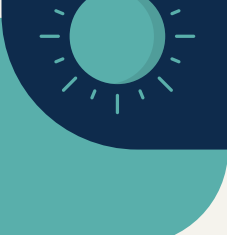
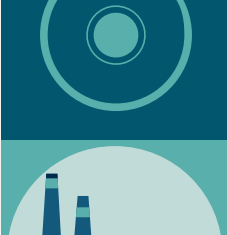
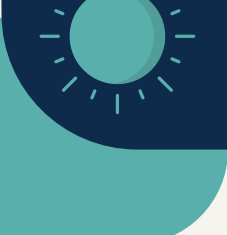
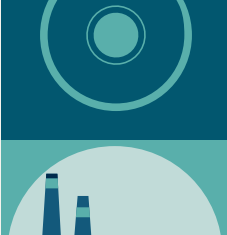
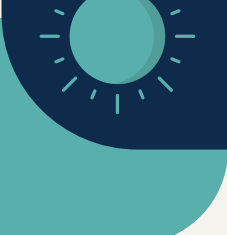
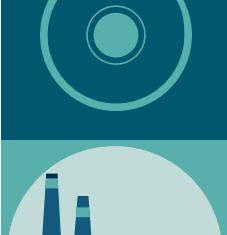
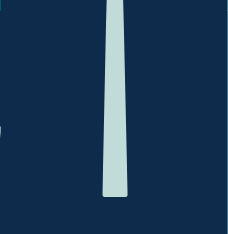
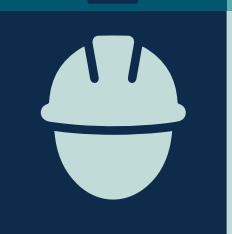
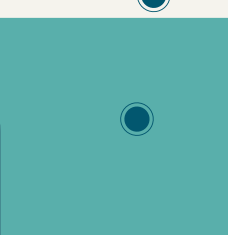
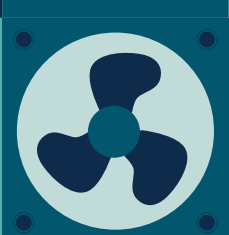
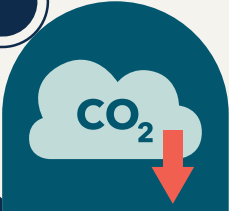


Policy Paper

September 2026

Instrumentenmix für die Industrietransformation:

Wie systemische Hebel den
CCS-Bedarf beeinflussen



BELLONA

Über Bellona

Bellona Deutschland ist eine gemeinnützige Klima- und Umweltorganisation mit dem Fokus auf Klimaschutz in der Industrie. Wir verfolgen einen wissenschaftsbasierten und lösungsorientierten Ansatz. Zentrale Motivation unserer Arbeit ist die systemische Einordnung und Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen, um deren Potenziale und Mehrwerte für den Klimaschutz auszuschöpfen.

Rechtlicher Hinweis

Bellona bemüht sich sicherzustellen, dass die in diesem Bericht enthaltenen Informationen korrekt und frei von Rechten Dritter sind, übernimmt jedoch keine Gewähr oder rechtliche Verantwortung für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Interpretation oder Nützlichkeit der Informationen, die sich aus der Nutzung dieses Berichts ergeben können.

Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Namensnennung – Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (CC BY-NC-SA 4.0). Eine Kopie dieser Lizenz finden Sie unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.de>



Zitiervorschlag

Bellona Deutschland. 2026. Instrumentenmix für die Industrietransformation: Wie systemische Hebel den CCS-Bedarf beeinflussen. Berlin. <https://de.bellona.org/publication/instrumentenmix-industrietransformation/>

Autor:innen

Steffen Laube, Georg Kobiela, Fabian Liss, Lena Patterer, Frauke Eustermann, Luisa Keßler, Milan Loose, Niklas Wagner, Eliane Hochsprung und Anna Hauggaard-Nielsen

Danksagung

Wir danken den folgenden Personen für Ihr Review der vorliegenden Analyse und Ihren wertvollen Beitrag:

Holger Berg
Tobias Fleiter
Sascha Samadi
Leona Tenkhoff

Die inhaltlichen und normativen Aussagen liegen allein in der Verantwortung der Autor:innen und müssen damit nicht der Sichtweise der Reviewer:innen entsprechen.

Layout & Design

Arnbjørn Mortensen

Kontakt

Steffen Laube
Fachreferent Zukunftsdialog Industrie
steffen@bellonadeutschland.org
+49 (0) 170 3805 273

Amrei Milch
Head of Public Affairs & Operations
amrei@bellonadeutschland.org
+49 (0) 152 0297 0318

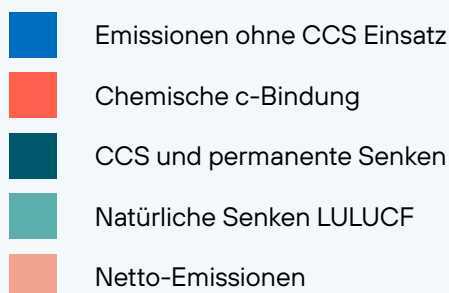
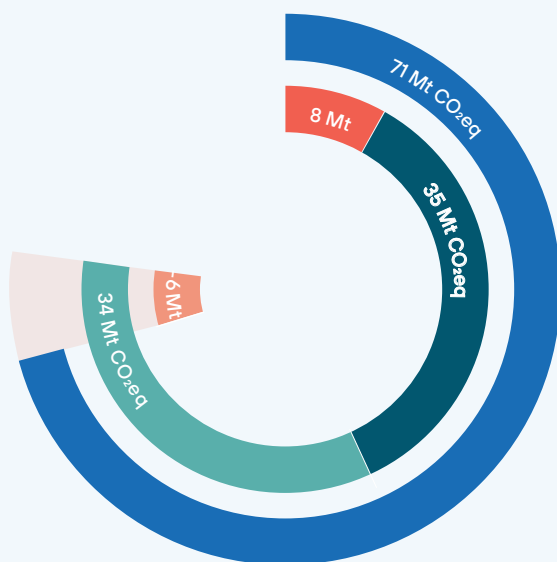
Inhalte

Executive Summary	1
Einleitung	4
1. Systemische Einflüsse auf den CCS-Bedarf	5
1.1. Warum den CCS-Bedarf systemisch betrachten?	5
1.2. Szenarienvergleich der Emissionen in 2045	7
1.3. Szenarienvergleich zum CCS-Bedarf	9
1.4. CO ₂ -Entnahme: LULUCF und Negativemissionen	11
1.5. Systemische Minderungsoptionen für den CCS-Bedarf	15
1.5.1. <i>Energie und Elektrifizierung</i>	16
1.5.2. <i>Wasserstoff</i>	19
1.5.3. <i>Circular Economy und Materialeffizienz</i>	23
1.5.4. <i>Finanzpolitische Steuerungsinstrumente</i>	28
2. CCS-Bedarfe in der Industrie und deren Minderungsoptionen	32
2.1. Chemieindustrie	32
2.2. Stahlindustrie	37
2.3. Bau- und Zementindustrie	44
3. Fazit	49
Literaturverzeichnis	50

Executive Summary

Für eine gelingende Transformation der Industrie braucht es realistische Ausbaupfade, um Ressourcen effizient einzusetzen. Aktuelle nationale Klimaschutzszenarien zeigen, dass selbst unter ambitionierten Annahmen zur Emissionsreduktion und -vermeidung in Deutschland **2045 ohne CCS und CCU noch ca. 71 Mt CO₂eq** Emissionen (siehe [Abbildung 1](#)) verbleiben. Diese sollten durch die hier betrachteten Vermeidungs- und Emissionsreduktionsoptionen und CCS weitmöglichst gemindert werden. Für die dann noch verbleibenden Restemissionen müssen permanente und natürliche Senken eingesetzt werden. Im Klimaschutzgesetz (KSG) sind für 2045 40 Mt CO₂ durch natürliche Senken im LULUCF-Sektor vorgesehen, die nach aktuellen Prognosen verfehlt werden. Die hier ausgewerteten Studien rechnen im Durchschnitt mit **34 Mt natürlichen Senken im LULUCF-Sektor**. Dagegen werden für **CCS und permanente Senken ca. 35 Mt** angenommen. Den Umfang von natürlichen und „technischen“ Senken soll eine Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) festlegen.

Emissionsreduktion und -vermeidung 2045



Hebel für die Industrietransformation



Mehr Informationen in
[Abbildung 1](#) und [Abbildung 2](#)

CCS wird demnach ein Teil der Lösung sein. Die langen Vorlaufzeiten von Projekt- und Infrastrukturplanung erfordern zügige Bemühungen zur Gestaltung des CCS-Hochlaufs in Deutschland. Gleichzeitig dürfen die Instrumente und Hebel nicht in Vergessenheit geraten, durch die parallel zum CCS-Hochlauf in Schlüsselsektoren und -branchen umfassende Emissionsminderungen und -vermeidungen erreicht werden können. Um den Bedarf an CCS zu mindern und zu einem klaren Bild des Hochlaufpfads für CCS in Deutschland zu kommen, sind folgende **systemische Hebel** vorhanden:

- Die Ziele für den **LULUCF-Sektor sollten** bestehen bleiben. Um diese zu erreichen, ist es erforderlich, natürliche Senken zu stärken und die stoffliche Nutzung von Biomasse entsprechend des Kaskadenprinzips zu priorisieren bzw. Biomasse im Kreislauf zu halten. Nur nachhaltige und nicht stofflich nutzbare Biomasse sollte energetisch oder für Bio-CCS verwertet werden. Ein zusätzlicher Verbrauch biogener Rohstoffe etwa für die Wärmeerzeugung sollte vermieden werden, da diese stofflich, z. B. in der Chemieindustrie, gebraucht werden.
- Umfangreiche **Elektrifizierung mittels erneuerbarer Energien und damit einhergehende Effizienzsteigerungen** sind die Grundlage für die Minderung des CCS-Bedarfs in der Energiebereitstellung, da so die Nutzung von fossilen Energieträgern massiv reduziert werden kann. Politisch sollten Anreize dementsprechend so gesetzt werden, dass Gas nur wo notwendig – etwa bei Industrieprozessen oder in Dunkelflauten – eingesetzt wird. Flexibilisierung und Speicherausbau entlasten das Stromsystem und sollten als Optionen auch bei Ausschreibungen ermöglicht werden.
- **Wasserstoff** spielt eine wichtige Rolle, um in Industrieprozessen und – ggf. bei langanhaltenden Dunkelflauten noch begrenzt benötigten – Gaskraftwerken auf CCS zu verzichten. Hierfür sollte der Aufbau einer deutschen und internationalen Wasserstoffwirtschaft und der damit verbundene Ausbau erneuerbarer Energien vorangetrieben werden. Zumindest für die Hochlaufphase ist zusätzlich eine Nutzung von CCS zur Herstellung von blauem Wasserstoff notwendig, die sich auf relativ wenige Produktionsanlagen konzentriert. Nachhaltiger Wasserstoff ist begrenzt und sollte nicht in der Breite, z. B. zur Wärmeerzeugung, verwendet werden. Hier sind Klimanutzen, Thermodynamik und Produktionskosten miteinander in Einklang zu bringen.
- Durch **Circular Economy und Materialeffizienz** kann der Bedarf an (fossilen) Rohstoffen deutlich gesenkt werden. So werden Emissionen bei der Bereitstellung und Verarbeitung von Rohstoffen und am Lebensende durch weniger thermische Verwertung reduziert. Grüne Leitmärkte für zirkuläre Produkte und Recyclingquoten können Nachfrage und Angebot deutlich stärken. Zusätzlich sollten gesetzliche Hürden wie die Unterscheidung von Abfall und Wertstoff praxistauglich angepasst werden.
- Mit einer strategischen **finanzpolitischen Steuerung** von CCS, die Fehlanreize vermeidet und schwer zu vermeidende Emissionen priorisiert, kann eine effiziente und investitionsfreundliche Förderung gewährleistet werden. Dabei sollen Fördermittel für CCS-Anwendungen mit hohem Klimanutzen und No-Regret-Infrastruktur an Schlüsselstellen allen Branchen Pfade zur Transformation eröffnen.

In den **Industriesektoren** ist es in unterschiedlichem Umfang möglich, den CCS-Bedarf zu mindern:

- In der **Chemieindustrie** sollte die Energiewende in der Prozessenergie vorangetrieben werden. Begleitend hierzu ist eine zunehmende Umstellung der Rohstoffbasis auf biogene und im Kreislauf geführte Rohstoffe zielführend. Hierfür braucht es – neben günstiger und ausreichend verfügbarer erneuerbarer Energie und erneuerbaren Wasserstoffs – eine Steigerung von mechanischem und chemischem Recycling und große Mengen nachhaltiger Biomasse. Für die Umsetzung ist neben Quoten ein wirksames Instrument erforderlich, welches die Nachfrage und Produktion nachhaltiger Produkte anreizt. Ein Teil des Bedarfs erneuerbarer Vorprodukte wird hierbei über Importe abzudecken sein.
- Die **Stahlindustrie** braucht in der primären Stahlherstellung vor allem ausreichend verfügbaren nachhaltigen Wasserstoff als Reduktionsmittel für DRI. Sowohl in der neuen Direktreduktionsroute als auch im Recycling sind große Mengen erneuerbaren Stroms für Lichtbogenöfen notwendig – auch wenn recycelter Sekundärstahl nur ca. 1/8 des Energiebedarfs vom Primärstahl der Hochofenroute und 1/5 der DRI-Route aufweist. Allgemein kann der Stahlverbrauch etwa durch Leichtbau gesenkt oder durch angepasste Normen und bessere Trennung durch Recyclingstahl ersetzt werden. Der Einsatz von (begrenzt verfügbarer) nachhaltiger Biomasse in Form von Biokohle und Biogas mindert zwar nicht die CO₂-Entstehung vor Ort, kann jedoch die Klimabilanz verbessern.
- Für die **Zementherstellung** ist nach aktuellem Stand der Technik aufgrund von schwer vermeidbaren Prozessemissionen ein relativ hoher CCS-Bedarf zu erwarten. Dennoch gibt es auch hier große Potenziale entlang der gesamten Wertschöpfungskette, den Einsatz von Zementklinker und damit die prozessbedingten Emissionen zu reduzieren. Maßnahmen hierzu sind die Reduktion des Einsatzes von Beton, des Zementanteils im Beton, die Weiternutzung von Bauteilen, Recycling oder alternative Baumaterialien wie Holz und Lehm. Hierfür sind grüne Leitmärkte und angepasste Normen besonders wichtig. Auch im Bereich Zementherstellung erfordert die Energiebereitstellung massiven Zubau erneuerbarer Energien.
- Nur das Zusammenspiel und konsequente Vorantreiben aller zur Zielerfüllung beitragenden Maßnahmen bringt uns den Klimazielen nahe. CCS sollte als Teil eines Maßnahmenportfolios ebenso effizient wie gezielt eingesetzt werden. Zugleich müssen die Ambitionen auch bei weiteren Maßnahmen erhöht werden. Durch Fortschritte bei ergänzenden Ansätzen und Alternativen wird der Zielpfad des CCS-Hochlaufs deutlicher ersichtlich und somit planbarer. Insgesamt sollte daher eine wissenschaftlich nachvollziehbare Strategie gewählt werden, die sich iterativ an die Erfordernisse und den Stand der Technik anpasst.

Einleitung

Die Transformation zur Klimaneutralität birgt viele Herausforderungen. Auch langfristig werden Emissionen verbleiben, die nur schwer zu vermeiden sind, etwa Prozessemissionen in der Zementherstellung oder die Emissionen der Müllverbrennung am Ende der Wertungskette. In zentralen Industrien wie Stahl und Chemie herrschen weiterhin große Unsicherheiten über technologisch realistische und wirtschaftlich tragfähige Minderungsoptionen.

Laut den Szenarien des Weltklimarats (IPCC) ist Carbon Capture and Storage (CCS) für das Erreichen globaler Klimaneutralität nötig (Bashmakov u. a. 2022). In Deutschland hat die Bundesregierung mit dem neuen Kohlendioxid-Speicherungs- und Transportgesetz (KSpTG) zuletzt die rechtlichen Voraussetzungen für CCS geschaffen.

Für einen Teil der schwer vermeidbaren Emissionen ist CCS aus heutiger Sicht nötig, um Klimaneutralität zu erreichen. Gleichzeitig bleibt CCS in vielen diskutierten Anwendungsbereichen eine kostenintensive Dekarbonisierungsoption, und Alternativen wie Elektrifizierung, Kreislaufwirtschaft, Wasserstoff oder Prozessinnovationen stellen oftmals – allerdings durchaus nicht immer – technologisch und ökonomisch attraktivere Optionen zur tiefgehenden Emissionsminderung dar (E3G und Bellona 2026). In einigen Branchen und Anwendungsfällen – wie etwa Steamcrackern in der Chemieindustrie – ist CCS gegenwärtig trotz hoher Kosten die günstigste verfügbare und skalierbare Option. Zugleich gibt es Anwendungen mit Prozessemissionen, bei denen nur durch eine Maßnahmenkombination inklusive CCS (weitgehende) Treibhausgasneutralität erreicht werden kann. Daher stellt sich die Frage: Wie lassen sich trotz dieser Unsicherheit realistische Pfade für Emissionsminderung erreichen, wo bleibt – auch bei ambitionierten Annahmen zur Umsetzung ergänzender Ansätze – CCS-Bedarf bestehen? Dieses Papier vergleicht Modellierungen und stellt alternative wie auch ergänzende Vermeidungs- und Minderungsoptionen dar, die den Bedarf an CCS limitieren können. Durch die nähere Einschätzung branchenbezogener Dekarbonisierungshebel knüpft das Papier an die Bewertung der Alternativenverfügbarkeit zu einem CCS-Einsatz im [2026er-Update der CCS Ladder](#) an.

Emissionsmindernde Investitionen gelingen nur, wenn Klimaneutralität technisch erreichbar und wirtschaftlich plausibel ist. Der Ausbau von erneuerbarer Energie, Stromnetzen, Flexibilität, Speichern und direkter Elektrifizierung bildet das Rückgrat eines resilienten europäischen Energiesystems. Transformationspfade entwickeln sich jedoch nicht immer ideal. Einige Maßnahmen werden sich nicht wie geplant realisieren oder skalieren lassen, weswegen es Redundanzen braucht. Anders ausgedrückt: Wir müssen mehr Maßnahmen in die Umsetzung bringen, als für einen idealisierten Reduktionspfad erforderlich wären. Hinzu kommt der Bedarf nach CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (CDR) aufgrund von unvermeidbaren Emissionen, z. B. der Landwirtschaft, und dem in der Atmosphäre schon angesammelten überschüssigen CO₂. Dafür wird bereits jetzt der Hochlauf von CCS und der Aufbau einer CO₂-Infrastruktur benötigt. Eine zu späte Integration von CCS in das Technologieportfolio in Form eines Nachsteuerns in ferner Zukunft wäre auch im Wettbewerb um Innovationen fahrlässig. Ebenso unverantwortlich wäre es aber, sich übermäßig auf Abscheidungstechnologien zu verlassen und zuweilen effizientere Maßnahmen nicht konsequent auszuschöpfen. Wie jede Technologie könnte auch CCS die an sie gestellten Erwartungen verfehlen. Ziel sollte es deswegen sein, CCS vor allem dort gezielt voranzutreiben, wo keine effizienteren Optionen bestehen. Es aber zugleich dort, wo grundsätzlich gute Alternativen bestehen, stets als Messlatte zu referenzieren.

Durch das kritische Gegenüberstellen von Alternativen können überzogene Erwartungen wie beim Wasserstoffhochlauf vermieden werden. Dies ermöglicht, die Technologie für eine gelingende Transformation robust zu skalieren. Der notwendige gesellschaftliche Konsens für ambitionierte Klimaziele und konkrete Maßnahmen ist fragil. Umso wichtiger ist es, dass der Transformationsdiskurs evidenzbasiert geführt wird.

1. Systemische Einflüsse auf den CCS-Bedarf

1.1. Warum den CCS-Bedarf systemisch betrachten?

Deutschland hat Klimaziele festgeschrieben, erreicht diese aber voraussichtlich nicht. Die Welt bewegt sich auf einen CO₂- und Temperatur-Overshoot (Reisinger u. a. 2025) zu, den es zu begrenzen gilt. Einige Mittel werden nicht die erwartete Wirkung entfalten. Deswegen müssen alle geeigneten und mittelfristig zur Verfügung stehenden Instrumente genutzt und skaliert werden. Dabei dürfen diese allerdings einer vertieften Transformation nicht im Wege stehen (Bellona 2025a). Hierfür ist eine systemische – also eine sektorenübergreifende und Wechselwirkungen in Betracht ziehende – Planung notwendig, die begrenzte technische und finanzielle Mittel und Infrastrukturen berücksichtigt.

