren für den Ausbau von EAF-Kapazitäten in Deutschland oder der EU sind vor allem:
 - Die Unklarheit über eine resiliente Branchenstrategie, z. B. die Zukunftsfähigkeit der Verarbeitung von Stahl in Deutschland – oder sogar Europa – aufgrund von Energiepreisen⁴⁴. Während die Vorteile einer heimischen nachhaltigen Stahlindustrie wichtig sind, z. B. für die Resilienz, ist das Ausmaß des Bedarfs unklar.
 - Der wirtschaftlich attraktive Export hochwertigen Schrotts (60 Prozent aus Deutschland) reduziert momentan die inländische Verfügbarkeit.
 - Die inländische Nachfrage nach hochwertigem recycelten Stahl bleibt begrenzt, unter anderem, da es noch unklar ist, welche Mindestqualität Stahl im Fahrzeug- und Maschinenbau haben muss.
- ▶ Maßnahmen sind vor allem:
 - eine gezielte deutsche und europäische Analyse der perspektivischen strategischen/wirtschaftlichen Vorteile einer inländischen Schrottaufbereitung (Schrottaufbereitung ist derzeit teurer als Kauf von primären Rohstoffen) im Vergleich zum Export⁴⁵
 - darauf basierend eine standortspezifische Strategie für den EAF-Ausbau
 - politische – regulatorische und marktbasierende – Anreize zur verstärkten Schrottverwertung, z. B. (der Effekt von Instrumentenkombinationen muss gründlich analysiert werden):
 - Limits für eingebetteten Kohlenstoffgehalt („embodied carbon“)
 - Regulierung von Schrottexporten⁴⁶
 - Mindestanforderungen für Recyclinganteile

39 Deutsche Rohstoffagentur (2024): Factsheet Eisen, online verfügbar [hier](#).

40 MVA steht für „Megavoltampere“.

41 Stahleisen.de (14.10.2024): Leistungsstarker Elektrolichtbogenofen für die Stahl-Holding Saar, online verfügbar [hier](#).

42 Abhängig von den erneuerbaren Energiekosten ist eine Produktion von DRI sowohl in Deutschland als auch im (europäischen) Ausland denkbar.

43 SMS group (26.11.2024): SMS group und SSAB treiben gemeinsam grüne Stahlrevolution an, online verfügbar [hier](#).

44 Verpoort, P. C. et al. (2024): Transformation der energieintensiven Industrie – Wettbewerbsfähigkeit durch strukturelle Anpassung und grüne Importe, Kopernikus-Projekt Ariadne, online verfügbar [hier](#).

45 Leitner, M. (24.9.2024): Stahlrecycling: Herausforderungen und Lösungen. Wissenschaftsforum Circular Economy, online verfügbar [hier](#).

46 Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024): Stellungnahme zum Clean Industrial Deal, online verfügbar [hier](#).

2. Kreislaufwirtschaft in der Zementindustrie: Wichtigste Hebel, Umweltpotenziale und Technologien



Zirkuläre Technologiefelder und ihre Potenziale

Der Zement- und Betonsektor verursacht in Deutschland etwa 20 Millionen Tonnen CO₂e, was 2,5 Prozent der gesamten nationalen Emissionen entspricht.⁴⁷ Etwa zwei Drittel entfallen auf rohstoffbedingte Prozess-emissionen und ein Drittel auf Brennstoffemissionen durch den hohen Wärmebedarf. 88 Prozent der Betonemissionen stammen aus Klinker, der hauptsächlich durch CCU/S und Ersatzmaterialien reduziert werden kann.⁴⁸ Die Zementproduktion bleibt aufgrund ihrer lokalen Ausrichtung und geringen Handelsströme in Deutschland verankert. Daher müssen Emissionsminderungshebel gezielt hierzulande greifen.

Hebel der Kreislaufwirtschaft können und müssen entlang aller Wertschöpfungsstufen genutzt werden, parallel zur Elektrifizierung und zu CCU/S. Elektrische Drehöfen können zwar Brennstoffemissionen reduzieren, doch nur langsam, und die prozessbedingten Emissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins bleiben bestehen. Kreislaufwirtschaftshebel können insgesamt bis zu mehr als 65 Prozent der Zementemissionen reduzieren (entspricht bis 2045 etwa 13 Millionen Tonnen CO₂e im Vergleich zum BAU-Szenario), Elektrifizierung und CCUS hingegen nur 30 Prozent. Die wichtigsten Kreislaufwirtschafts-hebel sind ein optimierter und alternativer Materialeinsatz sowie eine gesteigerte Materialeffizienz.

- ▶ Materialeffizienzgewinne im Einsatz von Beton liegen im modularen Bau, und intelligenten Design und in Bauprozessen und haben bis zu 35 Prozent Emissionsreduktionspotenzial.⁴⁹
- ▶ Der Einsatz optimierter, alternativer Materialien umfasst die Verwendung im Bau wie auch in der Betonherstellung selbst, d. h. alternative Bindemittel (SCMs), Recyclingzement, Betonzusatzstoffe oder neue Rezepturen. Dieser Hebel hat mich zu 30 Prozent Emissionseinsparpotenzial.⁵⁰

Deshalb ist es sowohl aus Umwelt- als auch aus wirtschaftlichen Gründen besonders wichtig, Technologien, die die Materialeffizienz bei Bau und Substitution in der Betonherstellung ermöglichen, zu fördern und genauer zu erforschen. Die Marktanalyse zeigt, dass die folgenden Technologien ein hohes Potenzial zur Emissionsreduktion und wirtschaftlichen Anwendung in Deutschland haben:

- ▶ Materialeffizienz durch schlanke Fertigteile im Bau, in Kombination mit digitaler Effizienzoptimierung
- ▶ Kalzinierter Ton⁵¹ als alternatives Material, das den Bedarf an Zementklinker und Emissionen reduziert

47 Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2023): Klimaschutz, online verfügbar [hier](#).

48 Mission Possible Partnership (2023): MAKING NET-ZERO CONCRETE AND CEMENT POSSIBLE. An industry-backed, 1,5°C-aligned transition strategy, online verfügbar [hier](#).

49 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

50 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

51 Nicht nur kalzinierter Ton, sondern auch Kalksteinmehl in Kombination kann verwendet werden.

Wichtige Kreislaufwirtschaftstechnologien

Fertigteile/Vorfertigung/vorgefertigte Einheiten in Kombination mit digitaler Effizienzoptimierung



Abbildung 6: Hybrider, effizienter und digital optimierter Fertigteilbau⁵²; © GROPYUS AG

Durch materialeffizientes Design und Modul-Vorfertigung kann der Materialbedarf im Bau in Europa um 250 Millionen Tonnen gesenkt und können CO₂-Emissionen deutlich reduziert werden.⁵³ Fertigteilbau ist nicht automatisch materialeffizienter als traditioneller Bau, aber kann insbesondere mit digitaler Planung verlässlicher optimiert werden.

Der Einsatz vorgegossener Elemente ermöglicht mehr Standardisierung, beschleunigt den Bau und senkt die Kosten um bis zu 20 Prozent.⁵⁴

Die Kombination aus Fertigteilbau und digitalen Lösungen wie „Building Information Modelling“ kann Deutschland trotz begrenzter Arbeitskräfte helfen, das Ziel von 400.000 neuen Wohnungen pro Jahr zu erreichen.

52 O. V. (2024): GROPYUS secures €100M (AU\$167M) for sustainable modular housing development. BUILT OFFSITE (11.10.2024), online verfügbar [hier](#).

53 Ellen MacArthur Foundation (2024): Building prosperity, online verfügbar [hier](#).

54 Ebd.

Während modulares Bauen in Deutschland bisher vor allem für kleinere Gebäude wie Einfamilienhäuser und Büros genutzt wird, wächst das Potenzial für größere Wohnkomplexe. Der heutige Anteil der Modulbauweise liegt bei ca. fünf Prozent, aber hat mit den richtigen Rahmenbedingungen großes Potenzial. In Schweden beispielsweise liegt der Anteil bei 60 Prozent.⁵⁵

| Technologie | | TRL | R-Strategie |
|----------------------|--|-----|-------------|
| Fertigteilbau | Die Vorproduktion (Prefabrication) bezeichnet die Montage von strukturellen Bauelementen (aus Mineralien oder Holz) in einer kontrollierten Umgebung bspw. mittels 3D-Druck oder Robotik außerhalb der Baustelle. Die vormontierte Struktur wird anschließend zur Baustelle transportiert und dort fertiggestellt, wodurch Staub- und Lärmbelästigung vor Ort reduziert werden. ⁵⁶ Zudem können einzelne Module je nach Konzept rückgebaut und wiederverwendet werden. Modulare Bausysteme sind eine Unterkategorie des Fertigbaus. | 9 | Reduce |
| BIM | Building Information Modelling (BIM) ist eine digitale Methode zur Planung, Konstruktion und Verwaltung von Gebäuden und Infrastrukturen. BIM unterstützt dabei die industrielle Vorfertigung. | 9 | Reduce |

Kostenvorteile der Technologie

- ▶ Reduzierung der Materialkauf- und Installationskosten um bis zu 50 Prozent im Vergleich zur traditionellen Bauweise. Kosten für Baumaterialien, beispielsweise für Betonstahl in Stäben, sind in den letzten drei Jahren um 42 Prozent gestiegen, sodass materialsparende Methoden volkswirtschaftlich vorteilhaft sind.⁵⁷
- ▶ Erhebliche Verkürzung der Bauzeiten
- ▶ Vorgefertigte Bauteile sind passgenau aufeinander abgestimmt und ermöglichen eine höhere Präzision als der wetterabhängige Bau vor Ort.

Weitere wirtschaftliche Vorteile

- ▶ Deutschlands Wohlstand wird von der Wohnungskrise beeinträchtigt. Der Bedarf an Neubauten wird deutschlandweit bis 2030 auf mindestens 330.000 Wohnungen pro Jahr geschätzt und wird zurzeit nur langsam bedient. Ein effizienterer Hausbau kann dem Wohnungsmangel schneller entgegenwirken.
- ▶ Die Kosten von Baumaterialien sind seit 2000 um etwa 90 Prozent gestiegen.⁵⁸ Eine effizientere Bauweise ist essenziell für wirtschaftliche Resilienz und Produktivität.

55 Deutscher Bundestag (2023): Sachstand Serielles und modulares Bauen im Gebäudesektor, online verfügbar [hier](#).

56 IEA (2024): ETP Clean Energy Technology Guide, online verfügbar [hier](#).

57 Bauindustrie (o. D.): Bauwirtschaft im Zahlenbild, online verfügbar [hier](#).

58 Trading Economics (2024): Germany - construction cost index, online verfügbar [hier](#). Statista (2025): Construction price index in Germany from 2015 to 2024, by type, online verfügbar [hier](#).

Ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen

- ▶ Fertigteilbau ist nicht automatisch nachhaltiger oder effizienter. Hersteller müssen sorgfältig geprüft werden.
- ▶ BIM, wie jede ausgefeilte und KI-unterstützte digitale Technologie, verbraucht große Mengen Strom. Dieser muss aus erneuerbaren Quellen geliefert werden; der Energieeinsatz lohnt sich nur bei signifikanten Einsparungspotenzialen (ansonsten sind effiziente Low-Tech-Bauweisen lohnender).
- ▶ Ein höherer Holzanteil bringt bei nachhaltiger Produktion und Nutzungsmenge im Rahmen des regenerativen Waldpotenzials große Vorteile, kann aber bei unregulierter Beschaffung für Ökosysteme schädlich sein. Weitere Studien sind notwendig, um die maximale regenerative Holzverfügbarkeit in Deutschland und Europa festzustellen.