- Permanente geologische CO₂-Speicher werden auf kurz- bis mittelfristig in Deutschland onshore wie offshore nicht in beliebigem Ausmaß marktverfügbar sein. In der viel genutzten deutschen AWZ bestehen zudem Flächenkonkurrenzen (Bellona 2025c). Abgeschiedenes CO₂ muss voraussichtlich in relevantem Maß exportiert werden (Bellona 2025b). Als Flaschenhals zeichnen sich auch Transportinfrastrukturen ab. Damit weist die CO₂-Infrastruktur – zumindest bis zur Mitte der 2030er-Jahre – die Charakteristika eines knappen Gutes auf.
- Die Bedarfsorientierung ist notwendig, um vorausschauend zu planen und Investitionsumfänge gut bestimmen und lenken zu können. So können Kosten begrenzt und die Wirtschaftlichkeit von Emissionsreduktion und CCS-Nutzung besser abgewogen werden. Eine Bedarfsplanung zeigt auf, welche Maßnahmen in Kombination miteinander umgesetzt werden müssen – oftmals ist es nicht eine Universallösung, sondern erst das Zusammenspiel mehrerer Maßnahmen, das eine Zielerreichung ermöglicht.
- Längere Zeit wurde (und wird in Teilen noch immer) CCS als klimaschädliche Scheinlösung diskreditiert. Diese [Analyse ist in ihrer Pauschalität irreführend](#). Gleichzeitig dürften überzogene Erwartungen an CCS – ähnlich wie beim Wasserstoff (Odenweller und Ueckerdt 2025) – Vertrauen zerstören und wären nicht investitionsförderlich. Übersteigerte Erwartungen könnten dazu führen, dass zunächst unbequemer erscheinende Maßnahmen unnötig aufgeschoben werden. Deswegen muss realistisch geplant und erfasst werden, welche Mengen CO₂ zur Speicherung anfallen.
- CCS ist kein Selbstzweck. CCS sollte auf Anwendungen konzentriert werden, die auch nach Berücksichtigung der Wechselwirkungen im System einen deutlichen Klimanutzen haben – dort aber umso zügiger vorangetrieben werden.
- Politisch zunehmend limitierte Ressourcen erfordern generell eine stärkere Priorisierung von Klimaschutzprojekten auf Grundlage ihres Klimanutzens (Bellona Deutschland 2026).



Das Europäische Klimaschutzgesetz erfordert Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Diese soll durch Klimaschutzziele für 2035 im Rahmen der Nationally Determined Contributions (NDCs), sowie einem EU-weiten Ziel für 2040 ermöglicht werden. Dafür ist eine Emissionsreduktion von 90 % vorgesehen, die eine Einbindung von internationalen Emissionszertifikaten im Umfang von bis zu 5 % gegenüber 1990 erlaubt (Europäische Union 2026). Auf Deutschland bezogen lässt das eine Einbindung von internationalen Emissionszertifikaten im Umfang von jährlich über 60 Mt CO₂eq ab dem Jahr 2040 zu. Dies sind ein Großteil der 2040 zu erwartenden Emissionen (siehe [Vergleich Szenarien 2045](#)). Allerdings ist völlig offen, ob diese Mengen mit für permanente Entnahme und ökologischer Verträglichkeit erforderlichen hohen Standards auch tatsächlich realisiert und von internationalen Projekten bezogen werden können – zumal auch andere Länder solche Hoffnungen hegen und den internationalen Bedarf dadurch weiter steigern werden. Auch sind die standardabhängigen Preiserwartungen unklar.

Das deutsche Klimaschutzgesetz (Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 2019) strebt Klimaneutralität bis 2045 und Netto-Negativemissionen nach 2050 an (KSG § 3). Dafür beschreibt es jährliche Minderungsziele wie das Emissionsreduktionsziel von – 88 % gegenüber 1990 bis 2040 und Jahresemissionsmengen für die einzelnen Sektoren bis einschließlich 2030 (KSG Anlage 2a). Darüber hinaus legt es nach § 3a eine Erhöhung und Stabilisierung der Senkenleistung im Landnutzungs-, Landnutzungsänderungs- und Forstwirtschaft-Sektor (LULUCF) von – 40 Mt CO₂eq im Jahr 2045 fest. Die übergeordnete Rolle der natürlichen Senken und deren Beitrag zum Klimaschutz soll durch „technische Senken“ nach § 3b ergänzt werden. Dazu will die Bundesregierung eine Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) verabschieden, die ein Ziel für den Beitrag der technischen Senken festlegen soll.

Mit dem Kohlendioxid-Speicherungs- und Transportgesetz (Gesetz zur dauerhaften Speicherung und zum Transport von Kohlendioxid 2012) (KSpTG) wird die Errichtung von Kohlendioxid-Speicherstätten zur kommerziellen Nutzung im industriellen Maßstab auf dem Festlandsockel sowie innerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) ermöglicht, wobei Meeresschutzgebiete und der weit überwiegende Teil des Küstenmeeres ausdrücklich von der CO₂-Speicherung ausgeschlossen sind. Gleichzeitig erhalten die Bundesländer die Möglichkeit, eine Speicherung an Land nach dem „Opt-in-Prinzip“ zuzulassen. Zudem wird festgelegt, dass Bau, Betrieb und wesentliche Änderungen von CO₂-Pipelines und Speichieranlagen grundsätzlich von überragendem öffentlichem Interesse sind. Emissionen aus der Kohleverstromung werden vom Zugang zum CO₂-Pipelinennetz ausgeschlossen. Ergänzend sind Regelungen enthalten, die Verfahren und Genehmigungen für den Aufbau der CO₂-Infrastruktur beschleunigen.

Beim Auftreten von gesellschaftlichen, politischen oder wirtschaftlichen Verwerfungen ist aktuell häufig ein räumliches, sektorales oder zeitliches Verschieben essenzieller Maßnahmen zu beobachten, verbunden mit der Hoffnung, dass diese so schneller und unkompliziert umgesetzt werden können. Dadurch weitet sich die Schere zwischen abstrakt bekundeter Ambition und real umgesetzten Maßnahmen.

1.2. Szenarienvergleich der Emissionen in 2045

Mittlerweile existieren eine Reihe von Szenariostudien, die Wege zur nationalen Netto-Klimaneutralität bis 2045 beschreiben und mit entsprechenden Modellierungen hinterlegt sind. Alle diese Studien gehen davon aus, dass auch im Jahr 2045 noch Treibhausgasemissionen anfallen. Diese werden je nach Szenario in jeweils unterschiedlicher Weise kompensiert. Emissionen fallen 2045 laut diesen Studien hauptsächlich in der Landwirtschaft, in Teilen der Industrie und der Energie- und Abfallwirtschaft an. Hierbei handelt es sich teilweise um Prozessemissionen, die nicht durch den Wechsel zu erneuerbaren Energien vermieden werden können.

Der Mittelwert der 2045 in Deutschland anfallenden Emissionen der betrachteten Studien beträgt ohne die Nutzung von CCS ca. 71 Mt CO₂eq. Ein Vergleich der Studien zeigt, dass die Prognosen zu Emissionswerten von unterschiedlichen Annahmen und Definitionen geprägt werden. So führen verschiedene Annahmen über zukünftige Entwicklungen etwa des Fleischkonsums, der Bevölkerungszahl, des Wirtschaftswachstums oder landwirtschaftlicher Anbaumethoden zu Abweichungen. Dadurch sind die Definitionen für schwer vermeidbare- bzw. unvermeidbare- und Restemissionen nicht trennscharf. Die 2045 zu erwartenden Emissionen weichen in den betrachteten Studien deutlich voneinander ab und bewegen sich zwischen 48 Mt in UBA-CARESupreme (UBA, 2025a) und 90 Mt beim KSG 2045-Szenario (Forschungszentrum Jülich 2022).

Voraussetzung für den niedrigen Wert beim UBA sind optimistische Annahmen, wie ein sich sehr stark und schnell veränderndes Verhalten bei Ernährungsweisen, die Senkung von Emissionen aus der Landwirtschaft durch Abbau der Tierbestände und sehr hohe Material- und Energieeffizienz. Solche Veränderungen sind zwar aus Klimaperspektive erstrebenswert, die Robustheit ihrer Realisierbarkeit muss jedoch infrage gestellt werden.

Ariadne kommt auf mittlere Emissionen von 58 Mt unter der Voraussetzung einer deutlichen Reduktion der Tierbestände. Die Autor:innen betonen, dass „diese Abschätzungen (...) als untere Grenze zu verstehen [sind]“, die nur unter ambitionierten Annahmen zu erreichen sind. Dazu gehören zusätzlich ein verbessertes Abfallmanagement, die Vermeidung sämtlicher energiebedingter Emissionen und effizienterer Düngemiteleinsatz. In einem weniger optimistischen Szenario geht Ariadne von bis zu 71 Mt CO₂eq Emissionen ohne die Nutzung von CCS aus (Kopernikus-Projekt Ariadne 2021).

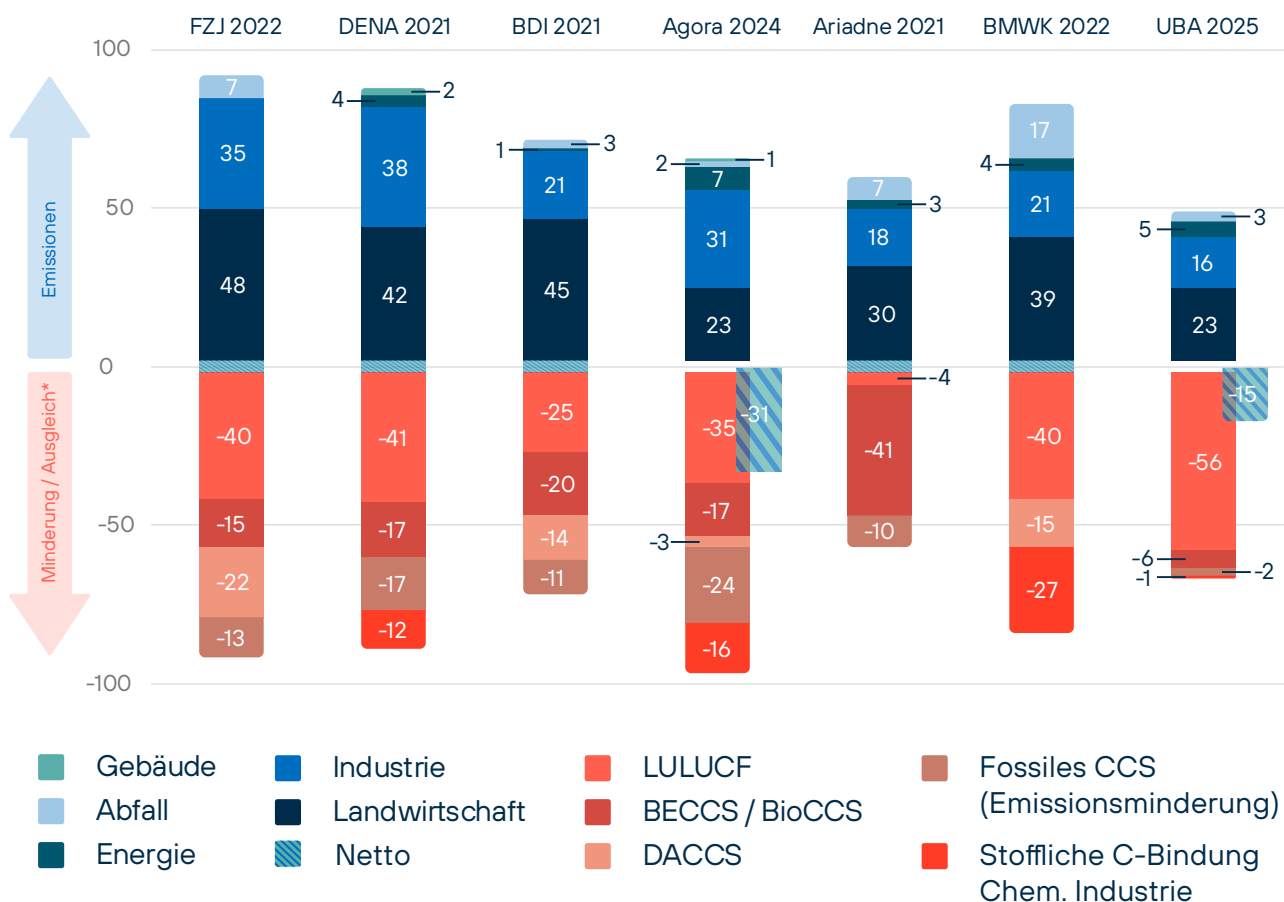
Für alle Studien ist zu betonen, dass die Autor:innen ihre Annahmen als eher optimistisch bis sehr optimistisch ansehen. Das Ambitionsniveau ist aus Sicht der Wissenschaftler:innen besonders im LULUCF-Sektor und bei Verhaltensannahmen oft deutlich höher als aktuelle Trends es nahelegen (Wehnemann u. a. 2026). Die stark von den jeweiligen Annahmen geprägte Höhe der 2045 verbleibenden Emissionen ist relevant für den modellierten Einsatz der verschiedenen Arten von CCS sowie chemischem Recycling, Carbon Capture and Utilization (CCU) und natürliche Senken.

Der Abfallsektor etwa umfasst im Wesentlichen Emissionen aus der Abfalldeponierung, Abwasserbehandlung und Bioabfallbehandlung. Die Emissionen aus der energetischen Nutzung von Abfällen werden in den Studien (außer bei Fraunhofer ISI et al.) im Energie- oder Industriesektor bilanziert oder aufgrund umfangreicher (Bio)CCS-Aufrüstung mit Negativemissionen verrechnet (dena 2021). Emissionen im Energiesektor können daher von nicht-biogenen Emissionen aus der Abfallverbrennung (Agora Think Tanks 2024; dena 2021; UBA 2025a) oder von flüchtigen Emissionen aus der Handhabung und Erzeugung von Biokraft- und Biobrennstoffen sowie bei Power-to-Liquid- (PtL) und Power-to-Gas- (PtG) Prozessen (BDI 2021) stammen. Emissionen aus der energetischen Nutzung von Abfällen in der Industrie, etwa zur Prozessfeuerung (UBA 2025a), als Ersatzbrennstoff in der Grundstoffindustrie (Fraunhofer ISI u. a. 2022) oder zum Eigenbedarf in Industriekraftwerken (BDI 2021) werden in den Studien teilweise dem Industriesektor zugerechnet.

Bei dieser Betrachtung existieren methodische Herausforderungen: 1) Die in den Studien verwendeten Modelle müssen teilweise kombiniert werden (etwa Ariadne; BMWK) oder stützen sich aufeinander (etwa Jülich auf BDI und Agora). 2) Die Systemgrenzen der Studien sind unterschiedlich

gesetzt und Technologien werden in Kategorien gruppiert. Konkret unterliegt der Vergleich folgenden Limitationen: Der BDI unterscheidet teilweise nicht zwischen der Speicherung in geologischen Lagerstätten (CCS) und der permanenten stofflichen Nutzung (CCU) von CO₂. Von 34 Mt CO₂, welche laut der dena-Studie 2045 durch technische Abscheidung (BECCS und fossiles CCS) adressiert werden, werden 24 Mt in die tiefegeologische Speicherung überführt und 10 Mt genutzt, ohne den Ursprung des CO₂ (fossil oder biogen) zu differenzieren. Negativemissionen aus chemischen Produkten (ca. 12 Mt) stammen in dieser Studie aus grünem Naphtha und Methanol, welches hauptsächlich mit importiertem CO₂ hergestellt wird. Im Gegensatz dazu rechnet Fraunhofer ISI im TN45-Strom Szenario damit, dass das gesamte abgeschiedene CO₂ aus der Kalk- und Zementindustrie sowie aus der Abfallverbrennung (ca. 30 Mt CO₂) zur Herstellung von Chemikalien verwendet wird. Eine klare Trennung von CCS zur Reduktion von Emissionen in der Industrie und der stofflichen C-Bindung in der Chemieindustrie ist somit nicht möglich. In der Agora-Studie ist diese Trennung durch die Nutzung von nachhaltig bereitgestellter Biomasse als Kohlenstoffquelle für die Chemieindustrie möglich. Aufgrund solcher Bilanzierungsunterschiede ist der Studienvergleich grundsätzlich eher illustrativ, wobei davon auszugehen ist, dass die Studien einzeln auf fundierten Annahmen beruhen.

Emissionen ohne CCU/S sowie deren Minderung/Ausgleich 2045 (in Mt CO₂eq)



* Minderung oder Ausgleich durch fossiles CCS, stoffliche Bindung und Negativemissionen

Abbildung 1: Studienvergleich Emissionen ohne CCU/S sowie deren Reduktion/Ausgleich 2045. Fossiles CCS umfasst den Einsatz von CCS Technologien, um Emissionen fossilen Ursprungs in der Industrie und teilweise im Energiesektor abzuscheiden. BECCS/Bio-CCS meint CCS an Emissionsquellen biogenen Ursprungs. Stoffliche C-Bindung Chem. Industrie umfasst Negativemissionen, welche in chemischen Produkten (z. B. Naphtha, Olefine) gespeichert werden.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Agora Think Tanks, 2024; BDI, 2021; dena, 2021; Forschungszentrum Jülich, 2022; Fraunhofer ISI et al., 2022; Kopernikus-Projekt Ariadne, 2021; UBA, 2025a)

1.3. Szenarienvergleich zum CCS-Bedarf

Unterschiede liegen nicht nur in den Annahmen über zukünftige Emissionen, sondern auch in der Berechnung der Anteile von CCS sowie permanenten und natürlichen Senken (LULUCF). Bezüglich des Bedarfs an CCS und permanenten Senken reichen die Studienergebnisse von 9 Mt bei UBA CARE Supreme bis 51 Mt bei Ariadne (siehe [Abbildung 1](#)). Der Mittelwert beträgt ca. 35 Mt. Dem gegenüber wird die Senkenleistung im LULUCF-Sektor zwischen 4 Mt bei Ariadne bis 56 Mt bei UBA CARE Supreme angenommen. Die Studien ergeben einen Mittelwert von ca. 34 Mt, welcher unter dem Zielwert nach KSG § 3a von 40 Mt CO₂ liegt. Im Vergleich zu den anderen Studien stellt die Ariadne-Studie eine abweichende Betrachtung des LULUCF-Sektors an. Es wird argumentiert, dass die Senkenleistung des Sektors bereits in globalen Restbudgets berücksichtigt wird, weshalb dessen Verrechnung als Kompensation von Restemissionen eine Doppelzählung darstellen würde. Die Negativemissionen aus dem Sektor in der Studie werden durch zusätzliche Maßnahmen zur Steigerung der Kohlenstoffsенke erreicht, weshalb der Wert für den LULUCF-Sektor deutlich niedriger als in den anderen Szenarien ist.

Die betrachteten Studien sehen im LULUCF-Sektor – vor allem im Wald – ein großes Senkenpotenzial. Außer diesen Senken im LULUCF-Sektor wird auch der Nutzung und Einlagerung von biogenem Kohlenstoff durch Bio-CCS ein erhebliches Potenzial zugeschrieben. Erst in den vergangenen Jahren wurden die mittlerweile auftretenden klimabedingten Schäden des heimischen Waldes und die hierdurch stark herabgesetzte CO₂-Senkenwirkung klarer erkennbar (siehe [folgendes Kapitel](#)). Diese sind

CO₂-Senken

CO₂-Senken sind Systeme oder Prozesse, die Kohlendioxid (CO₂) aufnehmen und speichern. Grundsätzlich lassen sich CO₂-Senken danach unterscheiden, auf welche Weise und wie dauerhaft sie Kohlenstoff binden und wo sie diesen speichern.

Natürliche Senken sind Ökosysteme wie Wälder, Böden und Ozeane, die durch biologische und chemische Prozesse CO₂ aufnehmen. Diese Senken sind oft nicht dauerhaft stabil, da sie durch Brände, Abholzung oder Klimaveränderungen wieder CO₂ freisetzen können.

Grundsätzlich ist hier weiter zu unterscheiden zwischen der natürlichen Senkenleistung von Ökosystemen und der CO₂-Entnahme durch naturbasierte aber durch menschliche Intervention bestimmte Prozesse zur Steigerung der Senkenleistung. Erstere können wir versuchen zu bewahren, und sie sind dezidiert kein CDR. Naturschutzmaßnahmen allein haben hierauf aber unter anderem aufgrund der voranschreitenden Erderhitzung begrenzten Einfluss. Letztere sind entweder Wiederherstellungsmaßnahmen wie z. B. Aufforstungsprojekte oder landwirtschaftliche Tätigkeiten, mit welchen aktiv der Bodenkohlenstoffgehalt erhöht wird.

Permanente bzw. technische Senken umfassen vom Menschen entwickelte, in der Regel physikalische oder chemische Verfahren zur CO₂-Entnahme wie Direct Air Capture oder die Abscheidung und Speicherung von CO₂ aus Industrieprozessen, im Umfang des Beitrages, der auf den biogenen Anteil entfällt.

Nicht alle Methoden können allerdings trennscharf einer Kategorie zugeordnet werden, wie dies unter anderem bei biomass burial oder manchen Einsatzbereichen von Pflanzenkohle der Fall ist.

Bei permanenten Senken wird das abgeschiedene CO₂ langfristig und möglichst irreversibel gespeichert, zum Beispiel in geologischen Formationen oder durch Mineralisierung.



deswegen in den betrachteten Studien teilweise überschätzt.

Die Verwendung von CCS wird von allen Studien zur Erreichung der Klimaziele modelliert. Wenn- gleich auch hier weiter zwischen fossilem CCS, BECCS und DACCS zu differenzieren ist, erfordern diese Methoden allesamt geologische Speicherstätten und entsprechende Infrastrukturen. Direct Air Capture (DACCS) spielt in der Hälfte der Studien eine Rolle.

Der errechnete Bedarf sowohl für das Vermeiden fossiler Emissionen durch CCS als auch für die CO₂-Entnahme von atmosphärischem oder (mittelbar ebenfalls atmosphärischem) biogenem CO₂ hängt mit Annahmen über die Senkenleistung des LULUCF-Sektors sowie angenommenen Emis- sionen – und damit Prämissen der wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung der Gesellschaft – zu- sammen. Deshalb kommt es zu abweichenden Ergebnissen. Diese Werte weisen auf methodische Unterschiede der Studien (siehe oben) aber auch die systematische Unsicherheit über die zukünftig verwendeten Technologien und ihre jeweilige Verfügbarkeit hin.

Dass die Studien trotz teils sehr ambitionierter Annahmen mit CCS und permanenten Senken im Umfang von durchschnittlich ca. 35 Mt rechnen, verdeutlicht, dass diese absolut notwendig für die erforderliche Erreichung von Klimaneutralität in 2045 sind.

1.4. CO₂-Entnahme: LULUCF und Negativemissionen

Potenziale und Unsicherheiten

Das deutsche Klimaschutzgesetz hebt die Rolle der natürlichen Senken für die CO₂-Entnahme (KSG §3a) und damit für die Erreichung der Klimaneutralität hervor. In seiner jetzigen Architektur sollen „technische“ Senken, wie DACCS oder Bio-CCS, den Beitrag der natürlichen CO₂-Entnahme ergänzen. Wird der Beitrag der natürlichen Senken nach §3a mit 40 Mt CO₂-Entnahme 2045 anvisiert und 71 Mt CO₂eq Emissionen angenommen (siehe [Abbildung 1](#)), bräuchte es demzufolge 31 Mt CO₂ an CCS und permanenter CO₂-Entnahme.

Ein Grundproblem für die deutsche Klimapolitik ergibt sich aus dem aktuellen Zustand der natürlichen Senken, sowie der prognostizierten, potenziell stark negativen Effekte des Klimawandels auf diese. Nach aktuellen Prognosen ist eine Zielerreichung im LULUCF-Sektor zwar nicht ausgeschlossen, zumindest aber sehr herausfordernd (Wehnmann u. a. 2026). Damit ergibt sich ein Dilemma für die deutsche Klimapolitik (Loose 2025), weil die natürliche CO₂-Entnahme möglicherweise nicht das bisher erhoffte Potenzial erreicht und damit der Bedarf für permanente CO₂-Entnahme mit der Zeit ansteigen könnte. Die Unsicherheit der LULUCF-Zielerreichung hat erhebliche Auswirkungen auf die Bedarfe für permanente CO₂-Entnahme und, in der Folge, deren Erreichbarkeit. Denn theoretisch müssten entweder verstärkte Emissionseinsparungen den nicht erreichten Anteil der natürlichen Senken erbringen, oder diese müssten durch ein Mehr an permanenten Senken ausgeglichen werden. Da sich aber einige Emissionen nach heutigem technischem Stand nicht durch Emissionsminderung senken lassen, bräuchte es zukünftig die Flexibilität, den Beitrag der permanenten CO₂-Entnahme zu erhöhen.

Trotz Unsicherheit in der Zielerreichung des LULUCF-Sektors sind für beide Bereiche Zielsetzungen wichtig, welche die notwendige Planungssicherheit, Investitionen und Umsetzung von Maßnahmen ermöglichen. Dafür sollte das LULUCF-Ziel nach KSG §3a erhalten bleiben und zügig ein Ziel für „technische“ CO₂-Entnahme in § 3b KSG verankert werden. Eine Maximierung natürlicher CO₂-Senken kann ohne breitere Nachhaltigkeitsberücksichtigung auch dem Naturschutz zuwiderlaufen. Wenn aber allgemeine Natur- und Biodiversitätsschutzkriterien beachtet werden, bietet der natürliche Klimaschutz mehr positive Zusatzeffekte als die technische CO₂-Entnahme und sollte daher auch bei prognostizierter Zielverfehlung für den Erhalt sowie Ausbau von Biodiversität und Ökosystemleistungen und die Resilienz der Ökosysteme weiterverfolgt werden.

Ein zweites fundamentales Problem lässt sich in einer potenziellen Überschätzung des Potenzials derjenigen CO₂-Entnahme-Technologien finden, die Biomasse für die Umwandlung in Energie und/oder Chemikalien (Bio-CCS) nutzen (Preston Aragonès 2022). Diese umfassen eine Bandbreite an Technologien (Wollnik u. a. 2023). Die größten Potenziale werden bislang insbesondere für die energetische Nutzung von biomassebasierten Feststoffen sowie von Biogas mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) modelliert. Künftig wird zusätzlich ein zunehmendes Potenzial aus Paludikulturen erwartet (Sadr u. a. 2024). Die zugrundeliegenden Modelle, welche auf Kostenoptimierungen beruhen, haben eine Schwachstelle: Sie können den (monetären) Wert von naturbasierter CO₂-Entnahme für die Gesellschaft nur begrenzt in ihrer Mehrdimensionalität (Wert der Biodiversität, weiterer Ökosystemleistungen sowie der Klimaanpassung der Ökosysteme¹) abbilden. Außerdem fließt die Begrenztheit der Biomasse teils ungenügend ein. Damit werden die Zielkonflikte zwischen der Nutzung der Biomasse im Energiesystem und ihrem Verbleib in Ökosystemen nur anhand einer begrenzten Perspektive auf den Klimaschutz abgebildet. Häufig genutzte Modelle zu Potenzialeinschätzungen für BECCS kommen zu generell zu hohen Werten. Das Potenzial laut Sadr et. al. (2024) von ca. 60 Mt CO₂ wird um über 50 % reduziert, wenn die Potenzialeinschätzung auf „nachhaltig“ verfügbarer Rest- und Abfall-Biomasse beruht. (Thrän u. a. 2025)

Aus beiden Problemen ergeben sich Fragen an die Steuerung der Bedarfe für permanente und naturbasierte CO₂-Entnahme, sowie deren Zielerreichung. Darüber hinaus stellen aber auch die Kosten von permanenter Entnahme und der kurz- bis mittelfristige Hochlauf zentrale Unsicherheiten dar. Ohne in naher Zukunft realisierter Nachfrage nach CO₂-Entnahme rücken ambitionierte Annahmen in den Szenarien in weite Ferne. Zudem wird deutlich, dass weitgehende Emissionsreduktionen durch die Unsicherheiten der CO₂-Entnahme der wichtigste Schritt für die Erreichung der Klimaziele bleiben.

1 Die Modellierungen liefern wichtige und valide wissenschaftliche Ergebnisse. Den Wert der naturbasierten CO₂-Entnahme können sie nicht oder nur eingeschränkt abbilden, weil sich dieser schwer ermitteln lässt, auch wenn es dazu partielle Forschungsergebnisse gibt.

Maßnahmen zur Erreichung der Ziele

1. Für die Ziele des natürlichen Klimaschutzes sollte die **Maxime des Vorsorgeprinzips gelten und ein möglichst hohes CO₂-Entnahme-Potenzial unter Berücksichtigung von Natur- und Biodiversitätsschutz angestrebt werden**, da die damit einhergehenden Synergien mit der Renaturierung von Ökosystemen, der Biodiversität und weiterer Ökosystemleistungen unbezahlbar für die Gesellschaft sind. Die Restaurierung von Ökosystemen und die Umsetzung von Maßnahmen, die auch die Fähigkeit der Ökosysteme steigern, Kohlenstoff zu binden und sich an den Klimawandel anzupassen, schaffen wertvolle Co-Benefits (Herold u. a. 2025).
2. Es ist notwendig, **Biomasse** für Anwendungen **zu priorisieren**, die den höchsten Klima- und Umweltnutzen haben. Damit geht eine Verwertungshierarchie einher, bei der Biomasse erst langlebig stofflich und ganz am Ende energetisch/für Negativemissionen mit CCS genutzt wird. Hierfür sollte eine **Biomassestrategie** mit einer klaren Definition nachhaltiger Biomasse Orientierung vorgeben.
3. Für eine Steigerung des Klimanutzens der Biomasse ist eine **ambitionierte Umsetzung der Kreislaufwirtschaft** und des Rohstoffrecyclings wichtig. Regional könnten verstärkt Kaskadennutzungen aufgebaut werden, die den in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoff so lange wie möglich in Kreisläufen halten. Eine Mehrfachnutzung der Biomasse sowie eine verbesserte Mülltrennung und -sortierung kann daneben den biogenen Anteil in der Abfallverbrennung und damit künftige Bedarfe für CCS senken.
4. Es braucht eine **Modernisierung der forstlichen Governance** (inkl. Bundeswaldgesetz, Aktionsprogramm natürlicher Klimaschutz (ANK) und forstliche Förderung) und die Erstellung eines Moorschutzgesetzes. Zudem muss die nationale Umsetzung der RED III zeitnah erfolgen.
5. **Die Elektrifizierung der Wärme sollte gefördert** werden, um die nötige Menge an Abscheidung an anderer Stelle zu mindern. Gleichzeitig können dadurch Potenziale für die stoffliche Nutzung erhöht werden.
6. LULUCF-Ziele müssen erhalten und in der **LNe mit Zielen für technische CO₂-Entnahme** sinnvoll kombiniert werden, um ein ausreichendes Maß an natürlicher CO₂-Bindung und permanenter CO₂-Entnahme zu erreichen.
7. Das **Carbon Removals Certification Framework der EU** (CRCF) sollte auf die Erreichung netto-negativer Emissionen und eine positive Klimawirkung ausgerichtet werden, statt auf das Potenzial der CO₂-Entnahme und die Kosteneffektivität.
8. **Nachfrage nach CO₂-Entnahme** muss zeitnah sichergestellt werden, um den erforderlichen Aufwuchs von Entnahmekapazitäten anzureizen.
9. Um die Bedarfe für CO₂-Entnahme besser bestimmen und erreichen zu können, braucht es eine verbesserte **Bilanzierung** und ein verbessertes Monitoring.

Maßnahmen zur Erreichung der Ziele

1. Der Erhalt und Ausbau der natürlichen CO₂-Entnahme muss stärkere politische Priorität werden. Eine Umsetzung von Maßnahmen im LULUCF-Sektor benötigt eine größere Mittelausstattung. Durch die **Förderung von weiteren Maßnahmen des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz** können bisher nicht prognostizierte CO₂-Entnahme-Potenziale in Umsetzung gebracht werden (Herold u. a. 2025).
2. Das geplante deutsche **Ankaufprogramm für CDR** plus die gut 90 Mio. Euro für **Subventionierung** in 2026 sind ein erster wichtiger, wenngleich noch zu gering gestalteter Schritt, um die Nachfrage nach CO₂-Entnahme sicherzustellen und die Unsicherheit zu mindern, der Kapazitäten aufbauende Unternehmen ausgesetzt sind.
3. Auch die **Mittel der gemeinsamen Agrarpolitik (GAP)** müssen stärker auf umwelt- und klimaverträgliche Landbewirtschaftungspraktiken ausgerichtet werden
4. Gleichzeitig braucht es ein **faire Marktbedingungen** für die energetische Biomassennutzung, die aktuell (etwa bei der energetischen Nutzung von Primärholz bei der EE-Quote) subventioniert wird, um einer monetären Bevorteilung von BECCS gegenüber stofflicher Nutzung und natürlichem Klimaschutz vorzubeugen (European Scientific Advisory Board on Climate Change 2025).

Bilanzierung und Berichterstattung



Um den Klimanutzen der Biomasse in Ökosystemen und in der Verwendung in Negativemissionstechnologien (NETs) besser abbilden zu können, wird eine verbesserte THG-Bilanzierung benötigt. Die aktuelle THG-Berichterstattung schreibt alle Emissionen der Nutzung der Biomasse dem LULUCF-Sektor zu. Dadurch werden sie irreführenderweise als emissionsfrei in der Verwendung in den Sektoren Verkehr, Industrie und Gebäude gewertet. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Nutzungsniveau und Kohlenstoffbilanz der Ökosysteme, die den Zielen des §3a des KSGs unterliegen, nur unzureichend abgebildet. In Konsequenz steht beispielsweise der hohe Anteil der Biomasse in der energetischen Nutzung im Gebäudesektor aktuell und künftig den Zielen des natürlichen Klimaschutzes entgegen (Wehnermann u. a. 2026).

Es braucht allgemein bessere und zeitlich aktuellere Daten zu THG-Bilanz der Ökosysteme, und Indikatoren, die in Bezug auf unterschiedliche Ökosysteme zeigen können, wo der Einsatz der verschiedenen Biomassen für den Klimaschutz die beste Wirkung hat. Dazu gehört eine ausgeweitete Bilanzierung, die einen Vergleich zwischen BECCS und der natürlichen CO₂-Entnahme auch anhand von deren Funktionen für die Klimaanpassung und weitere Ökosystemleistungen ermöglicht. Der ganze Lebenszyklus der Biomasse muss mit robusten und transparenten Indikatoren und Daten berechnet werden.

1.5. Systemische Minderungsoptionen für den CCS-Bedarf

Der CCS-Bedarf in Deutschland lässt sich durch eine Kombination technischer, politischer und wirtschaftlicher Maßnahmen minimieren. Diese bedingen sich, teilweise stehen sie aber auch im Gegensatz zueinander. Die Verfügbarkeit von Biomasse als Rohstoff für Bioplastik steht zum Beispiel im Nutzungskonflikt zur Nutzung für BECCS oder der LULUCF-Senke. In Abbildung 2 sind einige Minderungsmöglichkeiten sowie ihr möglicher Beitrag zur Emissionsreduktion dargestellt. Die Darstellung deutet an, dass optimistische Annahmen getroffen werden. Es ist davon auszugehen, dass z. B. aufgrund limitierter Ressourcen (Wei u. a. 2025) nicht alle Maßnahmen ihre Möglichkeiten ausschöpfen, und es steht zu befürchten, dass einzelne Potenziale komplett entfallen.

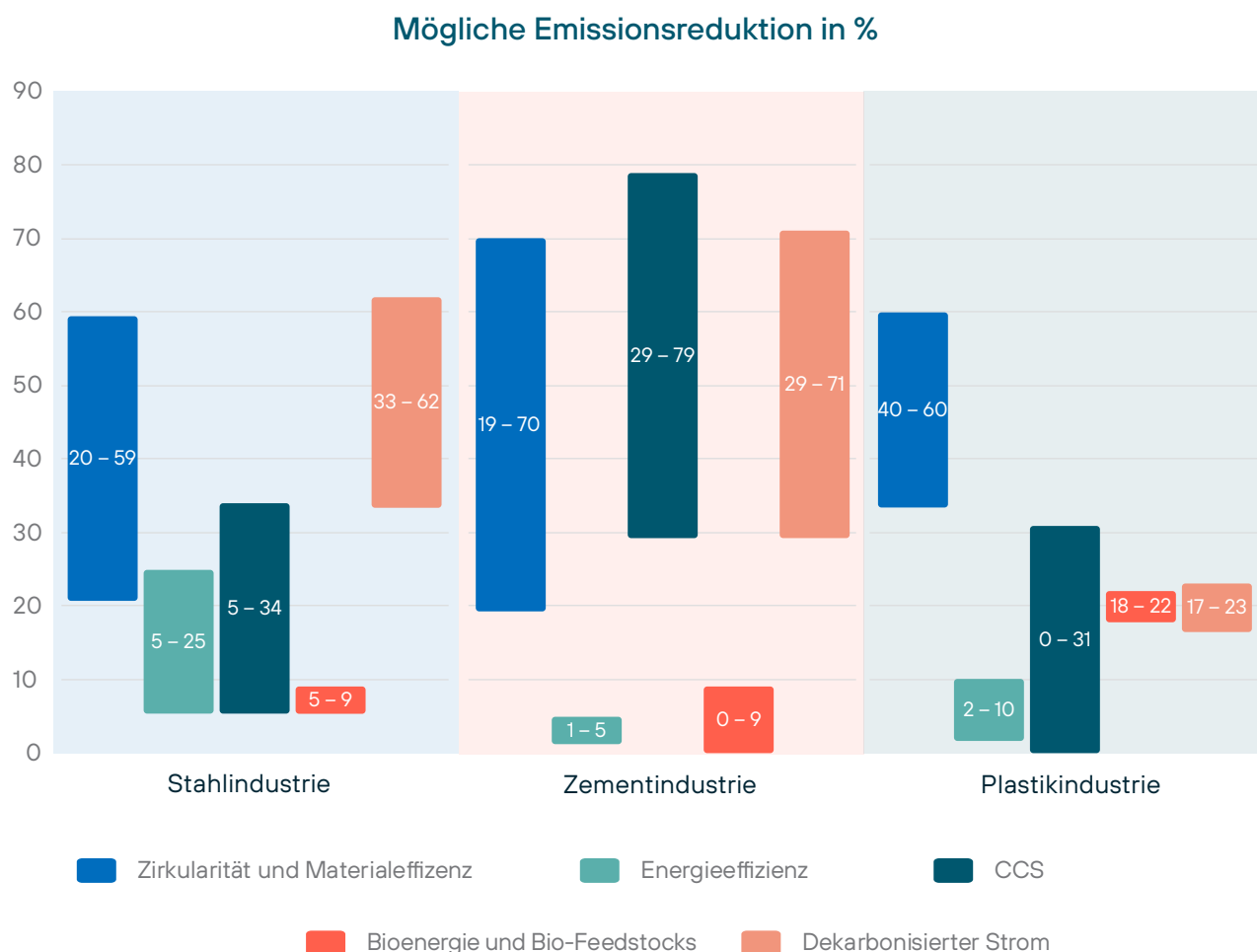


Abbildung 2: Mögliche Emissionsreduktion in % der heutigen Emissionen des Sektors (verschiedene Basis- und Zieljahre). Die Balken stellen jeweils Spannen von Literaturwerten aus genannten Veröffentlichungen und deren Szenarien dar. IPCC bezieht sich fast ausschließlich auf Werte von Material Economics.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Agora Industrie, Systemiq, 2023; Bashmakov et al., 2022; Material Economics, 2019)

1.5.1. Energie und Elektrifizierung

Potenziale und Unsicherheiten

Erneuerbarer Strom in Verbindung mit Effizienzmaßnahmen, Elektrifizierung und der Umwandlung in grünen Wasserstoff (für schwer zu vermeidende Emissionen) bietet ein enormes Dekarbonisierungspotenzial und eine direkte Bedarfsreduktion von CCS. Neben der Nutzungsseite (Elektrifizierung) ist die erneuerbare Stromproduktion (EE-Ausbau) sowie die europäische Vernetzung elementar. Hierdurch sinkt der Bedarf an fossilen Energieträgern sowohl im Stromsektor als auch in den Abnahmesektoren wie der Industrie, für welche andernfalls CCS als einzige Minderungsoption übrig bleiben würde (Reigstad u. a. 2021). Auch die International Renewable Energy Agency (IRENA 2022) skizziert Szenarien, in denen ein hoher Anteil von erneuerbaren Energien den gesamten Energiebedarf senkt, unter anderem in der Industrie.

Um diese Potenziale zu heben, müssten allerdings erhebliche zusätzliche Mengen erneuerbaren Stroms bereitgestellt werden. Daher ist es neben dem ambitionierten Ausbau elementar, den produzierten erneuerbaren Strom möglichst effizient zu nutzen.

Im Stromsektor dürfte der Beitrag von CCS zur Dekarbonisierung insgesamt begrenzt bleiben. Speziell die Konkurrenz durch andere Technologien, wenige Volllaststunden bei verbleibenden thermischen Kraftwerkskapazitäten sowie ein geringes CO₂-Vermeidungspotenzial im perspektivisch deutlich kleineren Kraftwerkspark sprechen gegen eine umfassende Anwendung von CCS im Stromsektor (E3G und Bellona 2026). Mit dem weiteren Ausbau erneuerbarer Energien verändert sich die Rolle thermischer gasbasierter Stromerzeugung grundlegend: Sinkende Volllaststunden und damit fallende Kapazitätsfaktoren führen dazu, dass Gas immer weniger und wenn nur als Spitzen- und Ausgleichstechnologie zur Systemsicherung in Perioden geringer erneuerbarer Einspeisung („Dunkelflaute“) eingesetzt wird. Zugleich stellen hierfür neben dem europaweiten Netzausbau Energiespeicher wie vor allem Batterien und z. T. thermische Speicher zunehmend stärker werdende Alternativen dar – auch wenn Batteriespeicher (anders als z. T. große thermische Speicher in der Fernwärme und ggf. Redox-Flow-Batterien) mindestens in absehbarer Zukunft keine Lösung für längere Dunkelflauten und die saisonale Speicherung von Energie bieten werden. Unter diesen Bedingungen steigen die spezifischen Kosten von CCS je vermiedener Tonne CO₂ deutlich an.

Ein wirtschaftlich sinnvoller Einsatz von CCS an Gaskraftwerken ist daher nur bei hohen Auslastungsgraden gegeben. Diese können allenfalls dort entstehen, wo langfristige Abnahmeverträge zu Preisen oberhalb des Strommarktniveaus bestehen, etwa an einzelnen Industriestandorten insbesondere im industriellen Verbund wie im Chemie- oder Raffineriepark. In der Breite erscheint der Einsatz von CCS für fossile Grundlast-Kraftwerke hingegen weder kosteneffizient noch ist die Nutzung von dieser systemisch notwendig. Investitionen in heute lediglich „CCS-ready“ ausgelegte Kraftwerke sind vor diesem Hintergrund abzulehnen.

Zusätzlich ist der Klimanutzen von Gas-CCS stark von der Begrenzung vorgelagerter Emissionen abhängig. Insbesondere Methanemissionen entlang der Lieferketten können den Klimabeitrag erheblich mindern. Vor diesem Hintergrund ist CCS im Energiebereich vor allem dort relevant, wo dauerhaft hohe Auslastungen vorliegen und eine reale Emissionsminderung erzielt wird – und auch hier gibt es starken Wettbewerb durch die erneuerbaren Energien. Für verbleibende, nicht vermeidbare Emissionen aus der Gasverstromung aus Kraftwerken mit niedrigen Kapazitätsfaktoren ist langfristig davon auszugehen, dass diese – sofern verfügbar und kosteneffizient – durch CO₂-Entnahme ausgeglichen werden.