Projektbeispiele

- ▶ **Bau-Fritz:** Das Allgäuer Unternehmen setzt auf vorgefertigte Holzbausysteme aus heimischem Fichtenholz und erreicht durch die Projekte der Firma jedes Jahr eine CO₂-Ersparnis von etwa 21.000 Tonnen CO₂. Die Firmengründerin wurde 2023 mit dem Deutschen Umweltpreis ausgezeichnet.⁵⁹
- ▶ **Polycare:** Das SEMBLA®-System ist ein modulares Bausystem auf Basis von zementfreiem Geopolymerbeton. Die standardisierten Hohlblocksteine lassen sich ohne Mörtel zusammensetzen, was eine schnelle Montage, flexible Anpassungen und Wiederverwendbarkeit ermöglicht. Durch den Verzicht auf Zement reduziert das System die CO₂-Emissionen um bis zu 70 Prozent und unterstützt die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen.⁶⁰
- ▶ **CREE:** Das österreichische Start-up entwickelt ein innovatives Holz-Hybrid-Vorfertigungssystem für flexible Bauwerke. Es reduziert graue Emissionen⁶¹ um bis zu 50 Prozent und steigert die Materialeffizienz durch Standardisierung. Zu den Vorzeigeprojekten zählen das Bürogebäude „EDGE Suedekreuz“ in Berlin (29 Meter, acht Stockwerke) und „LCT ONE“ in Dornbirn (27 Meter, acht Stockwerke).

59 Deutsche Bundesregierung (2023): Auszeichnung für Klimaforscherin und Holzbau-Pionierin, online verfügbar [hier](#).

60 Padalkina, D. et al. (DENA) (2023): Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, online verfügbar [hier](#).

61 Graue Emissionen beziehen sich auf CO₂-Emissionen, die während des gesamten Lebenszyklus eines Baumaterials oder Gebäudes anfallen, aber nicht direkt aus dem Betrieb des Gebäudes stammen.

Barrieren & mögliche Maßnahmen

- ▶ Die breitere Anwendung der Fertigbauweise wird vor allem durch folgende Faktoren gehemmt:
 - Insbesondere unter kleineren und individuellen Entwicklern herrscht eine Fehlwahrnehmung, dass der Fertigbau unästhetisch und unflexibel sei – geprägt von veralteten Modellen.
 - Größere Investoren schrecken vor der Abhängigkeit von wenigen Anbietern zurück, aus Sorge vor Preis- und Lieferengpässen.
 - Investoren scheuen ebenso die Zeitleiste von Fertigbau, d. h. dass sie sich früh auf Modelle festlegen müssen, die nachträglich wenig Anpassungen erlauben – viele Gründe in dieser Wahrnehmung sind veraltet.
 - Fertigbau benötigt große industrielle Fertigungsanlagen, die eine stabile Auslastung brauchen – dies ist schwierig in einem stark zyklischen Immobilienentwicklungsmarkt.
- ▶ Mögliche Maßnahmen sind unter anderem:
 - Embodied Carbon Limits können den klimafreundlicheren Fertigbau fördern.
 - Eine gezielte deutschland- und europaweite Studie, im Rahmen neuer Industrie- und Wettbewerbsstrategien, sollte Fehlwahrnehmungen zu Flexibilität und Risiken aufarbeiten.
 - Öffentliche Beschaffung muss als Nachfrageimpuls dienen, um industrielle Herstellungsanlagen mit stabilerer Auslastung ermöglichen, und muss als Vorreiter der Privatwirtschaft die Möglichkeiten aufzeigen.

Herstellung und Einsatz von kalziniertem Ton



Abbildung 7: Eröffnung der Flash-Kalzinator-Anlage in Weimar; © LAB Weimar gGmbH

Klinkersubstitute (SCM) senken Emissionen und verringern den Bedarf an Primärrohstoffen. Da 96 Prozent der SCM in Deutschland aus der Hochofenroute stammen und diese zurückgeht, sind neue Alternativen notwendig. Kalzinierter Ton dient als Klinkerersatz und kann die CO₂-Emissionen um bis zu 65 Prozent gegenüber Klinker reduzieren,⁶² da dieser Prozess bei deutlich niedrigeren Temperaturen abläuft und auch die Rohstoffe kein oder deutlich weniger CO₂ enthalten. Kalzinierter Ton ist in einigen Regionen Deutschlands reichlich vorhanden, erhöht somit die Rohstoffunabhängigkeit gegenüber Alternativen und unterstützt eine nachhaltigere Zementproduktion.

Unter optimalen Marktbedingungen könnte bei einer jährlichen Klinkerproduktion von ca. 20 Millionen Tonnen⁶³ in Deutschland ein Anteil von bis zu 50 Prozent – also rund zehn Millionen Tonnen – durch kalzinierten Ton als Klinkersubstitut ersetzt werden. Das hängt jedoch stark von den regulatorischen Rahmenbedingungen, Investitionen und dem Fortschreiten des Transformationsprozesses in der Zementindustrie ab.

| Technologie | TRL | R-Strategie |
|---|----------|---------------|
| Kalziniertes Ton Kalzinierter Ton entsteht durch das Erhitzen von Tonmineralien, wie Kaolinit, auf etwa 700 bis 900 °C. Dieser Prozess, bekannt als Kalzinierung, verändert die Struktur des Tons und verleiht ihm puzzolanische Eigenschaften, wodurch er als teilweiser Ersatz für Zementklinker in der Betonherstellung dient. | 9 | Reduce |

Kostenvorteile der Technologie

- ▶ Die Rohstoffkosten für kalzinierten Ton (fünf bis 20 Dollar pro Tonne) sind günstiger als andere Zusatzstoffe (Schlacke liegt bei 40 bis 55 Dollar pro Tonne, Flugasche bei 15 bis 30 Dollar pro Tonne).⁶⁴

Internationale Wettbewerbsvorteile

- ▶ Weltweit sind 6.000 Metertonnen pro Jahr kalziniertes Ton verfügbar, im Vergleich zu weniger als 1.000 Metertonnen pro Jahr für Flugasche und Schlacke. Deutschland (zukünftig eingeschränkte Verfügbarkeit) kann durch lokale Nutzung Importabhängigkeit reduzieren und sich resilienter gegenüber Marktschwankungen machen.⁶⁵
- ▶ Deutschland kann durch frühzeitige strategische Partnerschaften für kalzinierten Ton seine Rohstoff-sicherheit stärken, von bestehenden Handelsbeziehungen profitieren und sich in einem wachsenden Markt für Klinkerersatzstoffe frühzeitig positionieren.
- ▶ Die zunehmende Nutzung von Klinkersubstituten ist arbeitsintensiver als herkömmlicher Zement – sie könnte Beschäftigungsverluste durch CO₂-Abscheidung (ergibt sich aus dem Transformationspfad von Zement) und sinkende Produktion teilweise ausgleichen.⁶⁶

62 Padalkina, D. et al. (DENA) (2023).

63 Verband Deutscher Zementindustrie. Klinkereffiziente Zemente – ein wichtiger Baustein auf dem Weg zur Dekarbonisierung von Zement und Beton: Schritte zur weiteren Reduzierung des Klinker/Zement-Faktors, online verfügbar [hier](#).

64 ChemAnalyst (Q3 2024); GGBFS Price Trend and Forecast, online verfügbar [hier](#). ChemAnalyst (Q3 2024): Fly Ash Price Trend and Forecast, online verfügbar [hier](#). GCCA (2024); Global Blast Furnace Tracker (2024); IEA (2024); Scrivener (2019); UNEP (2016).

65 Maier M. und Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel (o. D.): Calcinierte Tone als Zementersatzstoff (SCM) im Mastermodul „Vertiefte Kapitel Anorganische Bindemittel und Betontechnologie“, online verfügbar [hier](#).

66 Wuppertal Institut (2022): Studie „Dekarbonisierung der industriellen Produktion (DekarBlnd) – Teilbericht 3: Bewertung von Dekarbonisierungsmaßnahmen und Erarbeitung von Eckpunkten einer Roadmap für die Zementindustrie“, online verfügbar [hier](#).

Ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen

- ▶ Kalzinierter Ton hat einen hohen Wasseranspruch im Vergleich zu anderen SCM (zwischen 40 und 70 Prozent) gegenüber Flugasche (24 Prozent).⁶⁷

Projektbeispiele

- ▶ **Das Institut für Angewandte Bauforschung (IAB) Weimar** hat 2024 eine weltweit erste Pilotanlage (den Flash Kalzinator) zur effizienten Kalzinierung von Ton unter sauerstoffarmer Atmosphäre gestartet. Ein besonderes Feature ist die Farbkontrolle, die die typische Rotfärbung vermeidet und den Einsatz in Beton erleichtert.⁶⁸
- ▶ **Thyssenkrupp** hat die „polysius® activated clay“-Technologie entwickelt, die es ermöglicht, bis zu 30 Prozent des Zementklinkers durch kalzinierten Ton zu ersetzen, wodurch die prozessbedingten CO₂-Emissionen um bis zu 40 Prozent reduziert werden können. Ein Beispiel für die Anwendung dieser Technologie ist das Werk von CIMPOR Global Holdings in Kamerun, das jährlich über 120.000 Tonnen CO₂ einspart.⁶⁹
- ▶ Das Berliner Start-up **alcemy** entwickelt KI-Software zur präzisen Steuerung der Qualität von kalziniertem Ton als Zementersatz, was eine CO₂-Reduktion um bis zu 65 Prozent ermöglicht. In Zusammenarbeit mit alcemy wurde bereits ein CO₂-armer Zement mit reduziertem Klinkeranteil kommerziell produziert.⁷⁰

Barrieren & mögliche Maßnahmen

- ▶ Der verstärkte Einsatz von kalziniertem Ton als Klinkersubstitut wird insbesondere gehemmt durch:
 - mangelnde Erfahrung in der Industrie und im Bausektor mit neuen Zementmischungen
 - hohe Bauzulassungsnormen und Standards (erlaubter Klinkeranteil am Zement max. 44 Prozent). Die wesentlichen regulatorischen Hürden liegen in bestehenden Normen wie der DIN EN 1971 und der Bauproduktenverordnung (BauPVO), die traditionell auf die Zusammensetzung von Portlandzement ausgerichtet sind.
 - konservative Auslegungen in Baustandards (z. B. Eurocode 2)
 - fehlende Langzeitdaten und langwierige Zulassungsverfahren
- ▶ Verschiedene Maßnahmen sind denkbar:
 - Industrieallianzen für den Wissenstransfer zwischen Lieferanten, Bauunternehmen und Ready-Mix-Firmen
 - digitale Qualitätssicherungssysteme, um Unsicherheiten bei neuen Zementmischungen zu reduzieren – privat, z. B. von Industrieverbänden getrieben, oder staatlich getrieben
 - Normanpassungen zur Erhöhung des SCM-Anteils, auf Bundes- und Landesebene sowie europäisch
 - Einführung von Embodied Carbon Limits

67 Ebd.

68 Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH (o. D.), online verfügbar [hier](#).