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. Durch die **Kopplung, Vernetzung und Digitalisierung** der Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie lassen sich Lastspitzen glätten und erneuerbare Überschussleistung besser nutzen. Dafür ist anhand von Smartmetern, flexiblen Netzentgelten, des europäischen und deutschen Netzausbaus und Höherauslastungen (VDE 2024) ein geeignetes Umfeld für intelligente elektrische Lasten und Einspeiser wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen zu schaffen.
2. Wenn **Speicher** (elektrisch wie thermisch) zügig ausgebaut werden, verringert sich die Notwendigkeit, Kraftwerke dauerhaft mit Wasserstoff oder gar CCS als „Backup“ oder zur Spitzenlastdeckung vorzuhalten. Hier verlaufen die technologischen Entwicklungen rasant.
3. Wenn Geräte, Prozesse und Gebäudehüllen effizienter werden, sinkt der Gesamtenergiebedarf. Anreize für **Effizienzmaßnahmen** können so die Inanspruchnahme neuer Kraftwerke deutlich verringern. Allein die wirtschaftlichen Stromsparerpotenziale der Industrie (außerhalb des Bereichs Wärme) liegen bei rund 33 % ihres jetzigen Strombedarfs, was 54 TWh/Jahr oder mehreren Gaskraftwerken entspricht. Die meisten dieser Einsparmaßnahmen (42 TWh) amortisieren sich innerhalb von drei Jahren (Meyer u. a. 2025). Was heute an fossiler Wärme in der Industrie eingespart wird, muss nicht elektrifiziert oder mit CCS nachgerüstet werden.
4. Die **Elektrifizierung der Wärme** im Energiesektor bietet ein großes Potenzial um CCS-Erfordernisse zu verringern. Die Wärmepumpe ist in Prozessen und für Wärmenetze, die Temperaturen unter 200 °C benötigen, schon jetzt wirtschaftlich. In anderen Bereichen wie der industriellen Prozesswärme bis ca. 1.000 °C können sich Anreize für eine hybride Wärmezufuhr mit Speichern rentieren (Rehfeldt und Fleiter 2024). Eine Elektrifizierung ist in vielen Fällen möglich (Future Cleantech Architects 2024a). So kann Wärme schon jetzt bei den ca. 2.500 Stunden im Jahr herrschenden niedrigen Strompreisen günstiger mit Strom erzeugt werden als mit Gas. Auch die Geothermie bietet ein großes Potenzial aus fossiler Wärme auszusteigen.
5. Die **Einführung eines Kapazitätsmechanismus**, um Zubau und Betrieb von steuerbaren Leistungen anzureizen und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, benötigt spezifische Ausschreibungen. Diese sollten Flexibilität und Speicher wie die sich technologisch derzeit schnell weiterentwickelnden Batteriespeicher anreizen und auf die Klimaziele einzahlen, um insbesondere Fehlanreize für einen übermäßigen Ausbau fossiler Gaskraftwerke zu vermeiden (Bellona Deutschland 2025).
6. Die **Umstellung von Gaskraftwerken** für Dunkelflauten auf Wasserstoff muss auf Fälle ohne andere Elektrifizierungsoptionen limitiert sein. Für Planungssicherheit sollte der fossile Gasausstieg einem klaren Zeitplan folgen und langfristige Lock-ins vermeiden. Generell sind mit „Wasserstoff-Readiness“ Risiken verbunden, da diese häufig mit unverbindlichen Versprechen oder ggf. nicht zu erfüllenden technologischen Hoffnungen einhergeht, die zu einem Lock-in in neue fossile Gasinfrastruktur führen können.
7. **Abfall und Biomasse sollte nur am Lebensende nach einer Kaskadennutzung** im Stromsektor eingesetzt werden. Hier ist der Einsatz von CCS aufgrund fehlender Alternativen und der Erreichung von Negativemissionen voraussichtlich sinnvoll (E3G und Bellona 2026).

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. Aufgrund unpassender Rahmenbedingungen müssen **erneuerbare Energien** mit einem effizienten Fördermechanismus über CfDs im Rahmen der EEG-Reform **weiterhin gefördert werden**. Diese sollten möglichst privatwirtschaftliche PPA nicht behindern und mit diesen kombinierbar sein.
2. Die Nutzung von Strom muss sich zukünftig mehr an der Verfügbarkeit von günstigen Erneuerbaren ausrichten. **Marktsignale** müssen dafür bei Verbraucher:innen und Einspeisenden ankommen. Neben günstigen Strompreisen gehören zu einem für die Elektrifizierung förderlichen Rahmen die Flexibilität und Berechenbarkeit von Netzentgelten und Strompreisen.
3. Kosteneffizientes netzdienliches Verhalten kann marktbasiert durch eine **Gebotszonenteilung oder lokale Knotenhandelsplätze** erreicht werden.
4. Für eine Dekarbonisierung ebenso wichtig ist ein **verlässlich ansteigender CO₂-Preis**.
5. Um den CCS-Bedarf im Energiesektor nicht zu erhöhen sind **wirtschaftliche Ausschreibungsbedingungen** notwendig. Gaskraftwerke mit CCS werden sich aufgrund hoher Investitions- und Betriebskosten ([Bellona Deutschland 2025](#)) voraussichtlich nicht als Dekarbonisierungstechnologie durchsetzen.
6. **Subventionen** sollten so gestaltet sein, dass sie nicht die energetische Verwendung von kohlenstoffhaltigen Ressourcen anreizen, sondern diese der stofflichen Nutzung zuführen und nicht biogenen erneuerbaren Energiequellen den Vorrang geben.

1.5.2. Wasserstoff

Potenziale und Unsicherheiten

Wasserstoff wird eine zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung von Sektoren spielen, die für eine direkte Elektrifizierung ungeeignet sind, insbesondere in der Industrie, in gewissem Umfang als Speichermedium für Strom zur Flexibilisierung des Stromnetzes und (in Form von Derivaten) im Flug- und Langstreckenschiffsverkehr.

Neben dem Einsatz als Roh- und Betriebsstoff in der Chemie- und Stahlindustrie hat Wasserstoff als sauber verbrennender Energieträger das Potenzial, weitere derzeit auf fossilen Energieträgern basierende Anwendungen zu dekarbonisieren. Wasserstoff kann fossile Brennstoffe beispielsweise zur Bereitstellung industrieller Prozesswärme ersetzen, insbesondere bei Hochtemperaturanwendungen über 500 °C, wenn dies mit Strom technisch, prozessual oder wirtschaftlich schwer möglich ist.

Heute wird Wasserstoff zu 99 % aus fossilem Erdgas über einen Prozess namens Dampfreformierung (grauer Wasserstoff) oder international auch aus Kohle durch Kohlevergasung gewonnen, vor allem für die petrochemische Industrie und die Ammoniaksynthese. Die Produktion von grauem Wasserstoff führt zu erheblichen Treibhausgasemissionen von ca. 2,5 % der globalen Treibhausgasemissionen (Future Cleantech Architects 2024b), sodass die derzeitige Produktion vielmehr eine Belastung für das Klima als eine Lösung darstellt. Diese Emissionen müssen dringend drastisch gesenkt werden.

Der Hochlauf einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft, die eine schnelle und tiefgreifende Dekarbonisierung unterstützt, erfordert jedoch Abwägungen und strategische Entscheidungen in Bezug auf Produktion, Verteilung und Nutzung. Sie ist aus heutiger Sicht nur über einen massiven Ausbau erneuerbarer Energien und Elektrolyseurkapazitäten sowie über den Import von Wasserstoff und dessen Derivaten zu erreichen. Der zusätzliche Strombedarf für Elektrolyse kann die Verfügbarkeit von Strom verknappen und Preiswirkungen entfalten, die Emissionsminderungen durch direkte Elek-

Kohlenstoffarmer Wasserstoff



„Kohlenstoffarmer“ Wasserstoff („low-carbon“) bezieht sich in der EU auf Wasserstoff aus jedem Produktionsverfahren, das eine Emissionsreduktion von mindestens 70 % gegenüber dem Vergleichswert für fossile Brennstoffe (94 g CO₂eq/MJ) gemäß der EU-Taxonomie erreicht. Solch kohlenstoffarmer Wasserstoff kann etwa über Elektrolyse mit erneuerbarem Strom (grüner Wasserstoff), Biomasse oder aus fossilem Gas mit CCS hergestellt werden.

Blauer Wasserstoff (aus Erdgas mit CCS hergestellt, also grauer Wasserstoff mit CCS) wird oft als Übergangslösung diskutiert. Allerdings verschiebt dieser Ansatz den CCS-Bedarf lediglich vom Anwendungsort, also z. B. dem Stahlwerk, zur Wasserstoffproduktion. Somit leisten die Produktion und Nutzung von fossilem blauem Wasserstoff also keinen unmittelbaren Beitrag zur Minderung des CCS-Bedarfs. Bei der Dampfreformierung (Steam Methane Reforming, SMR) von Erdgas entstehen weiterhin erhebliche CO₂-Mengen, die abgeschieden werden müssen. Die Abscheidungsraten können im besten Fall bei über 90 % liegen, was bedeutet, dass immer noch Restemissionen verbleiben. Zudem entstehen teils erhebliche Methanemissionen bei der Erdgasförderung und dem Transport, etwa per Flüssigerdgas (LNG), die die Klimabilanz weiter bisweilen drastisch verschlechtern. Die bislang weniger verbreitete Autotherme Reformierung (ATR) bietet in Kombination mit CCS dagegen das Potenzial fast vollständiger Emissionsvermeidung, so dass in diesem Fall nahezu nur die Vorkettenemissionen verbleiben (Peng u. a. 2025; Shahriari u. a. 2025).

trifizierung beeinträchtigen könnten. Dies ist insbesondere bei unzureichender erneuerbarer Stromerzeugung und zugehöriger Netzinfrastruktur zu erwarten. Außerdem gehen Produktion (derzeitige Wirkungsgrade bei ca. 80 %), Kompression und Transport des Wasserstoffs mit erheblichen Energieverlusten einher, sodass nur ein Teil der eingesetzten elektrischen Energie in Form von nutzbarem Wasserstoff erhalten bleibt. Hier sind im Weiteren verschiedene mögliche Nutzungspfade des Wasserstoffs zu unterscheiden. Eine thermische Wiederverstromung in Gaskraftwerken würde weitere erhebliche Verluste mit sich bringen. Ob hier aufgrund der absehbar stark abnehmenden Volllaststunden mit gut 60 % Wirkungsgrad zwar effizientere, aber aufwändigere GuD-Kombikraftwerke für Wasserstoff genutzt würden oder ob eher z. T. nur halb so effiziente einfachere, kostengünstigere Kraftwerkstypen zum Einsatz kommen würden, ist derzeit nicht abschließend zu klären, ebenso wie der eventuelle großskalige Einsatz stationärer Brennstoffzellen mit eigenen Herausforderungen hinsichtlich Kostendeckung. Der Einsatz von Wasserstoff im Bereich des landbasierten Verkehrs muss den Vergleich mit batterieelektrischen Antrieben bestehen, hier zeigen sich Wasserstoffsysteme als klar unterlegen. Hier wie auch im Bereich der Gebäudewärme ist zudem klar erkennbar, dass eine weitere Umwandlung von Wasserstoff in andere synthetische Brenn- oder Kraftstoffe mit derart großen weiteren Effizienzverlusten und resultierenden hohen Betriebskosten einhergeht, dass solch ein Einsatz außer in (unwirtschaftlichen oder andernfalls potenziell stark bezuschussten) absoluten Ausnahmefällen wirtschaftlich nicht tragfähig ist. Um effizienten Energie- und Investitionseinsatz zu gewährleisten, muss daher der Wasserstoffeinsatz unbedingt strikt am Klimanutzen ausgerichtet sein und gegen alternative Dekarbonisierungsoptionen sorgfältig aufgewogen werden. Wasserstoff wird in einem (weitgehend) klimaneutralen Energiesystem eine Rolle spielen und abhängig vom technologischen Fortschritt kann die Energieeffizienz ggf. auch auf ein verträgliches Maß gesteigert werden, bislang lassen sich derartige Entwicklungen noch nicht vorhersehen und verlässlich berücksichtigen.

In einem klimaneutralen Energiesystem sollte Wasserstoff idealerweise ausschließlich durch Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien (grüner Wasserstoff) hergestellt werden, denn diese Produktionsweise geht mit den geringsten Treibhausgasemissionen einher. Außerdem kann die Produktion von elektrolytischem Wasserstoff weitgehend systemdienlich erfolgen und so Stromsystemkosten senken. Derzeit behindern jedoch politische, finanzielle und systemische Herausforderungen eine schnelle Kapazitätserhöhung (Lagioia u. a. 2023). Daher wird in vielen Dekarbonisierungsstrategien auch allg. kohlenstoffarmem Wasserstoff Raum gegeben.

Blauer Wasserstoff könnte unter strengen Produktionsbedingungen zumindest mittelfristig helfen, die Lücke zwischen der begrenzten Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff und den erwarteten Bedarfen von ca. 670–1.200 TWh 2040 auf EU-Ebene (European Hydrogrn Observatory 2026) zu schließen (E3G und Bellona 2026). Denn bei einer ausschließlichen Fokussierung auf grünen Wasserstoff besteht die Zwischenlösung häufig in der weiteren Nutzung von Erdgas ohne nachgelagerte CO₂-Abscheidung und -Speicherung, was dazu führt, dass weiterhin ein Teil der Emissionen ungehindert ausgestoßen wird. Allerdings bewerten wir die hierfür auf EU-Ebene nun festgelegten Kriterien zur Emissionskalkulation als nicht ausreichend (Bellona 2025e). Es bleibt zudem zu befürchten, dass die EU-Methanverordnung insbesondere auf Druck der USA so aufgeweicht werden könnte, dass blauer Wasserstoff in vielen Fällen de facto zu emissionsintensiv sein würde, um diesen als sinnvollen Beitrag auf dem Weg zur Klimaneutralität einzustufen. Durch die anfängliche Ergänzung von grünem Wasserstoff durch elektrolytischen kohlenstoffarmen Wasserstoff, der also nicht die Kriterien für renewable fuels of non-biological origin (RFNBO) aber dennoch eine mindestens 70%ige Emissionsminderung gegenüber dem fossilen Vergleichswert erfüllt, oder tatsächlich emissionsarmen anderweitigen Wasserstoffproduktionsmethoden, könnten größere Gesamtmengen an kohlenstoffarmem Wasserstoff schneller verfügbar gemacht werden. Dies würde es ermöglichen, Prozesse direkt auf Wasserstoff umzustellen und eine Marktdynamik für wasserstoffbasierte Prozesse in Gang zu setzen, was auch den Ausbau der Produktion von grünem Wasserstoff unterstützen könnte. Ein solcher Mischweg erscheint potenziell hilfreich, denn laut BEE wären für Deutschland bis 2045 zusätzlich zwischen 400 und 620 TWh Strom aus erneuerbaren Quellen erforderlich (BEE 2025), um die Produktion und Nutzung von blauem Wasserstoff zu vermeiden.

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. **Vorrang beim Wasserstoffbezug** sollten Sektoren erhalten, für die Elektrifizierung keine praktikable Option zur Dekarbonisierung ist, wie beispielsweise die chemische Industrie, die Stahlproduktion, Prozesse mit sehr hohen Temperaturen, Schiffs- und Flugverkehr und Kraftwerke zur Deckung von Dunkelflauten im Energiesystem. Selbst innerhalb von „No-Regret“-Sektoren ist eine effiziente Verteilung unerlässlich.
2. Um den zukünftigen Wasserstoffbedarf möglichst über elektrolytischen Wasserstoff zu decken, direkte Elektrifizierung zu ermöglichen und damit die Notwendigkeit von CCS als Ausweichoption zu beschränken, muss der **Ausbau erneuerbarer Energien und (europäischer) Netze** weiter beschleunigt werden. Die Stromkosten für die netzdienliche Produktion von Wasserstoff müssen etwa durch geringe Netzentgelte deutlich gesenkt werden.
3. Ein **gesteuerter Hochlauf** unter Einbeziehung von kohlenstoffarmem Wasserstoff ist für den Wasserstoffhochlauf wohl erforderlich. Allerdings sollte ein Ausstiegspfad aus fossil basierendem Wasserstoff unbedingt mitgedacht werden, beispielsweise indem RFNBO-konformem Wasserstoff im Förderkontext Vorrang gewährt wird. Hier ist eine gute Balance erforderlich, um einerseits unmittelbar erforderliche Investitionen in kohlenstoffarmen Wasserstoff hinreichend attraktiv zu machen und zugleich den Übergang zur zunehmend emissionsfreien Produktion sicherzustellen.
4. Die **Planung der Wasserstoffinfrastruktur** muss realistische Angebots- und Nachfragemengen berücksichtigen. Das Verteilnetz sollte aus Effizienzgründen nicht in der Breite des aktuellen Gasnetzes ausgebaut werden.
5. Um das Risiko einer verlängerten Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und CCS glaubwürdig zu begrenzen, braucht es zwei zentrale Voraussetzungen: Erstens eine **vollständige Lebenszyklusanalyse** der gesamten Treibhausgasemissionen, und zweitens eine schrittweise, kontinuierliche Erhöhung des Anteils von grünem Wasserstoff im Gesamtsystem.
6. Sofern grüner – also RFNBO-konformer – Wasserstoff nicht hinreichend zur Verfügung steht, ist der Einsatz von kohlenstoffarmem Wasserstoff, in vielen Fällen dem **Einsatz von CCS** in Industrieanlagen **vorzuziehen**, da eine Umstellung auf grünen Wasserstoff oftmals technisch einfacher ist als ein Ausstieg aus der Abscheidung.

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. Ein zentraler Hebel für den Wasserstoffhochlauf liegt in der gezielten Reduzierung von Investitions- und Preisrisiken. In der Hochlaufphase sollte der Staat stärker dazu beitragen, die Preisdifferenz zwischen Angebots- und Erzeugerpreis abzudecken, um sowohl auf Erzeugungs- als auch auf Abnehmerseite finale Investitionsentscheidungen zu begünstigen und Risiken abzufedern. Dies könnte über einen Contracts for Difference (CfD)-Mechanismus als zwischengelagerter Marktgestalter oder eine zielgerichtete Ausgestaltung der CO₂-Differenzverträge (Carbon Contracts for Difference, CCfD) unterstützt werden. Entscheidend ist dabei, dass die Maßnahmen nicht nur kurzfristig Nachfrageimpulse setzen, sondern langfristig tragfähige Marktstrukturen schaffen, die Wasserstoff im nötigen Rahmen als festen Bestandteil einer klimaneutralen Wirtschaft verankern.
2. Die staatliche Unterstützung des Wasserstoffhochlaufs sollte sich wesentlich auf grünen Wasserstoff entsprechend der **RFNBO Kriterien und auf kohlenstoffarmen elektrolytischen Wasserstoff konzentrieren**.
3. **Verlässlich ansteigende ETS-Preise** und ein **funktionierender Grenzausgleichsmechanismus CBAM** sind Grundvoraussetzungen für die Entwicklung einer marktgesteuerten Wasserstoffwirtschaft.
4. In Deutschland, Europa und international sollte an günstigen Standorten die Produktion von grünem Wasserstoff sowie dessen Transport z. B. mit der Stärkung von **H2Global, der Hydrogen Bank und Exportkreditgarantien** angeregt werden, um die Preise für Wasserstoff und dessen Derivate zu senken.
5. Eine dementsprechend gezielte Förderung bestimmter Abnahmesektoren mittels gut ausgestatteter **CO₂-Differenzverträge**, die Wasserstoff gezielt fördern, ist weiterhin elementar.

1.5.3. Circular Economy und Materialeffizienz

Potenziale und Unsicherheiten

Neben der Elektrifizierung und dem Wechsel von fossilen auf erneuerbare Rohstoffe bieten zirkuläre Prozesse sowie eine dadurch gesteigerte Materialeffizienz erhebliche Potenziale zur Emissionsminderung. Je nach Grundstoff lassen sich dadurch zwischen 20 % der Emissionen in der Stahlproduktion und bis zu 65 % im Bausektor einsparen (Agora Industrie, Systemiq 2023).

Die *Circular Material Use Rate* (CMUR) gibt den Anteil von Sekundärrohstoffen am gesamten Rohstoffeinsatz an. Diese liegt in Deutschland aktuell bei etwa 12 %. Für Metalle beträgt sie rund 33 %, während sie bei mineralischen Baustoffen und insbesondere bei Kunststoffverpackungen mit 15% (Conversio 2025) deutlich niedriger ausfällt. Durch den verstärkten Einsatz von Sekundärrohstoffen könnten in der Grundstoffindustrie zudem Energieeinsparungen von bis zu 90 % erzielt werden (dena 2025).

Wie im Kapitel „Vergleich Szenarien Emissionen 2045“ dargestellt, bestehen große Unsicherheiten über den Umfang und die Geschwindigkeit, mit der Maßnahmen wie Kreislaufwirtschaft und Konsumreduktion oder -umstellung umgesetzt werden. Teilweise ist ein Wandel gesellschaftlicher Verhaltensweisen und Werte notwendig, welcher letztlich jedoch nur aus der Gesellschaft selbst herauskommen und schwer normativ vorausgesetzt und implementiert werden kann.

Erste Schritte zur Rahmengebung einer wirksamen Kreislaufwirtschaft und langlebiger und besser reparaturfähiger Produkte sind mit der Recht-auf-Reparatur Richtlinie, EU-Ökodesign-Verordnung (ESPR) und der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) in Entwicklung. Jedoch bedarf es weiterer Maßnahmen.