69 Thyssenkrupp (o. D.): Zementproduktion: Kalzinierter Ton senkt CO₂-Fußabdruck deutlich, online verfügbar [hier](#).

70 Alcemy GmbH (o. D.): Unternehmenswebsite.

3. Kreislaufwirtschaft in der Chemieindustrie: wichtigste Hebel, Umweltpotenziale und Technologien



Zirkuläre Technologiefelder und ihre Potenziale

Die Chemieindustrie hat einen extrem hohen Energiebedarf. In 2021 verursachte sie etwa vier Prozent der deutschen CO₂-Emissionen⁷¹, und ihr Endenergieverbrauch macht rund ein Viertel des gesamten industriellen Energiebedarfs aus, was sie zum energieintensivsten Sektor in Deutschland macht.⁷²

Steigende Energiepreise, CO₂-Reduktionsvorgaben u. a. aus dem deutschen Klimaschutzgesetz⁷³ und die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen setzen die Branche unter wirtschaftlichen Druck. Gleichzeitig eröffnet die wachsende Nachfrage für nachhaltige Chemieprodukte weltweit attraktive Wachstumspotenziale, die als Chance für einen Wandel dienen können.

Eine klimaneutrale Chemieindustrie bis 2045, wie im deutschen Klimaschutzgesetz gefordert, verlangt sowohl die Elektrifizierung des Energieverbrauchs (v. a. in der Wärmebereitstellung) als auch Kreislaufwirtschaftstechnologien. Durch effizientere Materialnutzung, höherwertiges Kunststoffrecycling und den Einsatz erneuerbarer Kohlenstoffquellen kann die Branche unabhängiger von fossilen Rohstoffen werden.⁷⁴

Rund 20 Prozent des Energie- und Rohstoffverbrauchs der Chemiebranche entfallen allein auf die Produktion von Plastikverpackungen, der größte Nachfragesektor nach Basischemikalien – das macht Optimierung in Vermeidung, Langlebigkeit, Wiederverwendung und Recycling hier besonders dringlich.⁷⁵ Verpackungs-Mehrwegmodelle könnten dabei der größte Hebel zur Reduzierung der Chemikaliennachfrage sein.⁷⁶

- Kreislaufwirtschaft in diesem Sektor braucht systemische Maßnahmen, vor allem in den verbrauchernahen Sektoren wie dem Lebensmittelhandel, z. B. in Form unverpackter Waren oder von Mehrwegverpackungen. Aber es braucht gleichzeitig einen besseren Technologieeinsatz, denn selbst in einem Szenario mit reduziertem Verpackungsaufkommen wird weiterhin eine signifikante Menge Kunststoffabfall anfallen – weshalb eine funktionierende Technologie zur Sortierung und zum Recycling entscheidend ist.

- In den Kunststoffwertschöpfungsketten für Verpackungen, Gebäude und Fahrzeuge können Kreislaufwirtschaftstechnologien die Emissionen bis 2045 um 40 bis 60 Prozent gegenüber 2020 reduzieren.⁷⁷ Unter den Technologien bietet besonders das Kunststoffrecycling Dekarbonisierungspotenzial, da die meisten CO₂-Emissionen durch die Verbrennung von Kunststoffen am Lebensende entstehen.

Da nicht alle Chemiewertschöpfungsketten ihre Effizienz- und Klimafreundlichkeit durch Vermeidungs- und Wiederverwendungshebel lösen können, müssen zusätzlich erneuerbare und zirkuläre Kohlenstoffquellen genutzt werden, um verbleibende fossile Rohstoffe in der Chemieindustrie zu ersetzen^{78, 79} – insbesondere für essenzielle Grundchemikalien wie High-Value Chemicals (HVC)⁸⁰. Dabei sind drei zentrale Herausforderungen zu adressieren:

- Nachhaltige Rohstoffverfügbarkeit: Biogene Kohlenstoffquellen sind begrenzt und sollten nur unter strengen Nachhaltigkeitskriterien genutzt werden, um Flächenkonkurrenzen und Umweltauswirkungen zu minimieren.
- Technologische Machbarkeit: Carbon Capture and Utilization (CCU) kann Kohlenstoffnutzung ermöglichen – welche als zirkuläre Technologie im Gegensatz zu anderer Rohstoffnutzung angesehen werden kann. Die Technologie ist jedoch hochgradig energieintensiv und noch nicht wirtschaftlich skalierbar – die Technologie sollte nur sehr gezielt eingesetzt werden, wo andere Lösungen nicht greifen können.
- Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen: Trotz hoher Emissionsreduktionspotenziale fehlen regulatorische Leitplanken, um diese Technologien sicher und für besonders relevante und gerechtfertigte Anwendungen zu skalieren.

Forschung, gezielte Investitionen und politische Maßnahmen sind erforderlich, um zentrale Technologien wirtschaftlich tragfähig zu machen, eine nachhaltige Transformation der Chemieindustrie zu ermöglichen – und somit einen zentralen Wertschöpfungssektor und Arbeitgeber in Deutschland zu halten.

71 UBA (2024): Strukturdaten: Chemikalien und chemisch-pharmazeutische Industrie, online verfügbar [hier](#).

72 Ebd.

73 Sektorziel für die deutsche Industrie: CO₂-e-Reduktion auf max. 118 Mio t. CO₂-e bis 2030; Gesamtziel ist THG-Neutralität bis 2045.

74 BDI (2024): Transformationspfade für das Industrieland Deutschland, online verfügbar [hier](#).

75 BUND (2023): Deutsche Chemieindustrie größter fossiler Rohstoffverbraucher und Treiber der Plastikkrise, online verfügbar [hier](#).

76 Systemiq-Analyse für die Energy Transitions Commission (2025): Studie wird demnächst veröffentlicht.

77 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023); kumuliert haben die Zusatzstoffreduktion, Minimierung neuer Polymertypen, Erhöhung der Produkt-Trennbarkeit sowie Maximierung von Trennung und Sortierung das Potenzial, das mechanische Kunststoffrecycling innerhalb der Wertschöpfungsketten für Gebäude, Fahrzeuge und Verpackungen auf ca. 42 % zu steigern. Das entspricht einer Verringerung der Treibhausgasemissionen um zwölf Prozent bis 2045.

78 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

79 Es gibt verschiedenen Quellen alternativer Kohlenstoffe zur Herstellung von Chemikalien: biogenes CO₂ (langfristig begrenzt), Direct-Air-Capture-Technologien (DAC-Technologien) für Abscheidung aus der Luft (kostenintensiv) und Abscheidung von Industrieabgasen (langfristig begrenzt). Potenzial besteht u. a. besonders für die Industrien Chemie, Schifffahrt und Luftfahrt.

80 Für die nachhaltige Produktion von HVCs – Aromaten und Olefine – kommen die Grüne-Methanol-Route, die Grüne-Naphtha-Route sowie elektrochemische Prozesse in Frage, wobei letztere niedrige TRLs aufweisen.

Vier Technologien zeigen besonderes Potenzial, um wichtige Kreislaufwirtschaftshebel zu ermöglichen und die Wettbewerbsfähigkeit einer klimafreundlichen deutschen Chemieindustrie zu unterstützen:

1. Internet-of-Things-gestützte (IoT-gestützte) Verpackungssysteme zur Optimierung von Mehrwegverpackungen
2. intelligente Sortierverfahren zur Verbesserung des mechanischen Kunststoffrecyclings für die Bereitstellung nicht-fossiler Sekundärrohstoffe
3. chemisches Kunststoffrecycling zur Bereitstellung nicht-fossiler Sekundärrohstoffe für anderweitig nicht lösbare Stoffströme, komplementär zum mechanischen Recycling
4. Weiterverarbeitung von Methanol aus Verfahren der katalytischen Hydrierung als Ausgangsmaterial für Plattformchemikalien

Wichtige Kreislaufwirtschaftstechnologien

Wiederverwendungssysteme: IoT-gestützte Verpackungssysteme

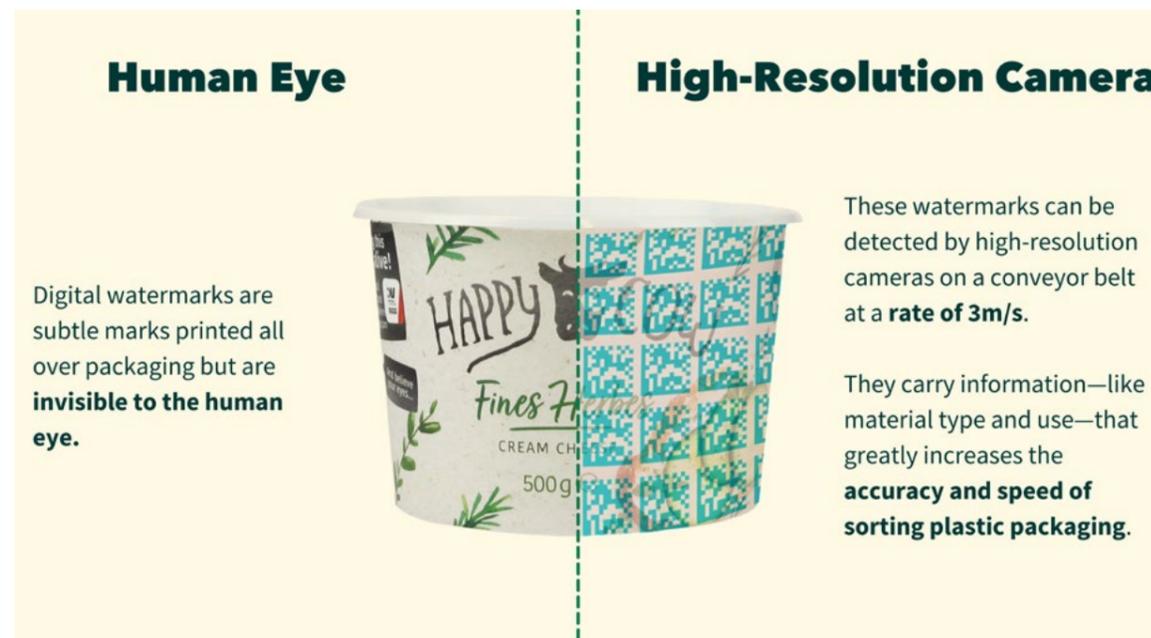


Abbildung 8: Digitale Wasserzeichen für intelligente Verpackungen⁸¹; © AIM, European Brands Association, and Alliance to End Plastic Waste

81 IQPAK® ist ein innovatives, mit dem Fraunhofer LBF entwickeltes Verpackungssystem, das Ein- und Mehrwegkomponenten materialminimalistisch kombiniert und den digitalen Produktpass integriert. Bildquelle: Fraunhofer LBF.

Wiederverwendungsmodelle können die globale Nachfrage nach Chemikalien bis 2050 in den wichtigsten Kunststoffwertschöpfungsketten – insbesondere für Verpackungen, aber auch Textilien und Automobil – um zwölf bis 20 Prozent senken.⁸²

Digitale Technologien wie Internet of Things (IoT)⁸³ können die Skalierung von Wiederverwendungssystemen durch Echtzeit-Tracking (Verlustreduktion, optimierte Rückführung), Zustandskontrolle (Sensordaten für Qualitätssicherung), Prozessautomatisierung (z. B. Reinigung, Rückgabe über digitale Tools) und Nutzer-Incentivierung (digitale Pfandsysteme, Apps zur Rückgabe) unterstützen.

IoT-Technologien wird industrie- und anwendungsübergreifend im Rahmen neuer globaler Zukunftsmärkte eine Marktgröße von insgesamt 0,8 Billionen Euro bis 2030 prognostiziert.⁸⁴

| Technologie | TRL | R-Strategie |
|---|--------------------|-------------|
| IoT-gestützte Verpackungssysteme <ul style="list-style-type: none"> ▶ Erhebung von Daten zur Echtzeitverfolgung, Nutzung und Zustandsüberwachung von Verpackungen in Wiederverwendungssystemen durch Technologien wie RFID, GPS, Near Field Communication (NFC), digitale Wasserzeichen⁸⁵, QR-Codes und Sensoren ▶ Datenbereitstellung und (teils KI-gestützte) -analyse auf IoT-Datenplattformen und/oder Apps | 9–11 ⁸⁶ | Reuse |
| Kostenvorteile der Technologie <ul style="list-style-type: none"> ▶ Kostenreduktion von Wiederverwendungssystemen durch Digitalisierung und Vereinfachung von Prozessen (z. B. Logistik- und Pfandmanagement, Reinigung, Rückgabe) sowie Verlängerung der Lebensdauer von Produkten im System – perspektivisch kostengünstiger als Einwegverpackungen, wenn skaliert⁸⁷ ▶ Mögliche Reduktion von EPR-Kosten⁸⁸ für Unternehmen, da Mehrweglösungen von EPR-Kosten ausgenommen sind. Ein Unternehmen, das beispielsweise jährlich 1.000 Tonnen Einweg-Plastikverpackungen auf den deutschen Markt bringt, könnte bei Umstellung von 20 Prozent seiner Verpackungen auf Mehrweg und einer durchschnittlichen EPR-Gebühr von 0,50 Euro pro Kilogramm jährlich 100.000 Euro EPR-Gebühren einsparen (es bleibt zu analysieren, inwieweit diese Einsparungen die IoT-Einsatzkosten übersteigen). | | |

82 Systemiq-Analyse für die Energy Transition Commission (Publikation fortfolgend).

83 Vernetzung und Digitalisierung von Objekten für Datenaustausch und -analyse.

84 BDI (2024): Transformationspfade für das Industrieland Deutschland, online verfügbar [hier](#).

85 Digitale Wasserzeichen sind maschinenlesbare Codes, die in Verpackungsmaterialien eingebettet sind, durch optische Scanner oder Kameras erkannt werden können und eine präzisere Sortierung im Recyclingprozess oder eine verbesserte Produktverfolgung ermöglichen.

86 Während GPS, RFID oder NFC bereits vollständig im kommerziellen Einsatz sind, befinden sich z. B. Cloud-basierte IoT-Plattformen parallel zum kommerziellen Einsatz noch in der weiteren wertschöpfungskettenübergreifenden Standardisierung.

87 Systemiq-Analyse für die Energy Transition Commission (Publikation fortfolgend).

88 EPR (Extended Producer Responsibility/Erweiterte Produzentenverantwortung) beschreibt die Verpflichtung von Herstellern und Inverkehrbringern von Verpackungen, die Kosten für Sammlung, Sortierung und Recycling ihrer Produkte zu tragen.

Internationale Wettbewerbsvorteile

- ▶ Unterstützung der Skalierung von Wiederverwendungssystemen und dazugehöriger Infrastruktur (u. a. Reinigung, Logistik), womit Arbeitsplätze in der gesamten Wiederverwendungs-Wertschöpfungskette geschaffen und ein künftiger Reuse-Markt in Deutschland und Europa aufgebaut wird.
- ▶ Der Einsatz von Mehrwegsystemen unterstützt die Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen (z. B. Naphtha).

Ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen

- ▶ Nutzungseffizienz: Nur bei hohen Umlauffzahlen sind Mehrwegbehälter ökologisch vorteilhaft.
- ▶ Transportemissionen: Lange Wege und geringe Rückgabequoten reduzieren Umweltvorteile, optimierte Logistik ist essenziell.
- ▶ Energieverbrauch: Digitalisierung und Reinigungssysteme müssen mit erneuerbarer Energie betrieben werden.
- ▶ Design & Betrieb: Standardisierte Poolbehälter, minimale Einwegbestandteile, effiziente Reinigung, kurze Transportwege und hohe Recyclingfähigkeit sind entscheidend.

Projektbeispiele

- ▶ **VYTAL** trackt seine Food-Take-out-Boxen mit QR-Codes und RFID-Chips und testet smarte Technologien für Reinigung und Rückgabe. Das Start-up ist in über 17 Ländern mit tausenden Restaurants und Kantinen aktiv. Im Juli 2024 erhielt es sechs Millionen Euro Funding zur Expansion digitaler Lösungen.⁸⁹
- ▶ **Algramo** bietet wiederbefüllbare Behälter mit RFID- oder NFC-Chips für Haushaltsprodukte in Chile und den USA an. Eine App ermöglicht Nutzer:innen das Tracking von Nachfüllvorgängen und Verpackungsmülleinsparungen. Das Unternehmen kooperiert u. a. mit Unilever.
- ▶ **HolyGrail 2.0** ist eine europäische Initiative zur verbesserten Sortierung von Verpackungsabfällen durch digitale Wasserzeichen. Rund 160 Unternehmen und Organisationen nehmen teil, darunter TOMRA, Procter & Gamble, Nestlé, Unilever, Henkel, Greiner Packaging, Mondi, Tetra Pak und BASF.

Barrieren & mögliche Maßnahmen

- ▶ Drei wesentliche Barrieren für eine breitflächige Anwendung digital unterstützter Verpackungssysteme sind unter anderem:
 - Die Kosten für Wiederverwendungssysteme sind noch unklar, da sie bisher nicht in großem Maßstab genutzt werden.
 - Einwegplastik ist oft günstiger, aber höhere Recyclinggebühren, CO₂-Abgaben oder gesetzliche Vorgaben könnten den Preisunterschied ausgleichen.
- ▶ Mögliche Maßnahmen:
 - Unternehmen können stärker zusammenarbeiten, um Mehrwegsysteme breitflächig einzuführen und kostengünstiger zu machen.
 - Ein CO₂-Preis würde Einwegverpackungen teurer machen und könnte Investitionen in Mehrwegsysteme anreizen.

Intelligente Sortierverfahren zur Verbesserung des mechanischen Recyclings

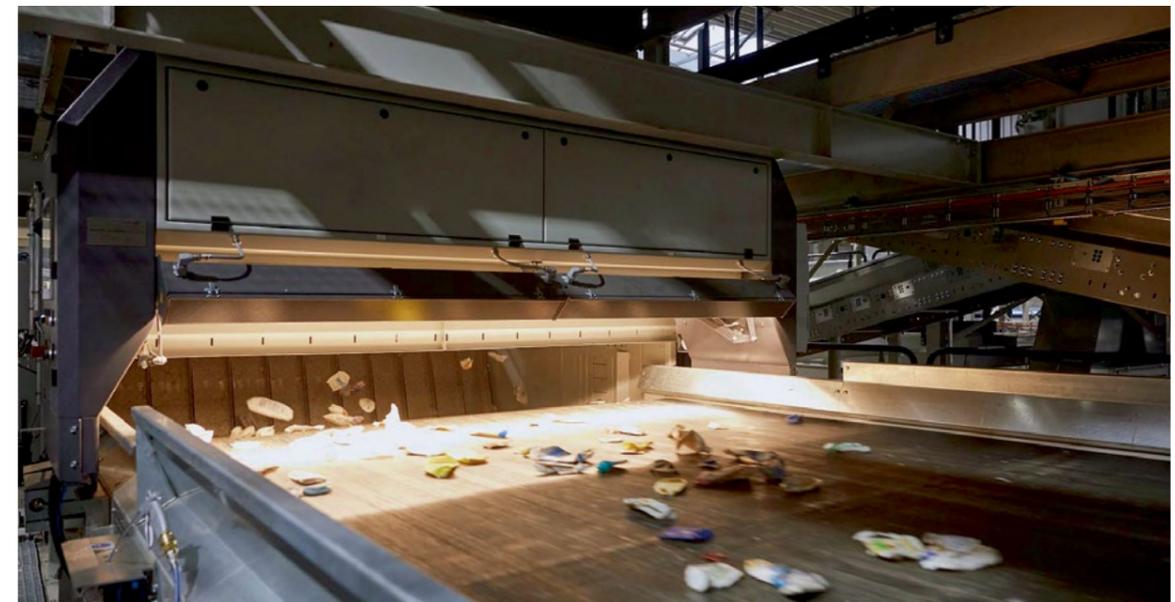


Abbildung 9: Beispiel einer modernen Sortieranlage, die Farb- und hyperspektrale Nahinfrarot-Sensorik (HSI-NIR) kombiniert⁹⁰; © REMONDIS

Mechanisches Recycling ist deutlich energie-, material- und kosteneffizienter als chemisches Recycling und nahezu emissionsfrei. Seine Maximierung sollte daher klar gegenüber dem chemischen Recycling priorisiert werden, um Kunststoffrecycling zu steigern. Weitere Umweltvorschriften und CO₂-Kosten stärken seine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber fossilen Kunststoffen.⁹¹

Mechanisches Recycling hat nach CCU-Technologien das zweitgrößte Potenzial zur Reduktion des primären Kohlenstoffbedarfs. Höhere Sortieraten sind dabei ein entscheidender Enabler, da sie die Recyclingausbeute steigern und das Gesamtpotenzial des mechanischen Recyclings weiter erhöhen könnten.⁹²

Technologien zur besseren Sortierung sind entscheidend, um das mechanische Recycling auszubauen. Durch eine etablierte Abfallsammlung und -sortierung hat Deutschland guten Zugang zu hochwertigem Rohstoff, sodass Fortschritte in Materialerkennung und -sortierung das Recyclingpotenzial um weitere bis zu 25 Prozent steigern könnten.⁹³

90 Bildquelle: F&S Journal (2023), online verfügbar [hier](#).

91 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

92 Systemiq-Analyse für die Energy Transition Commission (Publikation fortfolgend).

93 Ebd.

89 Packaging Europe (2024): Vytal directs €6 million in funding into data-driven reusables at events venues, online verfügbar [hier](#).

| Technologievarianten | | TRL | R-Strategie |
|---|--|------|--------------------------------|
| Elektrostatische Abscheidung | Lädt Kunststoffe je nach ihrer Zusammensetzung unterschiedlich auf und trennt sie mithilfe elektrischer Felder. | 8-10 | Recycle |
| Nahinfrarot-Sortierverfahren (NIR) | Verwendet Infrarotlicht, um Kunststofftypen anhand ihrer einzigartigen Spekttralsignatur zu identifizieren. | 9 | Recycle (Erkennung) |
| KI-basierte und robotergestützte Sortierverfahren | Verwendet maschinelles Lernen, Kameras/Sensoren und Roboterarme zur visuellen Erkennung und Sortierung von Kunststoffen nach Farbe, Form und Polymertyp. | 8-9 | Recycle (Erkennung & Trennung) |
| Schwimm-/Sink-Sortierverfahren | Trennt Kunststoffe aufgrund von Dichteunterschieden in Wasser oder Kochsalzlösungen – z. B. sinkt PET, während PE und PP schwimmen. | 11 | Recycle (Erkennung & Trennung) |
| Kostenvorteile der Technologie | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Reduziert die Abhängigkeit von fossilen Primärressourcen und kann somit perspektivisch die Preisstabilität von Kunststoffzyklen unterstützen. ▶ Mechanische Verfahren sind u. a. aufgrund einfacherer Prozesse und geringerer Energieintensität deutlich kostengünstiger als chemisches Recycling. | | | |
| Internationale Wettbewerbsvorteile | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Digitale Sortiertechnologien ermöglichen kosteneffizientere, skalierbare mechanische Recyclinginfrastruktur, die auch neue Arbeitsplätze in der gesamten Recyclingwertschöpfungskette schafft. ▶ Deutschland und Europa nehmen eine führende Rolle im globalen Markt für mechanische Recycling-Lösungen und Maschinen ein. Mit besserer Sortiertechnologie kann das Exportpotenzial dieses Know-hows weiter steigen. | | | |
| Ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Die Verkürzung der Polymerstruktur und Akkumulation von Verunreinigungen durch mechanisches Recycling begrenzt die Anzahl der Wiederverwertungen und das Kreislaufpotenzial.⁹⁴ ▶ Reduzierte Materialeigenschaften können die Funktionalität recycelter Kunststoffe einschränken, was den Einsatz in hochwertigen Anwendungen erschwert und potenziell zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch durch zusätzliche Materialmischungen oder Neuproduktion führt. ▶ Mechanische Recyclinganlagen können durch das Schreddern, Mahlen und Granulieren von Kunststoffen während des Recyclingprozesses Mikroplastik verursachen.⁹⁵ ▶ Hingegen ist der Energiebedarf digitalisierter Sortiersysteme vernachlässigbar gegenüber ihrem THG-Einsparpotenzial. | | | |

94 Uekert et al. (2023): Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11: 965-978.

95 Suzuki, G. et al. (2024): 2024: Global Discharge of Microplastics from Mechanical Recycling of Plastic Waste. Environmental Pollution, 348.