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. Auf nationaler Ebene ist ein **Ressourcenschutzgesetz** mit verbindlichen Zielen, analog zum Klimaschutzgesetz möglich. Das aktuelle politische Momentum um Unabhängigkeit und Innovation bietet hierfür eine günstige Gelegenheit.
2. Ergänzend braucht es eine **innovationsfreundliche Gesetzgebung** mit Experimentierklauseln (Jäkel u. a. 2025) und dem aktuell geplanten Reallaborgesetz.
3. Ein **ambitionierter Circular Economy Act**, der Ziele festlegt, etwa für Recyclingquoten, ist notwendig. Hier kann die Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) der EU Vorbild für weitere **Quoten** sein, die für Planungssicherheit sorgen.
4. Ökodesign-Vorgaben über ESPR (Ecodesign for Sustainable Products Regulation) und CPR (Construction Products Regulation) zu Energieeffizienz, Lebenszyklus-CO₂, Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit von energiebezogenen Produkten sollten nun verbindlich geregelt und schrittweise verschärft werden. In der Zwischenzeit sollten Design-for-Recycling und eine einfache Demontage gefördert werden, um die Ressourceneffizienz zu steigern und Verluste wertvoller Materialien zu reduzieren.
5. Auch Finanzakteure, Unternehmen und Endverbraucher:innen spielen eine wichtige Rolle etwa bei der gemeinsamen Schaffung und Nutzung von **Labels**. Es sollten einheitliche Standards für aussagekräftige Labels entwickelt und durch unabhängige Zertifizierungs- und Kontrollmechanismen abgesichert werden. Gleichzeitig gilt es, ihre Nutzung durch Unternehmen zu fördern, sie in Finanz- und Marktentscheidungen zu integrieren und Verbraucher:innen durch transparente Informationen bei nachhaltigen Kaufentscheidungen zu unterstützen.
6. Die **Abfallhierarchie** muss klarer werden: Vermeidung, Wiederverwendung und Umnutzung vor Recycling müssen Priorität haben. Hierfür braucht es **Lebenszyklusanalysen (LCA)**. Bürokratische Hürden, wie die **Unterscheidung von Abfall und Wertstoff**, sollten praxistauglich vereinfacht und die **Regelungen zwischen Bundesländern harmonisiert** werden. End of Waste-Zertifizierungen sollten bürokratieärmer gestaltet werden.
7. **Weniger Müllverbrennung** hat einen direkten mindernden Einfluss auf den Bedarf von CCS. Die Verbrennung darf nur letzte Option sein. Die zur Abfallhierarchie korrespondierende Regulatorik muss hinsichtlich der noch unklaren Entwicklung der Potenziale des chemischen Recyclings regelmäßig überprüft und ggf. angepasst werden. Deponierung ist zu vermeiden. Auch Fernwärme aus Müllverbrennung sollte nicht pauschal als „grün“ gelten. Eine Einbeziehung der Müllverbrennung in den ETS und eine Abkehr vom zero-Rating von jeglichem biogenen CO₂ könnte angestrebt werden. Eine Beschränkung weiterer Kapazitäten sollte in Erwägung gezogen werden.
8. **Stoffströme in der EU** sollten besser überwacht und zirkuläre Lieferketten digital ermöglicht werden (Sund u. a. 2025), etwa durch **Produktpässe und digitale Zwillinge**.
9. **Leasingmodelle**, bei denen Produzenten Materialien zurückerhalten, können die Kreislaufführung zusätzlich stärken.

- 
10. Der **Export** von recyclingfähigen Produkten wie Stahlschrott sollte durch mehr Anreize für europäische Verwertung gemindert werden.
 11. Eine **erweiterte Herstellerverantwortung** ermöglicht auch Unternehmen Ressourcen besser zu nutzen und sollte auf Materialien angewendet werden, die wenig ökonomischen Anreiz zur Aufbereitung bieten.
 12. Eine deutsche **Chemieagenda** sollte klare und verlässliche Rahmenbedingungen schaffen, um zirkuläre Stoffströme in der Grundstoffchemie systematisch zu verankern, beispielsweise durch Rezyklateinsatzquoten, Produktdesignvorgaben oder den Ausbau einer hochwertigen Recyclinginfrastruktur.
 13. Ein zentrales Potenzial liegt in der öffentlichen Beschaffung. Durch gezielte Nachfrage nach zirkulären Produkten kann sie - am wirkungsvollsten beim Bau aber auch in anderen Bereichen - **grüne Leitmärkte** schaffen. Schulungen, politischer Wille und stabile Finanzierungsstrukturen können entscheidende Fortschritte ermöglichen. Hierzu braucht es unter anderem eine Schärfung der rechtlichen Rahmenbedingungen, beispielsweise des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) sowie Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) und weitere, sodass umwelt- und klimabezogene Kriterien verpflichtend sind und Mindestquoten für grüne Produkte gesetzlich verankert werden.

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. **Förderprogramme für Kreislaufwirtschaft und Sekundärrohstoffe etwa über Differenzverträge** sind notwendig, um Produktionskosten zu senken und Wettbewerbsfähigkeit herzustellen. Die Unterstützung von automatisierten Sortiersystemen, Mehrwegsystemen und Product-as-a-Service-Geschäftsmodellen ist ebenso wichtig. Mittelfristig sollten Sekundärrohstoffe geringer besteuert werden als Primärrohstoffe.
2. **Ein wirksames ETS mit verlässlich steigenden Preisen und effektiver CBAM** sind zentral, um Wirtschaftlichkeit und faire Wettbewerbsbedingungen zu sichern.
3. Der **CBAM** kann um eine materialbezogene Abgabe, die beim Verkauf von Produkten oder dem Import von Grundstoffen anknüpft, erweitert werden. Daraus entstehende jährliche Einnahmen von rund 50 Milliarden Euro könnten die Finanzierung von CO₂-Differenzverträgen ermöglichen (Neuhoff u. a. 2025).
4. Im Rahmen der Anpassung des VerpackG an die PPWR (dann Verpackungsdurchführungsgesetz) sollte über eine Reform von § 21 VerpackG die Grundlage für einen **Recyclingfonds** geschaffen werden, welcher sich aus Beiträgen der Systembeteiligten des dualen Systems speist und Eco-Design von Verpackungen unterstützt (UBA 2022).
5. Reallabore, Pilot- und Demonstrationsanlagen ermöglichen es Unternehmen, neue Verfahren zu testen. Wichtig ist jedoch auch auf Bundesebene vermehrte **Scale-up-Förderung** bis zur großen Industrieanlage, sodass Innovationen unter realen Bedingungen auf den Markt kommen können. Hierfür muss das ganze Ökosystem systematisch umgestellt werden.
6. Deponierung von Stoffen, die ungefährlich sind oder wiederverwertet werden können, sollte stärker besteuert werden. Demgegenüber sollten Geschäftsmodelle für Reparatur und Wiederverwendung nicht besteuert werden.

Materialeffizienz im Bauwesen



Der Bausektor (siehe [Kapitel Bau- und Zementindustrie](#)) bietet ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen, insbesondere durch eine verbesserte Materialeffizienz. CO₂- und materialoptimierte Entwurfsstrategien sollten bereits in der Planungsphase umgesetzt werden. Werkzeuge wie Building Information Modeling (BIM) ermöglichen die systematische Bewertung und Optimierung des Materialeinsatzes sowie der damit verbundenen Emissionen, sodass Planer von Anfang an kohlenstoffintensive Materialien minimieren können. Digitale Produktpässe (DPPs) unterstützen die Emissionsreduktion zusätzlich, indem sie die Rückverfolgbarkeit und Recyclingfähigkeit von Baustoffen verbessern und zirkuläre Materialkreisläufe stärken.

Maßnahmen wie die Wiederverwendung von Bauteilen, beispielsweise über Material- und Bauteilbörsen, führen in Kombination mit einer höheren Materialeffizienz direkt zu einer geringeren Nachfrage nach Primärbaustoffen, insbesondere Zement. Da die Zementproduktion eine bedeutende Quelle von CO₂-Emissionen ist, von denen ein Teil nur durch CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) behandelt werden kann, verringert eine reduzierte Zementnachfrage zugleich den Bedarf an entsprechenden CCS-Technologien.

Die Verlängerung der Nutzungsdauer von Gebäuden und ihren Komponenten stellt einen weiteren wichtigen Hebel dar. Darüber hinaus sollten Energieaudits um umfassende CO₂-Bilanzen erweitert werden, die nicht nur betriebliche Emissionen, sondern auch den in Baustoffen gebundenen Kohlenstoff berücksichtigen. Aus regulatorischer Sicht können Grenzwerte für den gebundenen Kohlenstoff oder für Lebenszyklusemissionen dazu beitragen, gesamte Wertschöpfungsketten im Bauwesen an langfristigen Klimaneutralitätszielen auszurichten (Rat für technologische Souveränität 2025).

Zur Steigerung der Materialeffizienz sind insbesondere drei Strategien relevant:

Leichtbau und effizienter Betonverbrauch: etwa durch Holz-Hybrid-Bauweisen oder Hohlkörperdecken.

Stahl-Leichtbauweise: flexible, recyclingfähige Bauformen, etwa für Aufstockungen und Nachverdichtungen.

Modulare Bauweise: Vorfertigung und Wiederverwendbarkeit von Bauelementen mit hoher Effizienz und geringen Emissionen (Wuppertal Institut 2021).

Diese Ansätze zeigen, dass Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft im Bauwesen nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch attraktive Perspektiven eröffnen – insbesondere durch Innovation, Ressourcenschonung und neue Geschäftsmodelle.

1.5.4. Finanzpolitische Steuerungsinstrumente

Die großflächige Förderung von CCS in Bereichen mit vorhandenen, (kosten-)effizienteren und nachhaltigeren Alternativen (wie etwa Elektrifizierung oder Effizienzsteigerung) führt zu Fehlanreizen, ineffektiver Mittelverwendung und potenziell wachsender Abhängigkeit von fossilen Infrastrukturen ([Bellona 2025a](#)). Deshalb ist eine kluge finanzpolitische Steuerung essenziell, um die Technologie dort zu fördern, wo sie wirklich gebraucht wird.

Gezielte finanzpolitische und marktbasierte Instrumente können den Bedarf an CCS und Investitionsbedarfe in der industriellen Defossilisierung erheblich reduzieren, indem sie Anreize für emissionsvermeidende Technologien wie Wasserstoff, Elektrifizierung und Energieeffizienz schaffen und gleichzeitig CCS auf schwer vermeidbare Emissionen konzentrieren. Die strategische Ausgestaltung von Förderprogrammen und Marktmechanismen entscheidet darüber, ob die Industrie primär auf frühzeitige CO₂-Vermeidung oder auf nachgelagerte Abscheidungstechnologien setzt.

Förderungen sollten regelmäßig evaluiert und falls überflüssig mit der Zeit gesenkt werden. Die technologische Entwicklung verläuft dynamisch, und was heute als schwer vermeidbar gilt, kann morgen durch Innovation oder strukturellen Wandel vermeidbar werden ([E3G und Bellona 2026](#)). Jedoch muss CCS als Fallback-Option – wenn andere Maßnahmen nicht (schnell genug) umgesetzt werden können – erhalten bleiben. Finanzpolitische Instrumente müssen diese Entwicklungen begleiten und weitsichtig reagieren.

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

Grundsätzliches:

1. Die Förderung von CCS muss mit derjenigen für andere Maßnahmen wie Elektrifizierung, tiefgreifende Prozessumstellung, Wasserstoffeinsatz, etc. in Balance gebracht werden. Hierbei ist es wichtig **kritisch zu prüfen, ob diskutierte Emissionsminderungsoptionen eine effiziente und ganzheitliche Transformation** durch umfassende Defossilierung ermöglichen.
2. Der CO₂-Preis und Energieträgerpreise sind volatil. Daraus entstehende **Risiken** sollten abgesichert werden, sodass die Möglichkeiten für den Einsatz von privatem Kapital verbessert werden. Instrumente wie CfDs, CCfDs, Bürgschaften, Garantien und Gewährleistungen verringern das Ausfallrisiko bzw. den Risikoaufschlag und damit die Kosten für privates Kapital.
3. Die Einführung neuer Instrumente sollte **soziale Härten nicht verstärken** und so die Akzeptanz für Emissionsreduktion schmälern.
4. **Energiepreissubventionen sollten nur unter Konditionen** gewährt werden. In der Industrie und Energiewirtschaft betrifft dies unter anderem Ausnahmen und Erleichterungen im EnergieStG für die Nutzung fossiler Energieträger. Diese Ausnahmen konterkarieren die Wirkung des ETS und senken Steuereinnahmen.
5. **Ausgaben aus dem KTF** sollten systematisch ex-ante und ex-post mit einer sinnvollen Methodik entsprechend festgelegter Kriterien evaluiert werden (bspw. Förderkosteneffizienz, Klimaschutzwirkung, Systemdienlichkeit, Hebelwirkung für privates Kapital etc.) ([Bellona 2025g](#)).

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

Instrumente:

1. **Subventionen oder staatliche Förderprogramme** wie **CO₂-Differenzverträge** sollten CCS-Anwendungen zur Reduktion schwer vermeidbarer Emissionen fördern. Grundlage hierfür sind wissenschaftlich nachvollziehbare und praktisch anwendbare Kriterien. Die Finanzierung sollte mit weiteren Defossilisierungs- und Dekarbonisierungsmaßnahmen abgestimmt und strategisch ausgerichtet werden: Etwa nach technischer Notwendigkeit des CCS-Einsatzes und dem Nachweis ökologischer und klimapolitischer Sinnhaftigkeit (E3G und Bellona 2026).
2. Ein zentraler Hebel liegt in der **CO₂-Bepreisung (ETS)**. Eine verlässliche Reduktion von Emissionszertifikaten sorgt für Planungssicherheit und setzt marktwirtschaftliche Anreize für emissionsärmere Technologien. Anwendungsabhängig beginnt dieses Fenster z. B. bei CCS oberhalb eines CO₂-Preises von ca. 100 €, kann je nach Annahmen und Anwendungsbereich aber auch erst oberhalb von 200–250 € beginnen (European Commission. Joint Research Centre. 2023a). In diesem System wird CCS nur dann wirtschaftlich interessant, wenn es tatsächlich günstiger ist als Alternativen. In erster Linie werden Sektoren mit schwerer zu vermeidenden Emissionen CCS nutzen, wodurch Anwendungen mit Alternativen ausweichen. Eine CO₂-Bepreisung kann pauschale Subventionen vermeiden und ermöglicht eine natürliche Priorisierung der Lösungen mit dem größten Klimanutzen.
3. Für einen wirksamen ETS bedarf es eines Rahmens an Schutzmechanismen für die deutsche und europäische Industrie vor carbon leakage etwa durch einen wirksamen Grenzausgleichsmechanismus **CBAM**. Dieser könnte durch eine Erweiterung oder Ausweitung auf weitere Produkte und Stoffe oder eine materialbezogene Abgabe, die an die Produktion und den Import von Grundstoffen anknüpft, gestärkt werden. Zusammen mit CO₂-Bepreisungs-Erträgen könnten jährliche Einnahmen von rund 50 Milliarden Euro die Finanzierung von CO₂-Differenzverträgen für eine ganzheitliche Transformation ermöglichen (Neuhoff u. a. 2025).
4. Als weitere Möglichkeiten werden **ökonomisch und ökologisch wirksame Local-Content-Vorgaben** und Zollmaßnahmen diskutiert. Mittelfristig sind jedoch internationale CO₂-Preise anzustreben.
5. Daneben kann die staatliche Förderung einer deutschen und europäischen No-Regret-**Infrastruktur** für CO₂-Transport – auch für Negativemissionen – etwa mit einem Amortisationskonto und realistischen Bedarfsabfragen über Zahlungsbereitschaften die Grundlage für einen effizienten Einsatz von CCS darstellen.

- 
6. **Die EU-Taxonomie** ist ein Instrument zur Identifizierung von nachhaltigen Defossilisierungsoptionen und Steuerung privater Kapitalströme. Sie kann den CCS-Bedarf der Industrie erheblich reduzieren, indem sie klare Anreize für Investitionen in emissionsvermeidende Technologien schafft. Durch klimapolitisch durchdachte Kriterien für CCS wird auch privates Kapital vornehmlich in Technologien gelenkt, die Emissionen vollständig vermeiden. Sie können CCS auf schwer vermeidbare prozessbedingte Emissionen und günstige Standorte konzentrieren. Die Offenlegungspflichten schaffen Transparenz und Vergleichbarkeit, wodurch Unternehmen mit hohen Taxonomiequoten Wettbewerbsvorteile erhalten (Science Based Targets initiative 2022).
 7. **Grüne Leitmärkte** sind ein wichtiger Baustein, um die Markttransformation zu ermöglichen. Die öffentliche Beschaffung hat bei bürokratiearmer Umsetzung vor allem im Baubereich das Potenzial, ein anfängliches Nachfragesignal zu senden und Unternehmen dadurch mehr Planungssicherheit in ihrem Transformationsprozess zu geben. Dies trägt auch dazu bei, die anfänglich höheren Kosten neuer kohlenstoffarmer Produkte zu verringern oder die wirtschaftlichen Auswirkungen entlang der Wertschöpfungskette abzumildern. Letztlich ebnet dies den Weg dafür, dass emissionsarme Produkte zum Standard werden und die umweltschädlichsten verdrängen.
 8. Daneben kann es erforderlich sein, auch **Capex-Förderung** in Betracht zu ziehen. Die Notwendigkeit dieser Unterstützung sollte nicht generell eingeplant werden, sondern branchen- und risikenspezifisch bewertet werden.

2. CCS-Bedarfe in der Industrie und deren Minde- rungsoptionen

2.1. Chemieindustrie

Emissionen

Der aktuelle Ausstoß der Chemieindustrie in Deutschland beträgt ca. 40 Mt CO₂eq. Davon sind 87 % energie- und 13 % prozessbedingt (Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien 2026). Energiebedingte Emissionen umfassen z. B. Prozesswärme und Strom. Prozess- bzw. stoffliche Emissionen entstehen, wenn chemisch in Roh- oder Grundstoffe und Produkte eingebundener Kohlenstoff freigesetzt wird (z. B. beim Cracken von Naphtha, bei der Herstellung von Ammoniak, Methanol, Olefinen, oder am Lebensende der Produkte). Bei Verbrennung von Kunststoffen entstehen z. B. abhängig vom Material ca. 2,7 Tonnen CO₂ pro Tonne Plastik (Sun u. a. 2021), was in Deutschland zu Emissionen von ca. 10 Mt CO₂ nur durch die energetische Verwertung von ca. 3,6 Mio. t (UBA 2025b) Kunststoffen führt.

Die Chemieindustrie steht vor den doppelten Herausforderungen einer Energie- und Rohstoffwende. Komplexe Input-Output-Zusammenhänge erschweren diese Gleichzeitigkeit. Zugleich besteht in der Chemie die Chance, durch Reintegration von Kohlenstoffverbindungen in Produktionsprozesse gleichzeitig Zirkularität zu erreichen und (ggf. teilweise) zu defossilisieren. Aufgrund der Vielzahl von Zwischen- und Endprodukten sowie komplexer internationaler Wertschöpfungsketten und globalem Wettbewerb steht die Chemiebranche bei der Transformation vor besonders großen Herausforderungen. Die Politikinstrumente sind in Ihrer Zielgenauigkeit und Effektivität bislang noch nicht hinreichend entwickelt.

Im Zusammenhang mit der Chemieindustrie entstehen unter anderem bei der energetischen Verwertung von Kohlenwasserstoffen am Lebensende derzeit unvermeidbare Emissionen, die durch CCS bei der Abfallverbrennung gemindert werden können. Durch eine deutlich verbesserte Kreislaufführung von kohlenstoffhaltigen Abfallströmen als sekundären Rohstoffen für die Produktion kann die Notwendigkeit von CCS reduziert werden. Durch den Einsatz von nachhaltig erzeugtem biogenem Kohlenstoff kann zudem die Klimabilanz weiter verbessert werden; hier ist allerdings aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit nachhaltiger Biomassen auf Nutzungskonkurrenzen zu achten (siehe Kapitel zu [LULUCF und Negativemissionen](#)). Eine weitere Herausforderung stellt die Nutzung von Erdgas für hohe Prozesstemperaturen dar, z. B. für Cracking und Raffinierung (Material Economics 2019). Diese Emissionen sind durch die Verwendung von Wasserstoff oder Elektrifizierung vermeidbar (Scholz, Kloo, Theisen, Saurat, & Schneider, 2025), jedoch könnte CCS eine z. T. kostengünstigere Alternative hierzu darstellen. Es ist zu beachten, dass im Falle der Verwendung von blauem Wasserstoff CCS notwendig ist (siehe [Wasserstoff-Kapitel](#)). Gemein ist allen fossilfreien Produktionswegen ein sehr hoher Bedarf erneuerbarer Energien ([Bellona 2024a](#)). Der VCI spricht hierbei zwar von einem zusätzlichen EE-Bedarf von über 400 TWh. Allerdings liegt dem die unrealistische Annahme zugrunde, dass der erforderliche Wasserstoff elektrolytisch inländisch erzeugt wird und alle bestehenden Wertschöpfungsschritte vor Ort blieben (VCI und VDI 2024). Dies suggeriert einen bedeutenden Anteil an inländischer Erzeugung von synthetischen Kohlenwasserstoffen mittels CCU, was sowohl thermodynamisch als auch ökonomisch fragwürdig ist und aufgrund der sehr hohen Vermeidungskosten durch wasserstoffbasierte Feedstocks (zumindest bei inländischer Produktion) nicht eintreten dürfte (Alexander Scholz u. a. 2025). Der Import von grünem Wasserstoff, dessen Derivaten und anderen Primärrohstoffen und Zwischenprodukten aus Ländern mit effizienter nutzbaren und hinreichend verfügbaren erneuerbaren Energien senkt neben den Preisen für grüne Produkte zudem den Bedarf an CCS in der deutschen Industrie – auch wenn derzeit noch weitgehend unklar ist, ob dies in anderen Weltregionen tatsächlich im hinreichenden Maß umgesetzt werden kann und wird.

Neben der Ungewissheit zur ausreichenden Verfügbarkeit von Erneuerbaren ist ebenfalls unklar, wie viel Biomasse für die stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie nachhaltig zur Verfügung gestellt werden kann.

Ein kohärenter deutscher und europäischer politischer Rahmen ist entscheidend, der Förder-, Förderungs- und Schutzinstrumente in den Blick nimmt. Mit einem gut gestalteten Marktumfeld und einer strategisch ausgerichteten Chemieagenda lässt sich der Übergang zu einer nachhaltigen Chemieproduktion beschleunigen. Dafür muss Kohlenstoff möglichst im Kreislauf gehalten werden und seine vollständige Oxidation zu CO₂ verhindert werden, um Emissionen und damit den Bedarf für CCS und CCU zu mindern. Da CCU aufgrund der prohibitiv hohen Energie- bzw. Wasserstoffbedarfe inländisch weitgehend ausscheidet, ist einmal entstandenes CO₂ für den Kreislauf verloren und muss mittels CCS entsorgt werden, um emissionsbedingte Klimaschädigung zu verhindern. Der fossile Kohlenstoffteil solcher nicht vermeidbaren CO₂-Mengen würde hierbei bilanziell der Emissionsvermeidung zugerechnet werden, der biogene Kohlenstoffanteil würde bei Behandlung mittels CCS als Negativemissionen in die Bilanz eingehen. In beiden Fällen ist ein Auffangen aus Klimaschutzgründen dringend geboten.

CCS-Bedarf

Neben der aktuell in manchen Anwendungen plausibel wirkenden Wirtschaftlichkeit für CCS im Vergleich zu anderen Lösungen für chemische Produktionsprozesse wie dem vermehrten Einsatz von Wasserstoff und der Elektrifizierung bei Höchsttemperaturprozessen wie z. B. manchen Steamcrackern gibt es noch weitere Herausforderungen im Chemiepark. So etwa die Sondermüllverbrennung von Produktionsabfällen, die unter aktuellen regulatorischen Bedingungen schwer alternativ verwertet werden können, z. B. durch chemisches Recycling. Die Verbrennung wird derzeit als erforderlich angesehen. Hier sollten Anreize für Zirkularität erhöht werden, um den Bedarf für CCS zu mindern. Dies gilt ebenso für bestehende Chemieanlagen mit langer Lebensdauer, bei denen eine zeitweise Nutzung von CCS eine Option darstellt. Langfristig nimmt der Nutzen von CCS dadurch ab, dass die aufzufangenden Gesamtvolumina durch die fortschreitende Elektrifizierung, Zirkularität und Prozessumstellung sowie absehbare inländische Kapazitätsreduktionen geringer werden. Zugleich wird eine erhöhte Durchdringung von chemischem Recycling und CCS-Infrastruktur in Chemieparks plausibel sein, um zunehmend auch kleinere Residualquellen in den Prozessemissionen zu adressieren (E3G und Bellona 2026).

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. Energiebedingte Emissionen für Prozesswärme und Dampf sollten so umfangreich wie möglich durch **Energieeffizienz und Elektrifizierung mit erneuerbarem Strom** reduziert werden. Je mehr auf Strom und nachrangig Wasserstoff gesetzt wird, desto weniger CCS muss zum Einsatz kommen. In manchen (ebenfalls nachrangigen) Fällen kann auch Biomasseeinsatz zur Lösung beitragen, die hierbei anfallenden CO₂-Mengen sollten dann aber auch wiederum aufgefangen werden.
2. Bei Prozess- bzw. stoffliche Emissionen sind **Rohstoffsubstitution** mittels biogenen Kohlenstoffs oder chemischen Recycling und Wasserstoff sowie neue Produktionsrouten und Prozesse erforderlich. Ein Beispiel stellt die Biomasse-/ Abfallvergasungsrouten statt des Naphtha-Steamcrackers dar.
3. Für Klarheit, wie viel Biomasse für die stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie nachhaltig zur Verfügung gestellt werden kann, bedarf es einer wissenschaftlich fundierten **Definition nachhaltiger Kohlenstoffquellen**. Klare Nachhaltigkeitskriterien, robuste Standards und Zertifizierungssysteme können sicherstellen, dass alternative Kohlenstoffquellen umweltverträglich und effizient eingesetzt werden.
4. Eine konsequent ausgestaltete **Kreislaufwirtschaft** entlang der Hierarchie von Wiederverwendung, mechanischem Recycling und chemischem Recycling stellt einen zentralen Hebel dar, um den künftigen Bedarf an CCS in der Chemieindustrie zu begrenzen. Je mehr Kohlenstoff nicht zu CO₂ wird und im Kreislauf geführt, desto geringer ist die Menge an CO₂, die in nachgelagerten Prozessen abgeschieden und gespeichert werden muss. Der Einsatz fossiler Primärrohstoffe lässt sich durch die Nutzung von z. B. Agrar- und Industrieabfallströmen, sowie Klärschlamm und Fermentationsrückständen aus Biogasanlagen reduzieren. Hierbei ist zu beachten, dass der Einsatz von biogenem Kohlenstoff nicht die Notwendigkeit von CCS reduziert, bilanziell hierdurch dann aber Negativemissionen ermöglicht werden können.
5. Bei **Plastikabfall** können automatisierte Sortiersysteme, Mehrwegsysteme, Product-as-a-Service-Geschäftsmodelle und der Einsatz von Sekundärrohstoffen erhebliche Potenziale für Ressourcenschonung, Versorgungssicherheit und Emissionsminderung schaffen.
6. **Chemisches Recycling** kann in Abhängigkeit vom Erfolg der derzeitigen technologischen Entwicklungen einen relevanten Beitrag leisten und muss als Element innerhalb der Kreislaufwirtschaft so eingesetzt werden, dass Energie- und Rohstoffaufwand minimiert werden. Vorrang hat das **mechanische Recycling**, wo immer es ökologisch und qualitativ tragfähig ist. Diese Hierarchie dürfte sich in der Regel allein durch die Prozessherausforderungen und die thermodynamischen Aufwände weitgehend von alleine einstellen, so lange keine dem entgegenwirkende Subventionierung erfolgt um chemisches gegenüber dem mechanischen Recycling übermäßig besserzustellen.
7. **CCU** in der Form von Synthese mit eingefangenen CO₂ und Wasserstoff kann in einigen bestimmten Prozessen zwar eine Rolle spielen, hat aber aus aktueller Sicht begrenztes Potenzial aufgrund extrem hoher Energiebedarfe, besonders für die inländische Produktion. Es ist entscheidend, möglichst viel Kohlenstoff im Kreislauf zu halten, bevor daraus das thermodynamisch ungünstige CO₂ geworden ist.

8. Der zügige Ausbau von **Infrastrukturen für Wasserstoff und CO₂** ist erforderlich, auch um Kohlenstoffquellen an den dafür günstigen Orten als Rohstoffquelle zu erschließen.
9. Eine **Beschleunigungsoffensive** für die Kohlenstoffkreislauf- und Dekarbonisierungsvorhaben der Chemieindustrie und der zugehörigen Infrastrukturen ist notwendig. Dazu gehören verbindliche Genehmigungsfristen, konsequente Digitalisierung der Verfahren, mehr Personal in den Genehmigungsbehörden sowie eine gesetzliche Klarstellung, dass diese Vorhaben im überragenden öffentlichen Interesse liegen – analog zu § 2 EEG 2023. Planungs- und Genehmigungsprozesse müssen frühzeitig gebündelt und koordiniert werden, damit Infrastruktur und Chemieparkumbauten parallel realisiert werden können.
10. **Quoten für grüne chemische Produkte** wie Lacke, Klebstoffe und Plastik können Planungssicherheit herstellen.
11. Durch **Nachhaltigkeitslabels** für chemische Grundstoffe kann die Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten systematisch gestärkt werden. Ein funktionierender Markt für zirkuläre und klimafreundliche Grundstoffe inklusive der entsprechenden B2B-Aspekte ist entscheidend, um Investitionen in emissionsarme Produktionsprozesse wirtschaftlich tragfähig zu machen und damit den strukturellen Bedarf an CCS dauerhaft zu senken.
12. Internationale Partnerschaften können die Versorgungssicherheit mit erneuerbaren Kohlenstoffquellen und emissionsarmen Primärprodukten erhöhen und so die Notwendigkeit großflächiger CCS-Anwendungen weiter verringern.

Prozesswärme und Dampf



Prozesswärme und Dampf kann grundsätzlich vollständig ohne fossile Energieträger erzeugt werden. Bei bis zu 200 °C übernehmen Wärmepumpen die Hauptrolle, während bei höheren Temperaturen vor allem Elektrokessel zum Einsatz kommen. Für Anwendungen, welche höhere Temperaturen (bis über 1000 °C) erfordern und nicht über Dampfnetze versorgt werden, ist grundsätzlich ebenfalls ein elektrisches Heizen möglich (Future Cleantech Architects 2024a). In Zeiten hoher Strompreise können zudem Systeme mit Wärmebedarf auf mittleren Temperaturniveaus wie z. B. manche Dampfnetzwerke dann durch Müllverbrennung (inkl. CCS), wasserstoffbetriebene KWK-Anlagen sowie Biomassekessel (möglichst inkl. CCS) ergänzt werden, um eine flexible und sichere Wärmeversorgung zu gewährleisten. Bei hohen Temperaturen sind aktuell sowohl die technischen als auch die ökonomischen Herausforderungen für Stromeinsatz groß in diversen bislang fossil beheizten Systemen, weswegen die Elektrifizierung aus heutiger Sicht wohl nicht zeitnah vollständig umgesetzt werden dürfte. Hierbei gilt es allerdings zwischen den vielfältigen Anwendungsfällen mit jeweils eigenen Herausforderungen zu unterscheiden. So gibt es auch Beispiele wo hohe Temperaturen elektrisch Stand der Technik sind (EAFs, Induktion, z. T. Glasschmelze), während andernorts die Herausforderungen bislang weitgehend ungelöst sind (Zement, Keramik, Warmwalzen).

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. **Förderung** wie Investitionsanreize mit Differenzverträgen und steuerliche Vorteile bei gleichzeitigem Abbau fossiler Subventionen und dem Schutz vor carbon leakage schaffen Planungssicherheit und beschleunigen den Übergang zu einer erneuerbaren Rohstoffbasis.
2. Eine Bepreisung des stofflichen Einsatzes fossiler Ressourcen könnte zusätzlich ein Level Playing Field zugunsten nachhaltiger Chemieproduktion herstellen. Eine an den CBAM angegliederte **Materialabgabe** (Neuhoff u. a. 2025), die die Produktion klimafreundlicher und zirkulärer Grundstoffe mitfinanziert, kann zusätzliche Investitionsanreize setzen.
3. Ebenso wichtig für Planungssicherheit und einen sicheren Innovationsraum ist die Beibehaltung eines **verlässlich weitergeführten ETS 1** sowie die Weiterentwicklung oder Ergänzung des **CBAM** bei Chemischen Produkten. Eine **Anrechenbarkeit der stofflichen Weiternutzung von CO₂** innerhalb des ETS muss klimadienlich so gestaltet werden, dass keine Schlupflöcher oder zeitnahe Emissionen ermöglicht werden. Wo Bio-CCS für grüne Produkte angewendet wird, sollten nur tatsächliche **Negativemissionen angerechnet** (siehe Kapitel „CO₂-Entnahme: LULUCF und Negativemissionen“) werden können.
4. Die Mittel aus dem Sondervermögen Infrastruktur bieten die Chance, nachhaltige **Leitmärkte** sowie grüne öffentliche Beschaffung gezielt aufzubauen. Auch wenn der Markt für chemische Erzeugnisse überwiegend privat ist, kann die öffentliche Hand – etwa im Bauwesen, bei der Deutschen Bahn oder für die Bundeswehr – als strategischer Leitmarkt fungieren.
5. Schließlich sind **Investitionen in Forschung und Entwicklung** alternativer Technologien entscheidend, um langfristig ganz ohne fossile Energieträger auszukommen.
6. Reallabore, Pilot- und Demonstrationsanlagen ermöglichen es Unternehmen, neue Verfahren zu testen. Wichtig ist jedoch auch auf Bundesebene vermehrte **Scale-up-Förderung** für synergetische Großprojekte, die Zirkularität und Dekarbonisierung bis zur großen Industrieanlage fördern, sodass Innovationen unter realen Bedingungen auf den Markt kommen können.

2.2. Stahlindustrie

Emissionen

Die Produkte der Stahlindustrie spielen für die grüne Transformation eine entscheidende Rolle. Sie werden u. a. für Infrastruktur, im Baubereich und Maschinen- und Anlagenbau benötigt. Ihre Wertschöpfung beläuft sich europaweit auf ca. 152 Milliarden Euro jährlich und sie umfasst 2,6 Millionen Arbeitsplätze ([Bellona 2024b](#)). Ihr kommt somit eine wichtige wirtschaftliche und soziale Bedeutung zu. Zugleich ist sie für 5 % (183 Mt CO₂) (Eurofer EU 2024) der europäischen sowie für 7,9 % (51–57 Mt CO₂) der deutschen CO₂-Emissionen verantwortlich (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2025).

Um die Klimaziele der EU zu erreichen, steht die Stahlindustrie vor der Frage nach Minderungsmöglichkeiten. Neben Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz, der Elektrifizierung von Öfen und dem Einsatz von Wasserstoff ist CCS eine Option für schwer vermeidbare Emissionen.

Grundsätzlich wird zwischen primärer und sekundärer Stahlproduktion unterschieden. Unterschiede in der Verwendung von Primär- und Sekundärstahl kommen z. B. von den Qualitätsanforderungen an Stahl. Beispielsweise benötigt die Autoindustrie Stahlbleche mit höheren Reinheitsanforderungen als die Bauindustrie, die für viele Anwendungen Sekundärstahl einsetzen kann.

Um das tatsächliche Minderungspotenzial in der Stahlindustrie auszuloten, betrachten wir zwei der wichtigsten Primärrouten der Stahlproduktion, da diese aktuell den Großteil der Stahlproduktion ausmachen und den Großteil der Emissionen verursachen: Die Hochofen-Konverter-Route² (2,3 Tonnen CO₂ pro Tonne Stahl im europäischen Durchschnitt) und die Route über direktreduziertes Eisen (DRI) und Elektrolichtbogen (EAF)³ (0,2–0,7 Tonnen CO₂) ([Bellona 2024b](#)).

2 Engl: Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace Route, abgekürzt mit: BF-BOF

3 Engl.: Direct ReducedReduction Iron-Electric Arc Furnace-Route, abgekürzt mit: DRI-EAF



70 % der Stahlproduktion in Deutschland wird über die **BF-BOF-Route** (Eitze u. a. 2024) hergestellt. Als Energielieferant und Reduktionsmittel wird Koks-kohle eingesetzt. Der emissionsintensivste Prozess ist die Eisenerzreduktion. In Europa und Deutschland läuft dieser Schritt primär im Hochofen (BF) ab, bei dem 60–70 % der Gesamtemissionen der Produktionskette entstehen. Daneben ist die Kokerei (Erzeugung von Koks aus Kohle) eine große Punktquelle. Weitere Anlagen, wie oftmals in Stahlwerke integrierte Kalköfen und Kraftwerke, stellen zusätzliche Punktquellen dar. Hinzu kommen die Emissionen, welche beim Abbau und Aufbereiten von Eisenerz anfallen, die sog. vorgelagerten (up-stream) Emissionen (Carpenter 2012).

In der **DRI-EAF** Route hängen die anfallenden Emissionen maßgeblich von den eingesetzten Energieträgern bzw. dem Reduktionsagenten ab. Direktreduktionsanlagen können mit Erdgas und/oder Wasserstoff in variablen Anteilen betrieben werden. Derzeit wird primär Methan (CH₄) eingesetzt, welches zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff reformiert wird (Global Energy Monitor 2025). Im Schachtofen wird DRI aus Eisenerzpellets gewonnen, welches im EAF eingeschmolzen und weiterverarbeitet werden kann. CO₂-Emissionen entstehen sowohl bei der Direktreduktion im Schachtofen, am Erdgasreformer und im EAF selbst. In Abhängigkeit vom Reduktionsmittel fallen auf der DRI-EAF Route Emissionen von 0,2–1 Tonnen CO₂ pro Tonne Stahl an.

Nebst der Primärstahlproduktion sei auf die Sekundärproduktion verwiesen, in welcher recycelter Stahlschrott (scrap) im EAF eingeschmolzen wird. Die **scrap-EAF-Route** stellt bereits heute eine relevante Dekarbonisierungsoption für die Stahlindustrie dar, welche mit zunehmenden Mengen an Stahlschrott an Bedeutung gewinnen wird. Allerdings lassen sich aktuell nicht alle Stahlgüten über diese Route herstellen, da sich bestimmte Begleitelemente im Stahlschrott nicht oder nur schwer entfernen lassen.

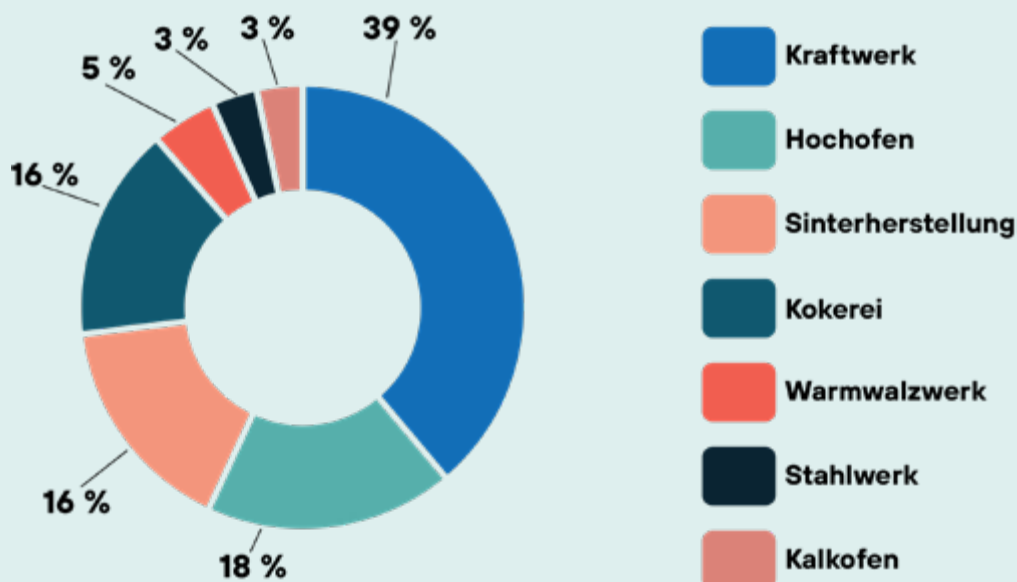


Abbildung 3: CO₂-Intensitäten der Stahlherstellung (Bellona, 2024b)

CCS-Bedarf

Wenn CCS als Dekarbonisierungsoption in Betracht gezogen wird, muss grundsätzlich klar sein, dass es weder den Ausstoß anderer schädlicher Treibhausgase wie bspw. Methan, welches beim Kohleabbau für die BF-BOF-Route freigesetzt wird, noch die bei der Erdgasförderung anfallenden Emissionen verhindert (Agora Industry u. a. 2024).

Die DRI-EAF Route lässt sich durch die Verwendung von Wasserstoff und erneuerbaren Energien annähernd CO₂-neutral realisieren, somit kann hier der CCS-Bedarf sehr stark reduziert werden. Doch selbst bei Umstellung auf wasserstoffbasierte Verfahren bleiben Restemissionen (z. B. aus Kalkstein-Entsäuerung, Aufkohlung des Eisens zu Stahl, Elektrodenoxidation, Erzeugung von Schaumschlacke), die, soweit technisch möglich, durch CCS abgetrennt werden könnten. Derzeit werden jedoch DRI-EAF-Anlagen primär mit Methan betrieben. Bei fortgesetzten Verzögerungen im Wasserstoffhochlauf muss diese Emissionsquelle adressiert werden. Die hier anfallenden Emissionen könnten durch CCS eingefangen werden.

CO₂-Intensitäten der Stahlherstellung

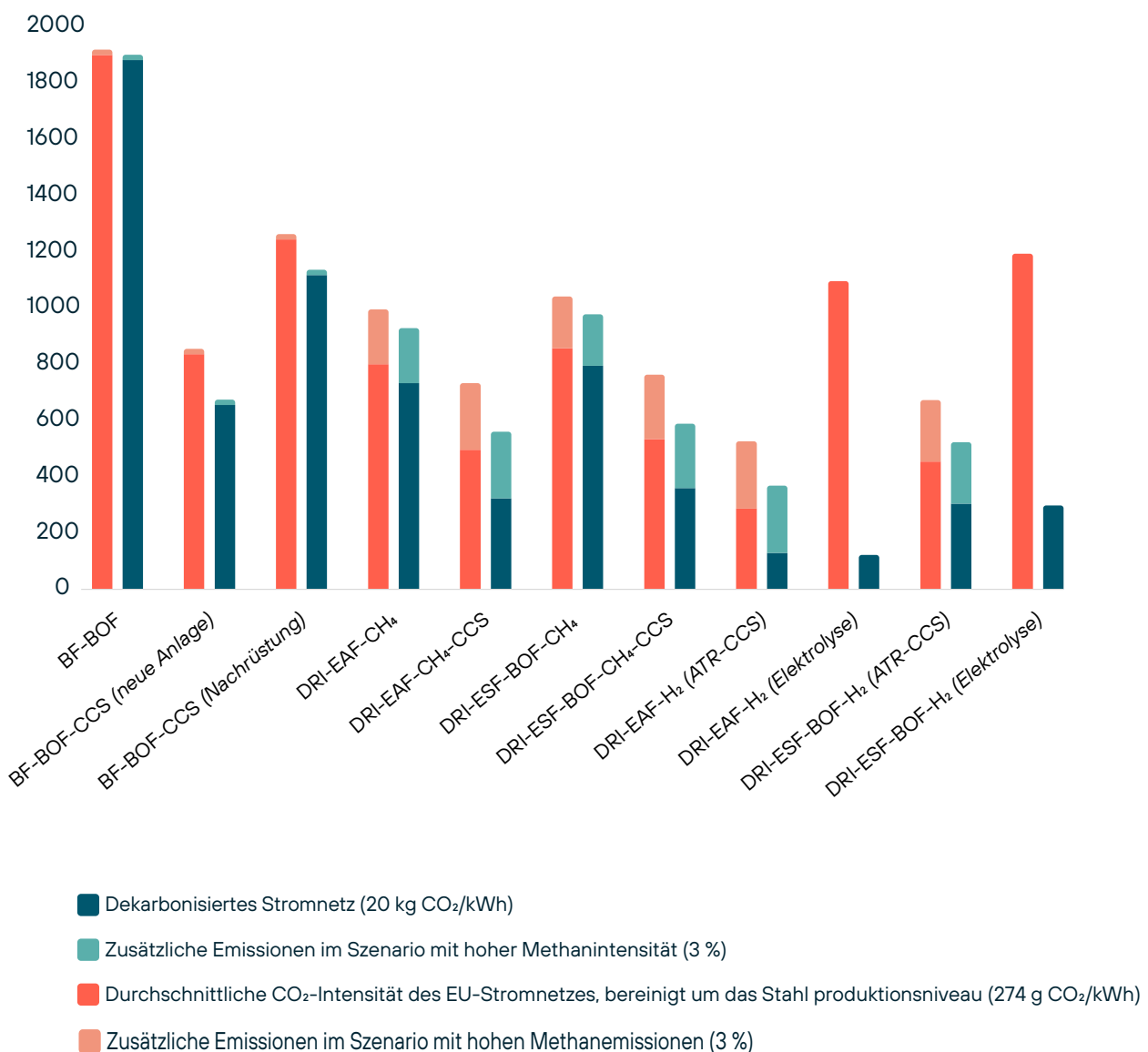


Abbildung 4: CO₂-Intensitäten der Stahlherstellung (Bellona 2024b)

Bei der BF-BOF-Route könnte CCS entweder am Hochofen oder am Kraftwerkskessel installiert werden. Somit ließen sich 70–75 % der Emissionen abscheiden (Agora Industry u. a. 2024). Je länger die noch veranschlagte Lebensdauer der bestehenden fossilen und emissionsreichen Anlagen (v. a. der Hochöfen) ist, desto eher müssen CCS-Pfade berücksichtigt werden. Dies ist vor allem in Schwellen- und Entwicklungsländern relevant, in Europa erscheint die Option von CCS an Hochöfen eher fraglich, da die nachträgliche Installation finanziell unrentabel ist und tiefergreifende Prozessumstellungen verschleppt. Außerdem steht ein großer Teil der Hochöfen in der EU kurz vor ihrem Laufzeitende.