Projektbeispiele

- ▶ **Interzero** setzt Nahinfrarot-Sortierung (NIR) mit KI- und Sensortechnologie ein und steigert so die Sortiergenauigkeit in fünf Anlagen, die mehr als 800.000 Kubikmeter Leichtverpackungen pro Jahr verarbeiten – rund ein Drittel des deutschen Abfalls dieser Kategorie.
- ▶ **Greyparrot** integriert KI-basierte Echtzeit-Abfallanalyse in Sortieranlagen und verbessert so die Recyclingeffizienz. Mit mehr als 4.000 Installationen weltweit, u. a. durch die Partnerschaft mit Bollegraaf, liegt der Fokus auf Europa, mit erster Niederlassung in Nordamerika.
- ▶ **AMP Robotics** setzt KI-basierte Echtzeit-Abfallanalyse mit robotergestützter Sortierung ein und steigert so die Effizienz von Recyclinganlagen. Mit mehr als 300 Installationen weltweit liegt der Fokus auf Nordamerika, während die EU-Expansion über eine Partnerschaft mit REP-TEC und eigene Teams vorangetrieben wird.

Barrieren & Maßnahmen

- ▶ Barrieren zur Skalierung von Sortiertechnologien:
 - Derzeit ist der Output mechanischen Recyclings nicht preiskompetitiv gegenüber fossilem Neukunststoff.
 - Investitionen in neue Sortiertechnologien sind limitiert, sodass ihre weitere Skalierung und Preisminderung nicht voranschreitet.
- ▶ Mögliche Maßnahmen zur Förderung der Wettbewerbsfähigkeit und Stimulation von Investitionen:
 - eine Erhöhung des CO₂-Preises
 - ambitionierte Rezyklat-Quoten
 - CAPEX-Anreize – evtl. im Rahmen des EU Clean Industrial Deal oder Industriekredite z. B. von der KfW oder EIB⁹⁶

96 Angesichts der insgesamt bereits hohen technologischen Reife von Abfallerkennungs- und Sortiertechnologien wird erwartet, dass bestehendes Optimierungspotenzial im Rahmen erhöhter Investitionen gehebelt wird (z. B. Erhöhung der Anzahl erkannter Materialien sowie der Erkennungsgeschwindigkeiten und -genauigkeit).

Chemisches Recycling: Nischenlösung mit spezifischen Anwendungsfällen



Abbildung 10: Chemisches Recycling⁹⁷; © Fraunhofer UMSICHT

Chemisches Recycling zerlegt Kunststoffe in Monomere oder Basischemikalien und ermöglicht die Verwertung heterogener oder kontaminierter Abfälle (z. B. Textilien).^{98, 99}

Anwendungsbereiche, Effizienz und Umwelteinflüsse variieren stark je nach Verfahren. Unterschiede in verwertbaren Kunststoffen, Rohstoff-Anforderungen, Emissionen und Energieaufwand erfordern eine detaillierte Prüfung der ökologischen Auswirkungen.¹⁰⁰

Hohe Kosten, Energieverbrauch und Massenverluste begrenzen den Einsatz auf schwer recycelbare, multimaterielle oder sehr kleine Kunststoffabfallströme – vorrangig in den Branchen Textil, Bau, Automobil und Elektronik.¹⁰¹

Die chemische Industrie oder andere Sektoren mit hohem Dekarbonisierungsdruck könnten profitieren, sofern eine umfassende Umweltbewertung den Einsatz rechtfertigt.

| Technologie | Details | Rohstofftoleranz & Anwendungsbereich | Energieverbrauch gegenüber Neuware | TRL | R-Strategie |
|---|--|--|---|---------------------------|----------------|
| Lösungsmittelbasiertes Recycling | Lösungsmittelbasierter Reinigungsprozess, bei dem Kunststoffe in Polymere , Zusatzstoffe und Verunreinigungen getrennt werden ¹⁰² | Mittlere Rohstofftoleranz: für Kondensationspolymere geeignet (PET, PUR, PC, PA, PLA), nicht für Polyolefine | Vergleichbar gute Energiebilanz , da wenig weitere Verarbeitungsschritte | 8 | Recycle |
| Depolymerisation | Unter Einsatz verschiedener Kombinationen von Chemikalien, Lösungsmitteln und Wärme werden Polymere in Monomere oder kürzere Fragmente aufgespalten. ¹⁰³ | Eingeschränkte Rohstofftoleranz: nur für PET/Polyester, Polyurethane und Polyamide und Styropor geeignet ¹⁰⁴ | Vergleichbar bis geringer (Verarbeitungstemperaturen von 150–250°C bei PET, wenig weitere Verarbeitungsschritte) | 5–8 | Recycle |
| Pyrolyse | Erhitzung gemischter Kunststoffe unter Ausschluss von Sauerstoff, dabei Umwandlung von Polymeren u. a. in flüssiges Pyrolyseöl ^{105,106} | Mittlere Rohstofftoleranz ^{107:} nur für Polyolefine geeignet (v. a. PP, PE ¹⁰⁸) | Höher (Verarbeitungstemperaturen von 400–800°C, Energieverbrauch für weitere Verarbeitungsschritte) | 6–8 ¹⁰⁹ | Recycle |

102 Lösungsmittelbasiertes chemisches Recycling wird teils als mechanisches Recycling bezeichnet, da die chemische Zusammensetzung des Polymers während des gesamten Prozesses intakt bleibt.

103 Allerdings ergibt PET als einziger Kunststoff Sinn, da die Mengen an PA, PUR und PS sehr gering sind.

104 Anwendung bisher vor allem im Bereich sortenreiner Verpackungsabfallströme und in begrenztem Umfang für vorsortierte Ströme flexibler Kunststoffe aus der industriellen Anwendung; Anwendung für Styropor bisher nur sehr begrenzt; Rohstofftoleranz höher als im mechanischen Recycling.

105 Es entstehen auch nicht kondensierbare Gase und feste Rückstände.

106 Pyrolyseöl kann neben dem Einsatz für die Neuproduktion von Mono- und Polymeren (Kunststoff zu Kunststoff) auch für die Herstellung von Kraftstoffen wie Diesel, Benzin oder synthetisches Rohöl genutzt werden (Kunststoff zu Kraftstoff).

107 Toleranz gegenüber gemischten und verunreinigten Kunststoffen (z. B. Textilien) und organischen Rückständen, jedoch zugleich Intoleranz gegenüber Nicht-Kunststoffen (u. a. organische Stoffe, Metalle, Glas) und bestimmten Kunststoffen (PET, PVC – erzeugen schädliche Nebenprodukte).

108 Kommen vor allem für flexible Verpackungen zum Einsatz und in bisher limitiertem Umfang auch für Altreifen.

109 Viele Pilot- und Demonstrationsprojekte befinden sich auf TRL 7–8, darunter diejenigen von Plastic Energy und Agilyx. Eine vollständige Kommerzialisierung auf TRL 9 oder höher steht vor Herausforderungen wie z. B. der Sicherstellung ausreichender Rohstoffreinheit im großen Maßstab.

97 Bildquelle: Fraunhofer UMSICHT (o. D.), online verfügbar [hier](#).

98 Neben Kunststoff-zu-Kunststoff Recyclingverfahren gibt es auch chemische Recyclingverfahren, die Kraftstoffe produzieren. Diese werden jedoch in den meisten regulatorischen Normen oder Industrienormen (z. B. EU-Richtlinie 2008/98/EG oder ISO 18604:2013) nicht als Recycling definiert und nicht in der Berechnung von Recyclingquoten berücksichtigt, da sie Kunststoffe nicht im Stoffkreislauf halten.

99 Nach zunächst unterschiedlicher Gesetzesgrundlage in den Mitgliedsstaaten hat die EU die Verwendung von Outputs des chemischen Recyclings für den Einsatz mit Lebensmittelkontakt zugelassen, wenn dieselben chemischen Grundstoffe auch bei Neuware im Lebensmittelbereich zugelassen sind. Dies gilt – anders als im mechanischen Recycling – unabhängig von dem Rohstoff, der zur Produktion des Outputs genutzt wurde.

100 Beispielsweise können Pyrolyse und Gasifikation grundsätzlich mit weniger reinen Stoffströmen arbeiten, aber die Effizienz nimmt stark ab, was die Kosten erhöht.

101 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

| | | | | | |
|--|--|---|--|------------|----------------|
| Gasifikation¹¹⁰ | Erhitzung gemischter Kunststoffe unter begrenzter Sauerstoffzufuhr, dabei Umwandlung in Synthesegas , das wieder in Polymere oder andere organische Chemikalien umgewandelt werden kann | Höchste Materialagnostik: große Spannbreite an Kunststoffen | Erheblich höher (Verarbeitungstemperaturen von oft >800°C, Energieverbrauch für weitere Verarbeitungsschritte) | 7-8 | Recycle |
| Kostenvorteile der Technologie | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Chemisches Recycling reduziert die Abhängigkeit von fossilen Primärressourcen und kann langfristig zur Preisstabilität von Kunststoffzyklen beitragen. ▶ Bei Skalierung könnte es kostengünstiger als Müllverbrennung werden, da steigende Anforderungen, etwa zum Einsatz von CCU, die Verbrennung teurer machen. | | | | | |
| Internationale Wettbewerbsvorteile | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Chemisches Recycling kann theoretisch dazu beitragen schwer recycelbare Materialien wie Verbundverpackungen und Misch-/Kunstfaser-Textilien zu recyceln.^{111, 112} ▶ Deutschland kann seine Führungsrolle in Recyclingtechnologien ausbauen und sich dadurch einen Wettbewerbsvorteil sichern. ▶ Beitrag zur Stärkung von Deutschlands Position als Innovationsführer im Bereich der Recyclingtechnologien und damit zur Schaffung eines Wettbewerbsvorteils ▶ Die Skalierung der Technologie schafft Arbeitsplätze. Dafür können sowohl das umfangreiche Know-how der deutschen Chemieindustrie als auch bestehende Infrastruktur wie Chemieparks und Steamcracker-Anlagen für Pyrolyse und Gasifikation genutzt werden. | | | | | |
| Ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Eine weiterhin limitierte Evidenzgrundlage für Umweltauswirkungen des chemischen Recyclings begrenzt Erkenntnisse über u. a. Massenverluste, Chemikalieneinsatz und den weiteren ökologischen Fußabdruck.¹¹³ ▶ Hoher Energieverbrauch einiger Verfahren limitiert Emissionsvorteile gegenüber fossiler Neuware – chemisches Recycling sollte nur dann zum Einsatz kommen, wenn es eine bessere CO₂-Bilanz¹¹⁴ als fossile Neuware aufweisen kann. ▶ Es besteht die Sorge, dass verstärkte Investitionen in chemisches Recycling zu geringeren Investitionen in mechanische Recyclinginfrastruktur führen und gleichzeitig vorgelagerte Lösungen wie Vermeidung (Reduce) und Wiederverwendung (Reuse) weniger Aufmerksamkeit erhalten, was einen Lock-in-Effekt begünstigen könnte.¹¹⁵ ▶ Trotz limitierter Datenlage ist aktuell davon auszugehen, dass für PET- und PP-Kunststoffe chemisches Recycling kostenseitig in der Regel nicht konkurrenzfähig mit mechanischem Recycling ist.¹¹⁶ Die Kosten unterscheiden sich jedoch erheblich je nach Verfahren bzw. verwertetem Kunststoff und regionalen Energie- und Rohstoffpreisen.¹¹⁷ ▶ Kleinstes Potenzial zur Senkung des Bedarfs an primären bzw. fossilen Kohlenstoff-Primärressourcen im Vergleich zu anderen Recyclingverfahren¹¹⁸ | | | | | |

110 Verfahren wird auch für die Vergasung von Kohle und Biomasse eingesetzt (mit höheren TRLs).

111 Statista (2025): Aufkommen an Bekleidungs- und Textilabfällen in Deutschland in den Jahren 2004 bis 2023, online verfügbar [hier](#).

112 Die EU-Anforderung zur separaten Sammlung von textilem Abfall seit 01/2025 kann die Verfügbarkeit von Rohstoff erhöhen und so Kosten reduzieren.

113 Hann, S. und Connock, T. (Eunomia) (2020): Chemical Recycling: State of Play, online verfügbar [hier](#).

| |
|---|
| Projektbeispiele |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Reju betreibt eine Anlage nahe Frankfurt, die Polyester durch chemische Depolymerisation in seine Grundstoffe zerlegt und zu hochwertigem recyceltem Polyester verarbeitet.¹¹⁹ ▶ BASF entwickelt mit ChemCycling® ein Verfahren, das Kunststoffabfälle in Pyrolyseöl umwandelt und als Rohstoff für neue Kunststoffe mit Neuwarequalität nutzt.¹²⁰ |
| Barrieren & Maßnahmen |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Barrieren zur Anwendung des chemischen Recyclings sind vor allem: <ul style="list-style-type: none"> • fehlende regulatorische Rahmenbedingungen der Technologie in Deutschland • Limitationen in der Abfallsortierung begrenzen die Verfügbarkeit von relevant vorsortiertem Rohstoff. • Eine begrenzte technische Reife der Verfahren u. a. bei Materialeffizienz, THG-Intensität und Prozessoutputs schränkt die Einsatzfähigkeit in der Industrie ein.¹²¹ • Hohe Energiepreise begrenzen die Wirtschaftlichkeit und Emissionsreduktionspotenziale der Technologie. ▶ Maßnahmen zur Entwicklung der Technologie und ihrer Marktreife, im Rahmen ihres sinnvollen Einsatzes, sind unter anderem: <ul style="list-style-type: none"> • eine klare Definition und Standardisierung des Massenbilanz-Ansatzes zur Berechnung des Recyclinganteils, um chemisches Recycling in Deutschland als Recycling anzuerkennen und kohärente Regulierung zu ermöglichen • effizientere und transparentere Zulassungsverfahren, damit Recyclinganlagen schneller in Betrieb gehen können • Investitionen in moderne Sortier- und Aufbereitungstechnologien sind notwendig, um die Reinheit der Kunststoffströme zu erhöhen. Solche Investitionen sind für die Skalierung des mechanischen Recyclings ebenfalls essenziell, weshalb eine übergeordnete deutsche und europäische Investitionsstrategie für mechanisches und chemisches Recycling gebraucht wird • Über das mechanische und chemische Recycling hinaus, braucht es gezielte politische Anreize, wie Steuervergünstigungen, Subventionen oder Mindestquoten für recycelte Inhalte in neuen Produkten. |

114 Die Errechnung des CO₂-Fußabdrucks des chemischen Recyclings und auch anderer Prozesse wird derzeit viel diskutiert, u. a. auf EU-Ebene im Rahmen der Erstellung eines einheitlichen Rahmenwerks. Im Zentrum stehen u. a. die Sicherstellung einer fairen Vergleichbarkeit mit anderen Technologien und die Sicherstellung einer korrekten Repräsentation der CO₂ Emissionen.

115 WWF (2022): WWF Position: Chemical Recycling Implementation Principles, online verfügbar [hier](#).

116 Uekert et al. (2023).

117 Kosten hängen je nach Verfahren zudem von der Skalierbarkeit der Verfahrensart sowie Vorbehandlungs- und Investitionskosten ab.

118 Systemiq-Analyse für die Energy Transition Commission (Publikation fortfolgend).

119 Wicker, Alden (2025): The World Is in a Polyester Crisis. One Company Is Trying to Recycle a Way Out. WIRED (21.02.2025).

120 BASF-Website.

121 Shawkat, A. et al. (Agora Industrie u. Systemiq) (2023).

Zirkuläre Methanolnutzung über MtX-Verfahren aus katalytischer Hydrierung

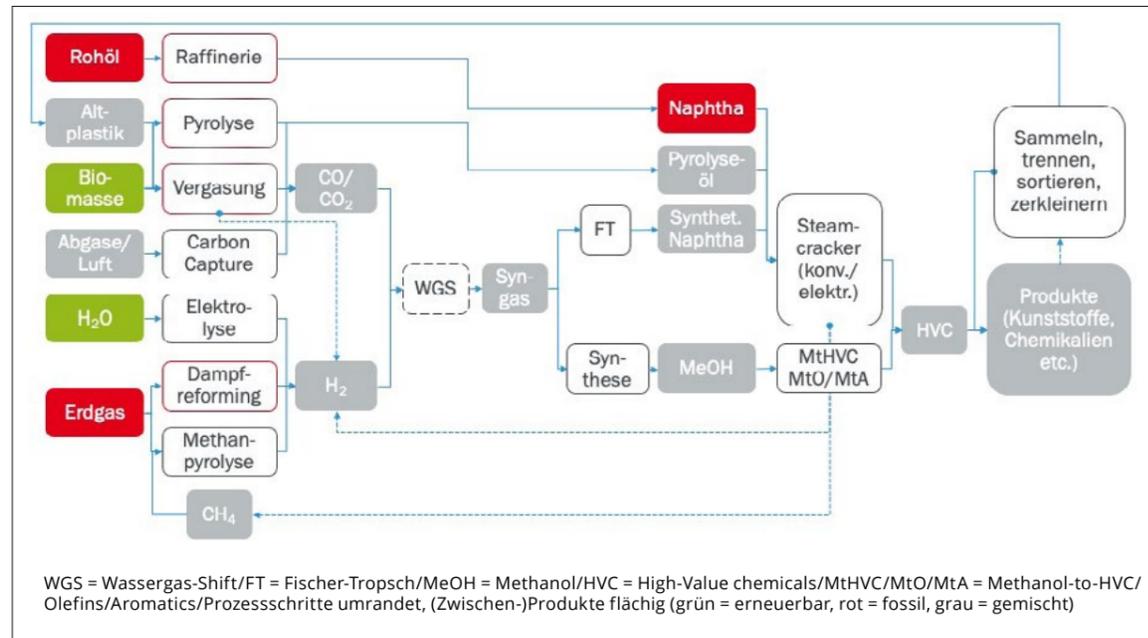


Abbildung 11: Routen der HVC-Produktion mit Prozessschritten und Zwischenproduktion. Aktuelle sowie potenzielle Routen (für Deutschland); © Prognos AG, Wuppertal Institut, Optionen für eine klimaneutrale und nachhaltige Grundstoffindustrie, im Auftrag des Deutschen Bundestages, 2022

MtX-Verfahren können eine nahezu klimaneutrale High-Value-Chemicals-Produktion (HVC-Produktion) aus grünem Methanol ermöglichen, indem sie fossile Rohstoffe wie Naphtha ersetzen und CO₂-Emissionen drastisch senken.^{122, 123}

Grünes Methanol kann unter anderem durch katalytische Hydrierung von abgeschiedenem CO₂ hergestellt werden und fossilen Kohlenstoff in der Produktion von Methanol und somit HVC ersetzen. Der hohe Energiebedarf stellt allerdings eine Herausforderung für die großflächige Herstellung von grünem Methanol in Deutschland dar.¹²⁴ Stattdessen könnte Methanol im (europäischen) Ausland produziert und importiert werden.

Anschließend kann das Methanol über MtX-Verfahren in HVCs – also Olefine (MtO) oder Aromaten (MtA) – in Deutschland umgewandelt werden – diese sind zentrale Bausteine der Chemieindustrie.

122 Eine klimaneutrale HVC-Produktion gelingt entweder über chemisches Recycling, elektrisch betriebene Steamcracker (traditionelle Naphta-Route) oder alternativ über die grüne Methanolroute – jede Variante trägt unter den richtigen Marktbedingungen zur Dekarbonisierung bei.

123 Systemiq-Analyse für die Energy Transitions Commission.

124 Piégsa, A. et al. (Wuppertal Institut und Prognos) (2022): Gutachten: Optionen für eine klimaneutrale und nachhaltige Grundstoffindustrie in Deutschland. Entwicklungspfade ausgewählter Wirtschaftszweige.

MtO/MtA könnten langfristig konventionelle Steamcracker ersetzen – mit nur drei bis elf Prozent der CO₂-Emissionen der Naphta-Route und vergleichsweise hoher Energieeffizienz im Gegensatz zu anderen Produktionsrouten, wie in Abbildung 11 dargestellt.¹²⁵

Die bestehende Chemieinfrastruktur, Küstenstandorte und nahegelegene CO₂-Quellen bieten günstige Bedingungen für eine industrielle Skalierung von MtX-Prozessen.¹²⁶

Langfristig könnte über (importiertes oder heimisches) grünes Methanol und MtO-Verfahren in Deutschland der gesamte Ethylen- und Propylenbedarf in Deutschland gedeckt werden, wenn die ökonomische Machbarkeit gegenüber anderen Verfahren bewertet wurde.¹²⁷

Da auch die Kohlenstoffquellen aus geprüften nachhaltigen Quellen immer hohe Umwelt- und/oder Energiekosten mit sich bringen, sollten diese Verfahren nach Auffassung des WWF nur jenen reduzierten Bedarf liefern, der nach tiefgreifenden systemischen Kreislaufwirtschaftshebeln in den Abnehmersektoren (z. B. Reduktion von Aromaten in Endprodukten) bleibt.

| Technologie | | TRL | R-Strategie |
|--|--|--------------------|------------------------|
| Katalytische Hydrierung | CO ₂ aus Punktquellen ¹²⁸ reagiert mit Wasserstoff unter hohen Temperaturen und Druck in Anwesenheit eines Katalysators (typischerweise kupferbasiert aufgrund seiner hohen Selektivität und geringen Kosten) zu Methanol und Wasser. ¹²⁹ | 7–8 ¹³⁰ | Reduce/ Recycle |
| Methanol-to-X-Verfahren (MtX-Verfahren) | Im nachgelagerten Prozess wird mittels MtO-Technologie Methanol über Dimethylether (DME) in Olefine (z. B. Ethylen, Propylen) und mittels MtA-Technologie in aromatische Grundchemikalien (z. B. Benzol, Toluol, Xylen) umgewandelt. | 11 ¹³¹ | Reduce |

125 UBA (2024): Anm.: Die brennstoffbedingten Emissionen der Steamcracker + Naphta als fossil-basierter Feedstock werden ersetzt.