Auf kurz- bis mittelfristiger Zeitskala machen inkrementelle Verbesserungen einen Großteil der bis dahin noch eher geringen Emissionseinsparungen aus. So nehmen Prognosen von 2019 an, dass bis zum Jahr 2030 ca. 90 % der möglichen Emissionseinsparungen durch technologische Optimierungen sowie Materialeffizienz erreicht werden könnten. Die wesentlich tieferen Einschnitte erfolgen anschließend und bringen die größeren Reduktionen mit sich: Für die verbleibenden Emissionen werden über 2030 hinaus CCS sowie vor allem die wasserstoffbasierte Stahlproduktion von entscheidender Bedeutung sein. Um Netto-Null zu erreichen, gehen Expert:innen davon aus, dass auch über 2050 hinaus noch ein Anteil der Emissionen durch CCS berücksichtigt werden muss. Hierzu zählen die bei der DRI-EAF-Route unvermeidbaren Emissionen, welche durch Flussmittel, Feuerfestmaterialien in der Ofenauskleidung sowie prozessbedingt Emissionen im EAF und Smelter entstehen. Diese belaufen sich auf ca. 0,06–0,32 t CO₂/t Stahl. Hinzu kommen die Emissionen zur Erzaufbereitung, welche ca. 0,09–0,15 t CO₂/t Stahl ausmachen (IEA, 2020). Für die darüber hinaus gehenden Emissionen bieten sich verschiedene Optionen an, deren Einsatz im Einzelfall geprüft werden sollte. CCS kann hier ebenso eine Rolle spielen, wie der Einsatz von nachhaltiger Biomasse. Grundsätzlich lassen sich durch CCS bei der Verwendung von Biomasse für Schaumschlacke, zur Reduktion oder zur Kohlenstoffanreicherung auch Negativemissionen generieren.

Um die 2045-Ziele zu erreichen, ist global eine Reduktion auf durchschnittlich unter eine Tonne CO₂ pro Tonne Stahl bis 2030 nötig (IEA 2021). Mit einer Stahlproduktion über die methan- oder wasserstoffbasierte DRI-EAF Route in Kombination mit CCS ließe sich dieses Ziel erfüllen, sofern ausreichend hochwertiges Eisenerz bzw. Wasserstoff zur Verfügung stehen.

Einen relevanten Sonderfall stellen hybride Routen dar, wie der von Thyssenkrupp verfolgte Pfad einer Direktreduktion mit anschließender elektrischer Schmelze, nach welcher das flüssige Roheisen weiter in die herkömmliche Konverterroute des Stahlwerks eingespeist wird. Dies bietet den Vorteil, dass auch geringere Erzgüten zum Einsatz kommen können, adressiert aber zunächst nicht die Konverteremissionen. Das dort anfallende Gasgemisch weist neben CO₂ einen hohen Anteil Kohlenmonoxid (CO) auf und ist somit sowohl noch vergleichsweise energiereich, als auch technisch betrachtet nach Aufreinigung potenziell für CCU-Prozesse geeignet – auch wenn es sich hierbei weiter um fossilen Kohlenstoff handelt.

Parallel dazu laufen Entwicklungen zu elektrochemischen Routen, welche allesamt noch nicht in kommerzieller Größe verfügbar sind. Sofern sich hiervon manche Pfade als erfolgreich durchführbar herausstellen sollten, würde dies den Lösungsraum substantiell verändern. Da hierzu allerdings keine belastbaren Erkenntnisse bestehen, ist weitere Forschung in diesem Bereich vonnöten (Bellona 2024b).

Der Bedarf an CCS in der Stahlindustrie kann deutlich reduziert werden, wenn eine Reihe an Maßnahmen konsequent umgesetzt wird. Mit Fortschreiten der Transformation nimmt die Attraktivität des Einsatzes von CCS immer weiter ab (E3G und Bellona 2026).

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. An erster Stelle steht die **Verringerung des absoluten Stahlverbrauchs** durch effizientere Nutzung und Materialsubstitution. Wo weniger Stahl benötigt wird, sinken unmittelbar die CO₂-Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Ergänzend trägt eine höhere Materialeffizienz in Produktion und Design dazu bei, dass weniger Primärstahl eingesetzt werden muss.
2. Die Verfügbarkeit an Stahlschrott wird ab 2030 weltweit sukzessive zunehmen, weswegen **Recycling-Methoden** weiterentwickelt werden sollten, die höhere Reinheiten und damit eine vielfältigere hochwertige Wiederverwendung ermöglichen (Beispiel [TSR40-Schrott für die Automobilindustrie](#)). In welchem Maß hierdurch für die deutsche und europäische Stahlindustrie relevant größere Schrottmengen zur Verfügung stehen, ist allerdings unklar und neben weltweiten Entwicklungen auch von entsprechender politischer Anreizsetzung abhängig.
3. Die **Anregung der Nachfrage und Ermöglichung vermehrter Schrottnutzung** in Deutschland erhöhen die inländische Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen und stärken den Recyclingkreislauf.
4. Zudem kann der Bedarf an emissionsintensivem Primärstahl gesenkt werden, wenn **geeignete Stahlschrotte gezielt wiederverwendet** werden. Dies ist u. a. bei Schienen der Fall, die technisch im Elektrolichtbogenofen recycelt und wieder zu neuen Schienen verarbeitet werden können. Bislang wird Schienenstahl jedoch häufig weiterhin über die primärstahlbasierte Route hergestellt.
5. Die **DRI-EAF-H₂-Route** mit erneuerbaren Energien bietet unter den marktreifen Primärstahlproduktionsrouten das größte Minderungspotenzial von 97 % gegenüber der BF-BOF-Route (Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019). Hier könnte Stahl, wenn sowohl grüner Wasserstoff als auch erneuerbare Energien ausreichend verfügbar und finanziell erschwinglich sind, ohne CCS nahezu klimaneutral produziert werden. Die Verfügbarkeit hochqualitativer, für den EAF-Prozess geeigneter Eisenerze (mit mehr als 67 % Eisenanteil) stellt hierbei allerdings eine relevante Limitation dar. Hierfür sind weitere Aufbereitungsschritte (z. T. mit zusätzlichen Emissionen und Energiebedarfen) erforderlich.
6. Eine **Beschleunigungsoffensive** für die Dekarbonisierungsvorhaben der Stahlindustrie und der zugehörigen Infrastrukturen ist notwendig. Dazu gehören verbindliche Genehmigungsfristen, konsequente Digitalisierung der Verfahren, mehr Personal in den Genehmigungsbehörden sowie eine gesetzliche Klarstellung – analog zu § 2 EEG 2023 –, dass diese Vorhaben im überragenden öffentlichen Interesse liegen. Planungs- und Genehmigungsprozesse müssen frühzeitig gebündelt und koordiniert werden, damit Infrastruktur und Werksumbauten parallel realisiert werden können.

- 
7. Ein beschleunigter **Hochlauf der (grünen) Wasserstoffwirtschaft**, gestützt durch den massiven **Ausbau erneuerbarer Energien**, leistungsfähiger Stromnetze und Speicher, ermöglicht die Umstellung auf nahezu CO₂-freie Produktionsverfahren.
 8. **Kohlenstoff** wird in der Stahlherstellung auch in Zukunft notwendig sein. Dieser könnte zumindest teilweise **aus nachhaltigen biogenen Quellen** gedeckt werden – das entstehende CO₂ sollte aber auch hier weitestgehend aufgefangen werden.
 9. Internationale Lieferketten für grünen Stahl sollten gefördert werden, um zukünftige Wasserstoff-DRI-Anlagen zu unterstützen. CBAM spielt hier eine bedeutende Rolle für die globale Stahltransformation.

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. Schließlich sind **Investitionen in Forschung und Entwicklung** alternativer Technologien, etwa der direkten Elektrifizierung von Stahlprozessen durch Schmelzoxidelektrolyse (MOE) oder der Wasserstoffplasma-Schmelzreduktion (HPSR), entscheidend, um langfristig ganz ohne fossile Energieträger auszukommen.
2. **Förderung** wie Investitionsanreize mit Differenzverträgen und steuerliche Vorteile bei gleichzeitigem Abbau fossiler Subventionen schaffen Planungssicherheit und beschleunigen den Übergang zu einer erneuerbaren Rohstoffbasis.
3. Ebenso wichtig für Planungssicherheit und einen sicheren Innovationsraum ist ein verlässlich ansteigender ETS-Preis sowie die Weiterentwicklung des **CBAM**.
4. Die Mittel aus dem Sondervermögen Infrastruktur bieten die Chance, **grüne Leitmärkte** sowie grüne öffentliche Beschaffung gezielt aufzubauen. Die öffentliche Hand kann z. B. im Bauwesen und bei der Bahn als strategischer Leitmarkt fungieren.
5. Subventionen und Unterstützungsmaßnahmen sollten an verbindliche Defossilisierungsfahrpläne geknüpft oder grüner Stahl steuerlich begünstigt werden.

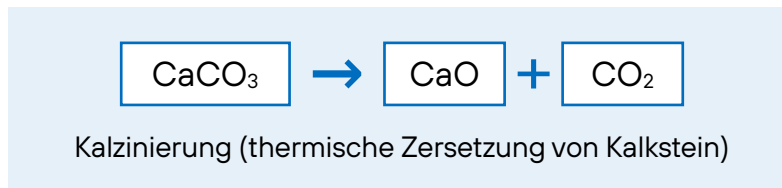
2.3. Bau- und Zementindustrie

Emissionen

Die Zementproduktion gehört weltweit zu den emissionsintensivsten Industrieprozessen. In Deutschland verursacht sie rund 8 % der industriellen CO₂-Emissionen (VDZ 2021), was 2017 etwa 20,5 Mt CO₂ entsprach und somit 2,5 % der nationalen THG-Emissionen (Markewitz u. a. 2019).

Die Emissionen entstehen hauptsächlich durch zwei Quellen: (1) prozessbedingte Emissionen, die beim chemischen Umwandlungsprozess von Kalkstein in Klinker anfallen, und (2) energiebedingte Emissionen durch den Einsatz fossiler Brennstoffe für die thermische Energieversorgung.

Die chemische Reaktion (Kalzinierung) des in Kalkstein enthaltenen Kalziumkarbonats (CaCO₃) zu Kalziumoxid (CaO) setzt CO₂ frei:



Dieser Prozess ist verantwortlich für etwa 60–65 % der Gesamtemissionen je Tonne Zement. Der Rest entfällt auf die thermische Energiezufuhr (30–35 %) sowie kleinere Beiträge aus Mahlprozessen und Stromverbrauch (VDZ 2021).

In der EU sind laut Eurostat 33,3 % der Gebäude untergenutzt, während die systematische Erfassung von Leerständen oft fehlt (geschätzte Leerstandsquote: Wohnungen: ca. 5 % (Alaux u. a. 2024); Gewerbegebäude: ca. 7 % (OECD 2022)). In Deutschland stehen laut Zensus 2022 1,9 Millionen Wohnungen leer. Das entspricht 4,5 Prozent des Wohnungsbestands (Deutschlandatlas 2022). Nationale Initiativen in Frankreich und Polen zeigen, dass ein großer Teil leerstehender Gebäude für den Wohnungsmarkt nutzbar ist (27 % in Frankreich, 47 % in Polen (European Commission u. a. 2024)). Renovierungen bestehender Gebäude können bis zu 70 % der CO₂-Emissionen im Vergleich zu Neubauten einsparen (Alaux u. a. 2024; European Commission u. a. 2024; Marique und Rossi 2018). Suffizienzmaßnahmen sind kostengünstig und liefern sofortige Vorteile, decken aber langfristig nicht den gesamten Wohnraumbedarf.

Bereits in der Planungsphase können durch optimiertes Design und Fertigteile Beton- und Zementverbrauch um bis zu 50 % gesenkt werden (Alaux u. a. 2024; Favier u. a. 2018), was auch die Emissionen um 30–40 % verringert (Habert u. a. 2020). In der Herstellungs- und Bauphase minimiert präzise Fertigung Abfall (Material Economics 2018), während Vorfertigung Montagezeit, Materialeinsatz und Lärm reduziert (Dong u. a. 2015).

Holzbau kann im Bauwesen Beton ersetzen und so Emissionen senken. Es speichert während des Wachstums ca. 1,65 kg CO₂ pro kg Holz (Woodard und Milner 2016). Je nach Anwendung reicht die Emissionsreduktion von 15 % (Fassade) bis 77 % (vollständiger Ersatz) (Hart und Pomponi 2020; Malmqvist u. a. 2018). Nachhaltigkeit erfordert zertifizierte Forstwirtschaft, um Entwaldung, Biodiversitätsverlust und Bodenschäden zu vermeiden (Hart und Pomponi 2020; Woodard und Milner 2016). In Europa wachsen jährlich 140 Mio. m³ Holz (Reyes u. a. 2021), wovon 65 % geerntet werden – potenziell 91 Mio. m³ zur Beton-Substitution. Dies entspricht 12,4–18,6 % der EU-Zementproduktion, die reale Einsparung liegt wegen Lebenszyklus-Emissionen bei 6,5–17,2 % (Camia u. a. 2018; Doodoo u. a. 2022). Hemmnisse sind begrenzte Verfügbarkeit, Konkurrenz mit Papier- und Energiewirtschaft sowie Zielkonflikte z.B. mit der Aufforstung.



Ca. 2/3 der bei der derzeitigen Zementproduktion wie auch bei der Kalkproduktion anfallenden CO₂-Emissionen sind unmittelbar prozessbedingt und stammen aus der chemischen Umwandlung von Kalkstein (bzw. anderen tonhaltigen Mineralien) bzw. dessen Hauptkomponente Kalziumcarbonat in Kalziumoxid, welches in Zementklinker oder Branntkalk enthalten ist. Es handelt sich hierbei also um fossile CO₂-Emissionen, im Wesentlichen aus Kalkstein oder Mergel. Ein weiteres Drittel der Emissionen ist energiebedingt.

Zementöfen werden aktuell überwiegend mit fossilen Brennstoffen betrieben, ergänzt durch Strom (13 % des Gesamtbedarfs, davon 70 % fürs Mahlen) (European Commission. Joint Research Centre. 2023b). Erneuerbarer Strom kann diesen Anteil leicht decken, doch der Ersatz fossiler Brennstoffe im Ofen ist komplexer. Alternative Brennstoffe wie Abfälle und Biomasse sind technisch möglich, erfordern jedoch Qualitätsstandards und oft Vorbehandlung. Nur nachhaltige biogene Abfälle können als emissionsarm angesehen werden. CEMBUREAU strebt bis 2050 einen Anteil von 95 % an (Cembureau 2024; European Commission. Joint Research Centre. 2023b). Weitere Optionen sind die Elektrifizierung der Öfen (z. B. Plasma-, Mikrowellen-, Widerstands- und Induktionsheizungen) mit erneuerbarem Strom, was hohe Investitionen und ausgereifte Technik erfordert. Eine vollständige Elektrifizierung würde rund 125,4 TWh/Jahr benötigen (~9,6 % der EU-Erneuerbaren 2024) (European Commission. Joint Research Centre. 2023b). Niedrigemissions-Wasserstoff könnte fossile Brennstoffe ersetzen, ist jedoch in Europa knapp, teuer und energetisch weniger effizient als in Stahl- oder Düngemittelproduktion (Bellona 2024b).

Die Reduktion des Klinkeranteils im Zement ist einer der wirkungsvollsten Hebel zur Senkung von CO₂-Emissionen (Cembureau 2024). Durch den Einsatz sogenannter *Supplementary Cementitious Materials* (SCMs) – wie Hüttensand, Flugasche, Puzzolane, kalzinierte Tone oder Kalkstein – lässt sich Klinker teilweise ersetzen, ohne die Qualität wesentlich zu beeinträchtigen (Ryung Kim u. a. 2024). Viele dieser Materialien fallen als Nebenprodukte in Industrieprozessen an oder kommen natürlich vor, stoßen jedoch oft an Grenzen wie sinkende Verfügbarkeit, keine etablierten Lieferketten oder begrenzte Reaktivität. Karbonatisierte Materialien können zusätzlich CO₂ dauerhaft binden, erfordern jedoch geeignete Aufbereitungsprozesse (Marathe u. a. 2025). Neben SCMs spielen *alternative Rohstoffe* (ARMs) und *alkaliaktivierte Materialien* (AAMs) eine wachsende Rolle. ARMs werden dem Rohmehl vor dem Brennprozess beigemischt und können Emissionen sowie Energiebedarf senken. AAMs sind klinkerfreie Bindemittel, die im Herstellungsprozess je nach Zusammensetzung 40–80 % weniger CO₂ emittieren als herkömmlicher Portlandzement (Lanjewar u. a. 2023), scheitern bislang jedoch oft an fehlenden Normen, höheren Kosten und konservativen Marktstrukturen (Komkova und Habert 2023; Pol Segura u. a. 2023).

CCS-Bedarf

Bellona Europa hat im September 2025 einen Bericht zur Zementproduktion veröffentlicht ([Bellona 2025d](#)), der unter anderem den Bedarf an CCS-Technologien in verschiedenen Szenarien aufzeigt. Dieses Papier bezieht sich dabei auf Szenario 3 aus diesem Bericht. Im Folgenden werden die maßgeblichen Einflussfaktoren auf dem deutschen Markt sowie den daraus resultierenden Bedarf beleuchtet.

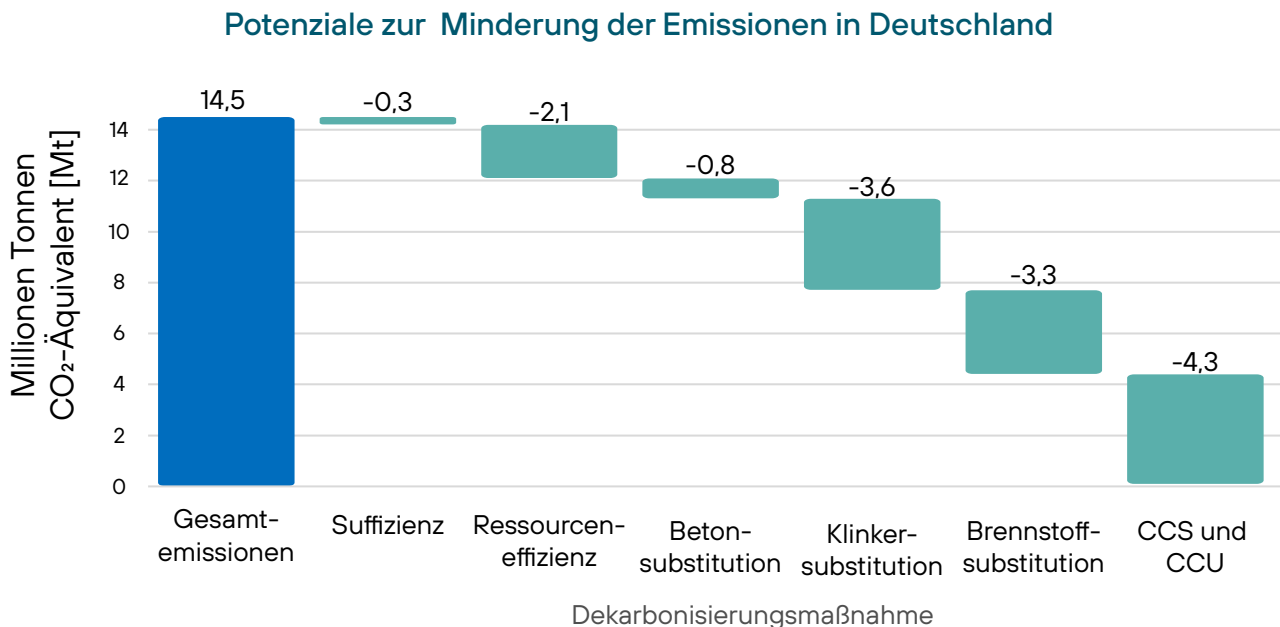


Abbildung 5. Quelle: Bellona 2025d.