126 Rosental, M. et al. (UBA) (2024): Prozessintegrierte Maßnahmen und alternative Produktionsverfahren für eine umweltschonendere Herstellung von Chemikalien.

127 Verpoort et al. (2024): Report: Transformation der energieintensiven Industrie – Wettbewerbsfähigkeit durch strukturelle Anpassung und grüne Importe, online verfügbar [hier](#).

128 z. B. aus unvermeidbaren CO₂-Quellen, die bei der Zementproduktion entstehen.

129 IEA (o D.): CCUS Technology Innovation, online verfügbar [hier](#).

130 Erste kommerzielle Anlagen werden zum Ende der 2020er-Jahre erwartet.

131 In China bestehen bereits großtechnische Anlagen.

Kostenvorteile der Technologie

- ▶ **Energiekosten:** Obwohl das MtO-Verfahren nach 2030 potenziell geringere Energiekosten erreichen könnte, machen hohe Investitions- und grüne Methanolkosten es in Deutschland derzeit weniger wettbewerbsfähig als konventionelle, Naphtha-betriebene Steamcracker.¹³²
- ▶ **Rohstoffeffizienz:** Neuere MtO-Anlagen benötigen weniger Methanol pro Tonne Ethylen und Propylen als frühere Generationen und sind dadurch effizienter als herkömmliche Steamcracker, die Naphtha als Rohstoff nutzen.¹³³

Internationale Wettbewerbsvorteile

- ▶ **Industrielle Skalierbarkeit:** Die bestehende Chemieinfrastruktur in Deutschland bietet gutes Potenzial für die Innovationsumsetzung – auch wenn hohe Investitions- und Methanolkosten aktuell noch eine Herausforderung darstellen. China betreibt bereits großtechnische MtO-Anlagen mit Kapazitäten auf Steamcracker-Niveau, allerdings mit Methanol, das aus fossilen Quellen produziert wird.¹³⁴
- ▶ **Optimale Infrastruktur:** Küstenstandorte in Deutschland bieten durch ihre Nähe zu Importhäfen und CO₂-Quellen sowie bestehende Chemieanlagen eine ideale Infrastruktur für die Methanolproduktion/ Methanolimport und -weiterverarbeitung.
 - **Wertschöpfung & Jobs:** Inländische Methanol-Weiterverarbeitung (MtO) ersetzt fossile Importe und schafft Arbeitsplätze.¹³⁵
 - **Sichere Versorgung:** Importoptionen von E-Methanol über Rotterdam und andere Importhäfen sichern die Lieferketten für eine anschließende Weiterarbeitung mittels MtX-Verfahren in Deutschland.

Ökologische Abwägungen

- ▶ Die Umweltwirkungen der Rohstoffbereitstellung bei MtO sind hauptsächlich an die Methanolherstellung geknüpft. Die Herkunft des CO₂ ist entscheidend, da sie die Kohlenstoffintensität der Methanolherstellung und damit der HVC bestimmt. Für die CO₂-Abscheidung gibt es verschiedene Wege. Laut dem UBA-Bericht sind nachhaltige Kohlenstoffquellen solche, die den CO₂-Kreislauf nicht vergrößern, z. B. biogenes CO₂ oder CO₂ aus der Luft (DAC), aber auch Zementabscheidung wird als notwendig betrachtet, um CO₂-Emissionen dauerhaft zu speichern – CCS bleibt hier unerlässlich.¹³⁶
- ▶ CCU erfordert sehr hohe Strommengen, somit hängt die Klimaneutralität maßgeblich von der Herkunft des Stroms ab. Ohne 100 Prozent erneuerbaren Strom kein CCU, damit keine katalytische Hydrierung zu Methanol.^{137, 138}

Projektbeispiele

- ▶ **UOP (Feluy, Belgien):** Am Standort wird eine Methanol-to-Olefins-Anlage (MtO-Anlage) mit einer jährlichen Kapazität von 200.000 Tonnen betrieben, die kommerziell erprobt ist (TRL 9) und der Effizienzsteigerung petrochemischer Prozesse dient.¹³⁹
- ▶ **La Robla Nueva Energía (Spanien):** Reolum hat die E-Methanol-Technologie von Johnson Matthey für dieses Projekt ausgewählt; die Anlage soll bis Ende 2027 in Betrieb gehen und jährlich bis zu 140.000 Tonnen E-Methanol produzieren.¹⁴⁰

Barrieren & mögliche Maßnahmen

- ▶ Barrieren für die Skalierung sind vor allem die folgenden:
 - unklare Nachfrage durch momentan höhere Kosten (insbesondere aufgrund der energieintensiven grünen Methanolherstellung) im Vergleich zu konventionellem Naphtha-Cracking
 - zusätzliche Transport- und Infrastrukturkosten für nachhaltige CO₂-Zufuhr, da Quellen solchen CO₂s (z. B. Zementproduktionsanlagen mit CCUS) nur sporadisch verfügbar sind
 - Unsicherheiten hinsichtlich technischer Alternativen und langfristiger Zukunftsfähigkeit vis-à-vis potenziellen zukünftigen Innovationen sind bei großen, CapEX-intensiven Umstellungen besonders hinderlich, da Investitionszyklen lang sind: Es gibt wenig Spielraum für experimentelle Tests und bei solch großen Anlagen.
- ▶ Mögliche Maßnahmen beinhalten:
 - Einführung stabiler – oder stabil und vorhersehbar ansteigender – hoher CO₂-Preise
 - gezielte Förderprogramme, um die Wirtschaftlichkeit von kohlenstoffarmen Rohstoffen, z. B. CO₂ aus CCUS, zu verbessern
 - intensivere Analyse und Tests von Synergien an Verbundstandorten (d. h. dort, wo nachhaltige Rohstoffe und Produktionspotenzial aufeinanderstoßen, z. B. in der Nähe innovativer Zementproduktionsanlagen), um weitere Kostensenkungspotenziale zu optimieren

132 Piégsa, A. et al. (Wuppertal Institut und Prognos) (2022).

133 UBA (2024): „Prozessintegrierte Maßnahmen und alternative Produktionsverfahren für eine umweltschonendere Herstellung von Chemikalien“, online verfügbar [hier](#).

134 Ebd.

135 Piégsa, A. et al. (Wuppertal Institut und Prognos) (2022).

136 Ausfelder, F. et al. (UBA) (2024): Umweltauswirkungen der stofflichen Nutzung von CO₂, online verfügbar [hier](#).

137 WWF (2022): Positionspaper CCU/S, online verfügbar [hier](#).

138 Für die genannten Einsparpotenziale (gem. Piégsa, A. et al.[Wuppertal Institut und Prognos] 2022) wird eine 100 % grüne Methanolproduktion angenommen.

139 UBA (2024): „Prozessintegrierte Maßnahmen und alternative Produktionsverfahren für eine umweltschonendere Herstellung von Chemikalien“, online verfügbar [hier](#).

140 Johnson Matthey (2025): Pressemitteilung: Johnson Matthey technology selected for one of the largest planned e-methanol plants in Europe. Pressemitteilung (21.01.2025).

4. Digitale Zwillinge als Beispiel einer sektorübergreifenden Technologie für mehr Kreislaufwirtschaft

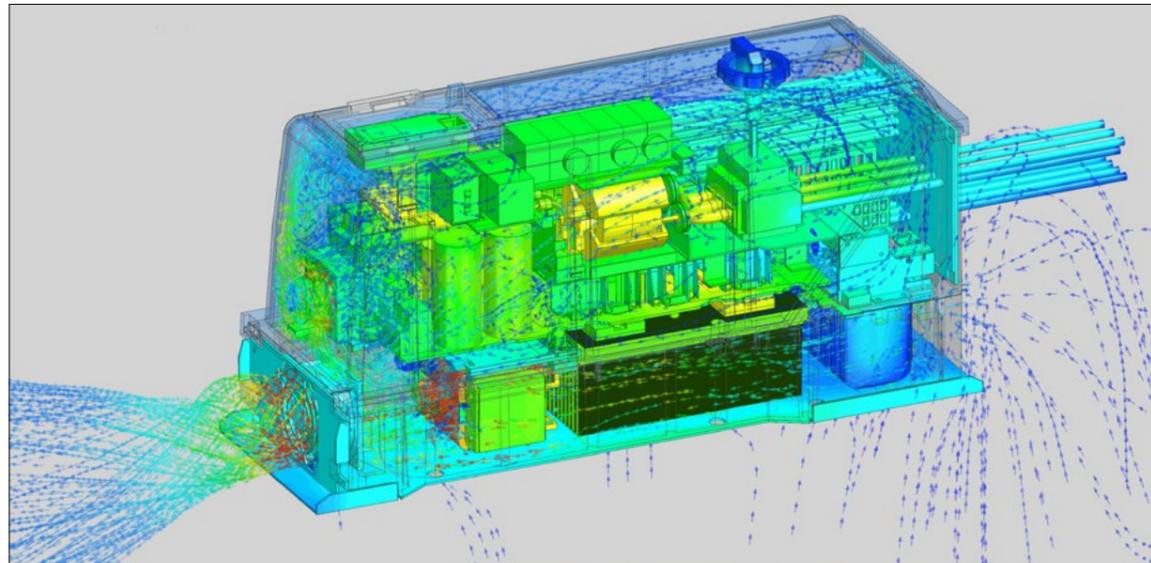


Abbildung 12: Digitaler Zwilling eines Gebäudes – „Autodesk Tandem“¹⁴¹; © Siemens AG

Digitale Zwillinge sind eine digitale Simulation eines Produktes, erstellt mit künstlicher Intelligenz. Sie können genutzt werden, um Design und Prozesse von der Produktion bis zum Lebensende zu optimieren und dadurch Material- und Betriebskosten zu senken, beispielsweise durch präventive Wartung. Sie ermöglichen auch die CO₂-Transparenz entlang der Lieferkette. Für Batterien ist eine simplere Form des digitalen Zwillings, genannt „Produktpass“, in der EU ab 2027 Pflicht.¹⁴²

Digitale Zwillinge ermöglichen auf allen Produktionsstufen Energie- und Materialeinsparungen von mindestens 20 Prozent, indem sie eine präzisere Produktionsplanung und Überwachung unterstützen.¹⁴³

Die Nachfrage nach Digital-Twin-Technologien wächst stark, insbesondere im Bereich Execution & Planning Software, mit einer erwarteten jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 14 Prozent bis 2030.¹⁴⁴

Sie leisten einen entscheidenden Beitrag zur nachhaltigen industriellen Wertschöpfung in Deutschland, indem sie eine Entkopplung von Produktivitätssteigerung und Ressourcenverbrauch ermöglichen.

¹⁴¹ Bildquelle: Siemens AG: „Autodesk Tandem“.

¹⁴² Ab Februar 2027 benötigen alle neu in der EU auf den Markt gebrachten Traktionsbatterien, Batterien von Zweirädern und Industriebatterien über 2 kWh Kapazität einen digitalen Batteriepass. Dieser soll Transparenz und Nachhaltigkeit in der Batterie-Wertschöpfungskette sicherstellen: <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/components-technologies/batteriepass>

¹⁴³ Wuppertal Institut (2022): Circular Economy digitale Zwillinge, online verfügbar [hier](#).

¹⁴⁴ Systemiq-Analyse (2024): basierend auf LEK [Statzon](#), [WH-Automation](#).

Einsatzbereiche für digitale Zwillinge in der Kreislaufwirtschaft

Bauwesen: Building Information Modelling (BIM) wird schon seit den frühen 2000er-Jahren eingesetzt, aber wird immer genauer, sodass Gebäude mittlerweile detailliert in all ihren Elementen digital dargestellt werden können. So können Designs für Materialeffizienz und Rückbau für zirkuläre Nutzung optimiert werden und bis zu 40 Prozent an Material eingespart werden.

Batterien: Detaillierte Lebenszyklusinformationen im Batteriepass erleichtern die Zweitnutzung, Wiederaufbereitung und das effiziente Recycling wertvoller Rohstoffe, was zur Verlängerung der Batterielebensdauer und zur Erhöhung der Recyclingquote beiträgt.¹⁴⁵

Produktion & Fertigung: Predictive Maintenance und Automatisierung reduzieren den Materialverbrauch und verlängern die Maschinenlebensdauer (z. B. Computergestützte Fertigung, CAD).

| Technologie | | TRL | R-Strategie |
|---|---|-----------|-------------------------------|
| Digitale Zwillinge | Digitale Zwillinge sind virtuelle Abbilder physischer Objekte und Prozesse. Sie bündeln Echtzeitdaten zur Überwachung, Analyse und Optimierung. | 10 | Reduce, Reuse, Recycle |
| Kostenvorteile der Technologie | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Schnellere Markteinführung: Virtuelle Tests beschleunigen Entwicklung und Markteintritt. ▶ Kosteneinsparungen: Optimierungspotenziale reduzieren Materialverschwendung und Instandhaltungskosten. ▶ Predictive Maintenance, virtuelle Inbetriebnahmen und flexible Produktion werden ermöglicht, was die Materialeffizienz erhöht. | | | |
| Internationale Wettbewerbsvorteile | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Produktivitätssteigerung: verbesserte Planung und automatisierte Prozesse ▶ Geschäftsmodellentwicklung: neue Monetarisierungsmöglichkeiten für R-Strategien (z. B. Wiederaufbereitung von Batterien) ▶ Deutschland ist Vorreiter in Industrie 4.0 und digitalisierten Lieferketten: Starke Industrieexpertise und viele Anwendungsoptionen ermöglichen eine wirtschaftlich tragfähige Kreislaufwirtschaft. ▶ Mehr Wettbewerbsfähigkeit: Technologie beschleunigt Innovationszyklen (durch simulationsgestützte Tests neuer Produktionsmethoden oder Produktdesigns), stärkt Deutschlands Wettbewerbsfähigkeit. | | | |
| Ökologische Abwägungen und Vorsichtsmaßnahmen | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▶ Jevons-Paradoxon: Effizienzsteigerungen können zu einem höheren Gesamtverbrauch führen, wenn Einsparungen zu Mehrkonsum oder Reinvestition in andere ressourcenintensive Prozesse führen. ▶ Dateninfrastruktur & Energieverbrauch: Speicherung und Verarbeitung digitaler Zwillinge erfordert energieeffiziente Rechenzentren und nachhaltige Digitalisierungsstrategien. | | | |

¹⁴⁵ Fraunhofer IPK (o. D.): Nachhaltigkeit mithilfe von Digital Twins, online verfügbar [hier](#).

Projektbeispiele

- ▶ **Madaster** erstellt digitale Zwillinge von Gebäuden, erfasst Materialdaten und bewertet deren Wiederverwendbarkeit. So unterstützt die Plattform nachhaltiges Gebäudemanagement und die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen.
- ▶ **Circular** verfolgt Materialien in Lieferketten mithilfe von Blockchain und digitalen Zwillingen.
- ▶ **Siemens:** Mit SiGREEN und Catena-X ermöglicht Siemens eine präzise CO₂-Fußabdruck-Berechnung entlang der Lieferkette.

Barrieren & mögliche Maßnahmen

- ▶ Barrieren für die Skalierbarkeit der digitalen Zwillinge sind vor allem:
 - technische Fähigkeit zur Gewinnung, Integration und Verwaltung großer Datenmengen aus verschiedenen Quellen entlang der Wertschöpfungskette, je nach Produkt mehr oder weniger komplex
 - fehlende Einigung zwischen europäischen Akteuren zum Datenaustausch und zu Produkt-Datenstandards
 - Bereitschaft zur Nutzung in den nachgelagerten Sektoren – z. B. in Bau- und vor allem in kleineren und mittleren Unternehmen (KMU).
- ▶ Maßnahmen zur Skalierbarkeit beinhalten:
 - einheitliche EU-Datenstandards, wie in der EU-Regulatorik zu digitalen Produktpässen für Batterien bereits gelungen
 - gezielte Förderung für KMU zur Nutzung digitaler Zwillinge, vor allem dort, wo nicht regulatorisch vorgeschrieben (z. B. im Bau)

International Energy Agency (IEA) Technology Readiness Scala

Die Skala der IEA beschreibt die Entwicklungsstufen einer Technologie von der ersten Idee (Konzeptphase) über Prototypen und Demonstration bis zur kommerziellen Reife und Integration im großen Maßstab.¹⁴⁶

| TRL-Level | Stufe | Beschreibung |
|------------------|-------|--|
| Konzept | 1 | Erste Idee – Grundprinzipien wurden definiert. |
| Konzept | 2 | Anwendung formuliert – Konzept und Anwendung der Lösung wurden formuliert. |
| Konzept | 3 | Konzept benötigt Validierung – die Lösung muss prototypisiert und angewendet werden. |
| Kleiner Prototyp | 4 | Früher Prototyp – Prototyp unter Testbedingungen erprobt |
| Großer Prototyp | 5 | Großer Prototyp – Komponenten unter realen Einsatzbedingungen erprobt |
| Großer Prototyp | 6 | Vollständiger Prototyp im Maßstab – Prototyp im realen Maßstab unter Einsatzbedingungen erprobt |
| Demonstration | 7 | Vor-kommerzielle Demonstration – Lösung funktioniert unter erwarteten Bedingungen. |
| Demonstration | 8 | Erste kommerzielle Anwendung – kommerzielle Demonstration, vollständige Skalierung und Einsatz in finaler Form |
| Frühe Anwendung | 9 | Kommerzielle Anwendung in relevanter Umgebung – Lösung ist kommerziell verfügbar, benötigt aber evolutionäre Verbesserungen, um wettbewerbsfähig zu bleiben. |
| Frühe Anwendung | 10 | Integration im großen Maßstab erforderlich – Lösung ist kommerziell und wettbewerbsfähig, erfordert jedoch weitere Integrationsmaßnahmen. |
| Ausgereift | 11 | Stabilität nachgewiesen – vorhersehbares Wachstum erreicht |

¹⁴⁶ IEA (o. D.): Innovation Needs in the Sustainable Development Scenario, online verfügbar [hier](#).

Glossar

| Begriff | Abkürzung | Definition |
|---|--------------------------|---|
| CO ₂ -Äquivalente | CO₂e | CO ₂ e ist eine Maßeinheit, die die Klimawirkung verschiedener Treibhausgase basierend auf ihrem Global Warming Potential (GWP) in CO ₂ -Äquivalente umrechnet, um ihre Gesamtwirkung vergleichbar zu machen. |
| Erneuerbare Energien | - | Erneuerbare Energien sind Energiequellen, die sich natürlich regenerieren und im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen unbegrenzt verfügbar sind. Dazu gehören Solarenergie, Windkraft, Wasserkraft, Biomasse und Geothermie. |
| Embodied Carbon Limits | - | Embodied Carbon Limits sind gesetzliche oder freiwillige Grenzwerte für die in Baustoffen und Produkten enthaltenen CO ₂ -Emissionen, die während der gesamten Lebenszyklusphasen von Rohstoffgewinnung über Produktion bis zur Entsorgung entstehen, um die Klimabilanz der Bau- und Industriebranche zu verbessern. |
| Direktreduktion – Elektrolichtbogenofen | DRI-EAF | DRI: CO ₂ -armes Verfahren zur Reduktion von Eisenerz zu Eisenschwamm, welcher dann zu Rohstahl weiterverarbeitet werden kann EAF: Prozess zur Gewinnung von Sekundärstahl aus Stahlschrott oder Primärstahl aus Direktreduktion (DRI) |
| Wasserstoffbasierte Direktreduktion | H₂-DRI | Die wasserstoffbasierte Direktreduktion ist ein Verfahren zur Eisenherstellung, bei dem Wasserstoff anstelle von Kohlenstoff zur Reduktion von Eisenerz verwendet wird – mit deutlich geringeren CO ₂ -Emissionen, sofern der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien stammt. |
| High-Value Chemicals | HVC | Unter High-Value Chemicals (HVC) versteht man zentrale organische Grundchemikalien, die als Ausgangsstoffe für zahlreiche Wertschöpfungsketten und Folgeprodukte dienen. Dazu zählen: Olefine mit 2–4 Kohlenstoffatomen, insbesondere Ethylen, Propylen, Butene (Buten-Isomere) und 1,3-Butadien. Aromaten mit 6–8 Kohlenstoffatomen, darunter Benzol, Toluol und Xylol (Xylol-Isomere), die gemeinsam als BTX bezeichnet werden. |

| Begriff | Abkürzung | Definition |
|--------------------------------------|------------|---|
| Kreislaufwirtschaftstechnologien | - | Kreislaufwirtschaftstechnologien können als technologische Lösungen verstanden werden, die die Kreislaufwirtschaftsprinzipien (R-Strategien) unterstützen und die Transformation zu einer zirkulären Wirtschaft ermöglichen. Der Begriff „Technologie“ umfasst dabei gemäß der OECD das Wissen, wie Produkte hergestellt, Dienstleistungen erbracht oder Prozesse durchgeführt werden, sowie die physikalischen und organisatorischen Systeme, die dies ermöglichen. |
| Puzzolanische Eigenschaften | - | Die Fähigkeit bestimmter Zusatzstoffe (z. B. kalzinierter Ton, Flugasche oder Vulkanschaum), in Anwesenheit von Wasser und Calciumhydroxid zusätzliche zementbildende Verbindungen zu bilden, was die Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Zement verbessert. |
| Supplementary Cementitious Materials | SCM | Alternative Bindemittel im Betonbau, die teilweise Zementklinker ersetzen und so CO ₂ -Emissionen reduzieren. Dazu zählen Flugasche, Hüttensand, kalzinierter Ton (z. B. Metakaolin) und natürliche Puzzolane. Sie verbessern die Betonleistung und fördern nachhaltiges Bauen. |
| Technology Readiness Level | TRL | TRL (Technology Readiness Level) ist ein international etabliertes System zur Bewertung des technologischen Reifegrads, das von der Grundlagenforschung (TRL 1) bis zur vollständigen kommerziellen Anwendung (TRL 9 oder höher) reicht. |



Mehr WWF-Wissen
in unserer App.
Jetzt herunterladen!



iOS



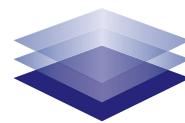
Android



Auch über einen
Browser erreichbar.

Unterstützen Sie den WWF

IBAN: DE06 5502 0500 0222 2222 22



Initiative
Transparente
Zivilgesellschaft



Unser Ziel

Wir wollen die weltweite Zerstörung der Natur und Umwelt stoppen und eine Zukunft gestalten, in der Mensch und Natur in Einklang miteinander leben.

WWF Deutschland
Reinhardtstraße 18 | 10117 Berlin
Tel.: +49 30 311777-700
info@wwf.de | wwf.de