Dieses Szenario ist relativ konservativ, setzt auf die Priorisierung zusätzlicher zementartiger Materialien (SCMs) gegenüber anderen Dekarbonisierungshebeln und geht davon aus, dass die bestehenden Zementnormen unverändert bleiben. Dennoch müssen nicht mehr als 30 % der absoluten Emissionen der Zementproduktion durch CCS gemindert werden. Eingesetzt wird eine Mischung aus 9 % Hochofenschlacke, 21 % kalziniertem Ton und 20 % Kalksteinmehl. Diese Kombination erlaubt bei 50 % Klinkerersatz eine Emissionsreduktion von rund 32 %.

Da der verfügbare SCM-Anteil unter realistischen Bedingungen begrenzt ist, gewinnt in diesem Szenario CCS an Bedeutung. Das Substitutionsniveau bleibt dennoch mit den vorhandenen Ressourcen, innerhalb der aktuellen Normen und ohne Beeinträchtigungen der Produkteigenschaften umsetzbar. Das Szenario basiert auf der Annahme, dass Politik oder Industrie den SCM-Einsatz gezielt fördern, um den langfristigen Bedarf an CCS zu senken. Insgesamt ergibt sich eine relativ ausgewogene Bedeutung von Klinkerersatz, Brennstoffersatz und CCS ([Bellona 2025d](#)).

Um den erwartbar hohen CCS-Bedarf zu begrenzen, ist eine Kombination aus Maßnahmen notwendig.

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. **Suffizienz** setzt auf die Nutzung leerstehender oder untergenutzter Gebäude statt Neubauten, um Rohstoffverbrauch, Emissionen und Flächenversiegelung zu reduzieren. Sie schafft schneller bezahlbaren Wohnraum und spart öffentliche Mittel für Infrastruktur.
2. **Ressourceneffizienz** im Bauwesen zielt darauf ab, Materialverbrauch und Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu reduzieren (Kedir und Hall 2021). Fertigteile ermöglichen zudem „Design for Disassembly“, wodurch Bauteile am Ende der Lebensdauer des Gebäudes wiederverwendet werden können, was die Kreislauffähigkeit erhöht (Aye u. a. 2012). Barrieren in Bauvorschriften (Alaux u. a. 2024), fehlendem Wissen, hohen Investitionskosten und Vorurteilen gegenüber Fertigbau (Scrivener u. a. 2018) müssen abgebaut werden.
3. **Ökodesign-Vorgaben der CPR** (Construction Products Regulation) sind ein zentrales Instrument zur Erreichung der Klimaziele. Über CPR sind Bauprodukte so zu gestalten, dass sie minimale CO₂-Emissionen über Herstellung, Nutzung und Rückbau aufweisen.
4. Die EU entwickelt mit der CRCF (2024) einen Rahmen zur Zertifizierung nachhaltiger, langlebiger **Holzbaustoffe** (Rüter u. a. 2025; Woodard und Milner 2016). Auch deswegen sollte speziell die energetische Holzverwertung weiter eingeschränkt werden.
5. Langfristig bieten Ansätze zur **Reduktion des Klinkeranteiles**, kombiniert mit technischer Innovation und **regulatorischer Unterstützung**, erhebliches Potenzial für eine klimafreundlichere Zementindustrie. Hierzu gehört es regulatorische Vorgaben der DIN EN 197-Normenreihe, welche die zulässigen Zementarten und Zuhaltstoffe sowie deren Anteile festlegen, anzupassen, um den Spielraum für den breiten Einsatz neuer, CO₂-armer Bindemittel mit hohem Anteil an alternativen Komponenten zu erhöhen. So kann die noch geringe Bereitschaft der Bauwirtschaft erhöht werden, Mischungen mit hohem Anteil an kalziniertem Ton oder Kalksteinmehl einzusetzen.
6. **Definition nachhaltiger und emissionsarmer Abfallstoffe** und biogener Brennstoffe für die Zementherstellung sorgt für Klarheit beim Einsatz dieser.
7. Die Verwendung standardisierter Umwelt- und Klimakriterien in Form von **Standards oder Labeln** können vor allem im privaten Bereich CO₂-armen Bau anregen.

Maßnahmen zur Minderung des CCS-Bedarfs

1. Schließlich sind **Investitionen in Forschung und Entwicklung** alternativer Technologien entscheidend.
2. **Förderung** wie Investitionsanreize mit Differenzverträgen und steuerliche Vorteile bei gleichzeitigem Abbau fossiler Subventionen schaffen Planungssicherheit und beschleunigen den Übergang zu einer erneuerbaren Rohstoffbasis.
3. Ebenso wichtig für Planungssicherheit und einen sicheren Innovationsraum ist die Beibehaltung eines verlässlich ansteigenden **ETS** sowie die Weiterentwicklung von **CBAM**. Mit steigenden CO₂-Kosten werden Alternativen wirtschaftlich attraktiver.
4. Die Mittel aus dem Sondervermögen Infrastruktur bieten die Chance, **grüne Leitmärkte** sowie grüne öffentliche Beschaffung gezielt aufzubauen. Die öffentliche Hand kann z. B. im Bauwesen als strategischer Leitmarkt fungieren. Die Anpassung des Vergaberechts, sodass umwelt- und klimabezogene Kriterien verpflichtend sind und gesetzlich verankert werden, ist hierfür elementar ([Bellona 2025f](#)). Lebenszykluskosten und Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen müssen bei öffentlichen Bauvorhaben maßgeblich sein. Der niedrigste Anschaffungspreis darf nicht mehr ausschlaggebend sein.

3. Fazit

Ambitionierte Szenarien sind unverzichtbar, um aufzuzeigen, was möglich wäre, wenn alles ideal verläuft. Reale Entwicklungen können sektoral sogar besser verlaufen – etwa durch sprunghafte technologische Innovationen oder positive gesellschaftliche Kipppunkte. Wenn sämtliche Minderungsoptionen ihr Potenzial schnell entfalten würden, wäre sogar ein Pfad denkbar, der ohne CCS an fossilen Punktquellen auskommt. Dies ist allerdings sehr unwahrscheinlich, und selbst in diesem Fall wäre der Klimaschutz unter Einbeziehung von CCS nochmals robuster, denn Klimaneutralität wäre früher erreichbar. Die gleiche Aussage gilt für alle anderen Minderungsoptionen. Jede ist für sich genommen wichtig, aber wir können uns auf keine einzelne verlassen. Nur bei maximaler Emissionsreduktion können Restemissionen überhaupt durch natürliche sowie permanente CO₂-Entnahme ausgeglichen werden, denn die verfügbaren Verfahren sind mitunter ressourcenintensiv oder natürlich begrenzt.

Für ein ganzheitliches Bild sind auch pessimistische Szenarien notwendig, um auf eine deutliche Zielverfehlung vorbereitet zu sein. Nur so stellen wir sicher, dass Deutschland im Ernstfall nicht die Handlungsoptionen ausgehen. Auch die zeitliche Ebene ist elementar: Statt die einzelnen Optionen nacheinander anzugehen, müssen wir aufgrund der ablaufenden Zeit alle Maßnahmen in den nächsten Jahren angehen und umsetzen.

Lock-ins, also das Festhalten an bestehenden Strukturen oder Technologien durch CCS, sind unwahrscheinlich, solange die Betriebskosten (OPEX) alternativer Emissionsminderungsmaßnahmen günstiger sind. In den wenigen Fällen, wo CCS bereits jetzt als die günstigste Reduktionsoption gehandelt wird, sprechen Planungskomplexitäten und Vorlaufzeiten nicht für eine vorschnelle Entscheidung zugunsten von CCS. Zudem sind in Zeiten fordernder ökonomischer Rahmenbedingungen und Schwierigkeiten des Hochlaufs alternativer Dekarbonisierungspfade auch Erwägungen zu System- und Transformationskosten legitim. Das gilt immer dann, wenn realistischere ohne den Einsatz von CCS nicht etwa ein ambitioniertes Projekt verfolgt wird, sondern der Status quo einer konkreten CO₂-emittierenden Anlage konserviert würde. Dennoch spielen Infrastrukturen und institutionelle Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle, die über wirtschaftliche Erwägungen hinausgehen. Auch deswegen müssen wir unser Handeln stets überprüfen und neu ausrichten, wenn sich Fehlentwicklungen abzeichnen.

Die Lösung liegt darin, Transformationspfade frühzeitig zu antizipieren, sichtbar zu machen und dafür breiten Rückhalt innerhalb des demokratischen Spektrums zu organisieren. Diese Pfade werden dabei stets mit Spielräumen und Flexibilitäten ausgestattet sein müssen, um auf veränderte Rahmenbedingungen reagieren zu können. Nur so lässt sich eine gesellschaftlich akzeptierte und stabile Grundlage für echten Wandel schaffen.

Ein umsichtiger Einsatz von CCS wird dabei für Industriestaaten erforderlich und aus Klimaperspektive sinnvoll sein – etwa um Emissionen an Punktquellen zu reduzieren, die sich auf absehbare Zeit nicht anders vermeiden lassen (unabhängig davon, ob es sich hierbei um fossiles oder biogenes CO₂ handelt). Voraussetzung dafür ist jedoch, dass klar und sichtbar wird, dass alle anderen verfügbaren Hebel zur Emissionsminderung parallel genutzt werden. Finanzpolitische Fehlanreize lassen sich durch klare Regeln, CO₂-Bepreisung, zielgerichtete Förderung und nachhaltige Investitionsrichtlinien effektiv verhindern. Nur so kann CCS einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, ohne unnötige Kosten oder Verzögerungen in der Transformation zu verursachen.

Deswegen ist eine Priorisierung von Bereichen mit schwer vermeidbaren Emissionen essenziell. Die Industrie braucht hierfür Planungssicherheit, was einen stabilen und verlässlichen Policy-Mix erfordert, inklusive Quoten, ein starkes ETS und CBAM sowie gezielte und gut ausgestattete Differenzverträge, um für die Transformation Investitionsentscheidungen zu treffen.

Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende, und Wuppertal Institut. 2019. *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*. https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf.
- Agora Industrie, Systemiq. 2023. *Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft: Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien*. <https://www.agora-industrie.de/publikationen/resilienter-klimaschutz-durch-eine-zirkulaere-wirtschaft>.
- Agora Industry, Wuppertal Institut, und Lund University. 2024. *Low-Carbon Technologies for the Global Steel Transformation. A Guide to the Most Effective Ways to Cut Emissions in Steelmaking*. Berlin. https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projekte/2021/2021-06_IND_INT_Global-Steel/A-IND_324_Low-Carbon-Technologies_WEB.pdf.
- Agora Think Tanks. 2024. *Klimaneutrales Deutschland - Von der Zielsetzung zur Umsetzung*. Berlin. <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-studie>.
- Alaux, Nicolas, Christopher Marton, Jacob Steinmann, u. a. 2024. „Whole-Life Greenhouse Gas Emission Reduction and Removal Strategies for Buildings: Impacts and Diffusion Potentials across EU Member States“. *Journal of Environmental Management* 370 (November): 122915. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122915>.
- Aye, Lu, T. Ngo, R. H. Crawford, R. Gammampila, und P. Mendis. 2012. „Life Cycle Greenhouse Gas Emissions and Energy Analysis of Prefabricated Reusable Building Modules“. *Energy and Buildings* 47 (April): 159–68. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.049>.
- Bashmakov, I. A., L. J. Nilsson, A. Acquaye, u. a. 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 11*. April 1. <https://escholarship.org/uc/item/23n103jv>.
- BDI. 2021. *Klimapfade 2.0 – Aufbruch in die Klima-Zukunft*. <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf>.
- BEE. 2025. *Entwicklung des Stromverbrauchs durch Sektorenkopplung und Wasserstoffherzeugung - Auswirkungen auf die Klimaschutzziele und die Energiekosten*. Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.
- Bellona. 2024a. *Decarbonising Plastics - A review of potential decarbonisation pathways of plastics production and end-of-life treatment*. <https://eu.bellona.org/publication/decarbonising-plastics/>.
- Bellona. 2024b. *Net-Zero Pathways for European Steel*. <https://eu.bellona.org/publication/net-zero-pathways-for-european-steel/>.
- Bellona. 2025a. *CCS vs Transformation – Steht CCS der Transformation zu einer klimaneutralen Industrie im Weg?* CCS vs Transformation – Steht CCS der Transformation zu einer klimaneutralen Industrie im Weg? <https://de.bellona.org/publication/ccs-vs-transformation/>.
- Bellona. 2025b. *CO₂-Speicherkapazität: Von der Potenzialabschätzung zur realistischen Erschließbarkeit*. <https://de.bellona.org/publication/co2-speicherkapazitaet/>.
- Bellona. 2025c. *Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes BT-Drucksache 21/1494*. https://www.bundestag.de/resource/blob/1114800/Stellungnahme_Bellona.pdf.

- Bellona. 2025d. *Net-Zero Pathways for European Cement*. <https://eu.bellona.org/publication/report-net-zero-pathways-for-european-cement/>.
- Bellona. 2025e. „Press Release – EU Adopts Delegated Act on Low-Carbon Hydrogen, but New Rules Fall Short on Climate Integrity“. Bellona EU, Juli 9. <https://eu.bellona.org/2025/07/09/press-release-eu-adopts-delegated-act-on-low-carbon-hydrogen-but-new-rules-fall-short-on-climate-integrity/>.
- Bellona. 2025f. *VERBÄNDEANHÖRUNG ZUM VERGABEBESCHLEUNIGUNGS- GESETZ*. <https://de.bellona.org/publication/verbandeanhorung-zum-vergabebeschleunigungsgesetz/>
- Bellona. 2025g. *Wie der KTF zukunftsfähig wird und so Transformationsfinanzierung sowie Akzeptanz sichert – Policy Paper*. <https://de.bellona.org/publication/ktf-zukunft/>.
- Bellona Deutschland. 2025. *Systemfrage Gas: Der Elefant im Raum, den Reiches 10-Punkte-Plan zum Energiewende-Monitoring nicht sehen will?* Berlin. <https://de.bellona.org/publication/energiewende-monitoring/>.
- Bellona Deutschland. 2026. *CO₂-Differenzverträge als Basis für Investitionssicherheit – Analyse der aktuellen Förderrichtlinie und Vorschläge zur Optimierung*. Policy Paper. Berlin. <https://de.bellona.org/publication/co2-differenzvertraege/>.
- Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) (2019). <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>.
- Camia, Andrea, Noemi Emanuela Cazzaniga, Roberto Pilli, und Giorgio Vacchiano. 2018. *Brief on forestry biomass production*. https://www.researchgate.net/publication/333774976_Brief_on_forestry_biomass_production.
- Carpenter, Anne. 2012. *CO₂ abatement in the iron and steel industry*. IEA Clean Coal Centre.
- Cembureau. 2024. *Cembureau's Net Zero Roadmap*. <https://cembureau.eu/media/ulxj5lyh/cembureau-net-zero-roadmap.pdf>.
- Conversio. 2025. *Status quo und Prognose des Bedarfs und der Verfügbarkeit von Post-Consumer-Rezyklaten im Jahr 2030*. <https://www.bkv-gmbh.de/studie-rezyklatverfuegbarkeit.html>.
- dena. 2021. *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität*. <https://www.dena.de/infocenter/dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet-1/>.
- dena. 2025. *Kreislaufwirtschaft als Zukunftsstrategie – Neue Wege für die energieintensive Industrie in Deutschland am Beispiel der Stahl-, Kunststoff- und Zementindustrie*. Dena, Deutsche Energie-Agentur.
- Deutschlandatlas. 2022. „Der Deutschlandatlas – Wie wir wohnen – Wohnungsleerstand“. <https://www.deutschlandatlas.bund.de/DE/Karten/Wie-wir-wohnen/046-Wohnungsleerstand.html>.
- Dodoo, Ambrose, Truong Nguyen, Michael Dorn, Anders Olsson, und Thomas K. Bader. 2022. „Exploring the Synergy between Structural Engineering Design Solutions and Life Cycle Carbon Footprint of Cross-Laminated Timber in Multi-Storey Buildings“. *Wood Material Science & Engineering* 17 (1): 30–42. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1974937>.
- Dong, Ya Hong, Lara Jaillon, Peggy Chu, und C. S. Poon. 2015. „Comparing Carbon Emissions of Pre-cast and Cast-in-Situ Construction Methods – A Case Study of High-Rise Private Building“. *Construction and Building Materials* 99 (November): 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.145>.
- E3G, und Bellona. 2026. *Carbon Capture and Storage Ladder – Assessing the Climate Value of CCS Applications in Europe 2026 Update*. <https://de.bellona.org/publication/ccs-ladder-2-0/>.

- Eitze, Jasper, Andrea Lübcke, Michaela Löffler, Jens Artz, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, und DECHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Hrsg. 2024. *Wasserstoff-Kompass: Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft*. 1. Auflage. Acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
- Eurofer EU. 2024. *European Steel in Figures*. <https://www.eurofer.eu/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2024>.
- Europäische Union. 2026. „VERORDNUNG (EU) 2026 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Verordnung (EU) 2021/1119 hinsichtlich der Festlegung eines Klimazwischenziels der Union für 2040“. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-5-2026-INIT/de/pdf>.
- European Commission, BPiE, und Ramboll Deutschland GmbH, Hrsg. 2024. *Sufficiency in the Building Sector - for the EU Whole Life Carbon Roadmap: Final Report*. 1st edition. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2779/5787055>.
- European Commission. Joint Research Centre. 2023a. *Clean Energy Technology Observatory, Carbon Capture Utilisation and Storage in the European Union: Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets : 2023*. Publications Office. <https://doi.org/10.2760/882666>.
- European Commission. Joint Research Centre. 2023b. *Decarbonisation Options for the Cement Industry*. Publications Office. <https://doi.org/10.2760/174037>.
- European Hydrogrn Observatory. 2026. „Scenarios for Future Hydrogen Demand | European Hydrogen Observatory“. <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/tools-reports/scenarios-future-hydrogen-demand>.
- European Scientific Advisory Board on Climate Change. 2025. *Scaling up Carbon Dioxide Removals – Recommendations for Navigating Opportunities and Risks in the EU*. <https://climate-advisory-board.europa.eu/reports-and-publications/scaling-up-carbon-dioxide-removals-recommendations-for-navigating-opportunities-and-risks-in-the-eu>.
- Favier, Aurélie, Catherine De Wolf, Karen Scrivener, und Guillaume Habert. 2018. *A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry: Technology Assessment for Full Decarbonisation of the Industry by 2050*. ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000301843>.
- Forschungszentrum Jülich. 2022. *Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045*. <https://www.fz-juelich.de/de/ice/ice-2/projekte/ksg2045-studie-fuer-deutschland>.
- Fraunhofer ISI, consentec, ifeu, und TU Berlin. 2022. *Langfristszenarien T45-Szenarien*. <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>.
- Future Cleantech Architects. 2024a. *Decarbonizing High-Temperature - Heat in Industry Technology assessment and policy recommendations for Europe*.
- Future Cleantech Architects. 2024b. *THE BASICS & THE GAPS - Future Cleantech Factsheet Series #6*.
- Gesetz zur dauerhaften Speicherung und zum Transport von Kohlendioxid (2012). <https://www.gesetze-im-internet.de/kspg/KSpTG.pdf>.
- Global Energy Monitor. 2025. „Global Iron and Steel Tracker“. *Global Energy Monitor*, Mai 20. <https://globalenergymonitor.org/projects/global-iron-and-steel-tracker/>.
- Habert, G., S. A. Miller, V. M. John, u. a. 2020. „Environmental Impacts and Decarbonization Strategies in the Cement and Concrete Industries“. *Nature Reviews Earth & Environment* 1 (11): 559–73. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.

- Hart, Jim, und Francesco Pomponi. 2020. „More Timber in Construction: Unanswered Questions and Future Challenges“. *Sustainability* 12 (8): 3473. <https://doi.org/10.3390/su12083473>.
- Herold, Anke, Matthias Drösler, Antje Boetius, Andreas Bolte, Mariele Evers, Andreas Gattinger, Harald, Grethe, Rieke Hansen, Pierre L. Ibisch, Wolfgang Köck, Julia Pongratz, Katrin Rehdanz, Josef Settele, Franziska, und Tanneberger, Vicky M. Temperton, Michael Zschiesche. 2025. *Optionen zur Weiterentwicklung des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz. Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Natürlichen Klimaschutz für das Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit*.
- IEA. 2020. *Iron and Steel Technology Roadmap*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf.
- IEA. 2021. *Direct CO2 intensity of steel production in the Net Zero Scenario, 2018-2030*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-intensity-of-steel-production-in-the-net-zero-scenario-2018-2030>.
- IRENA. 2022. *Smart Electrification with Renewables: Driving the Transformation of Energy Services*. <https://www.irena.org/publications/2022/Feb/Smart-Electrification-with-Renewables>.
- Jäkel, Julia, Thomas de Maiziére, Peer Steinbrück, Andreas Voßkuhle, Gemeinnützige Hertie-Stiftung, und Hertie School, Hrsg. 2025. *Initiative für einen handlungsfähigen Staat: Abschlussbericht. Juli 2025*. Verlag Herder GmbH.
- Kedir, Firehiwot, und Daniel M. Hall. 2021. „Resource Efficiency in Industrialized Housing Construction – A Systematic Review of Current Performance and Future Opportunities“. *Journal of Cleaner Production* 286 (März): 125443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125443>.
- Komkova, Anastasija, und Guillaume Habert. 2023. „Environmental Impact Assessment of Alkali-Activated Materials: Examining Impacts of Variability in Constituent Production Processes and Transportation“. *Construction and Building Materials* 363 (Januar): 129032. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129032>.
- Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien. 2026. „Grundstoffchemische Industrie – Produktion chemischer Grundstoffe mit hohen Treibhausgasemissionen“. <https://www.klimaschutz-industrie.de/themen/branchen/grundstoffchemische-industrie/>.
- Kopernikus-Projekt Ariadne. 2021. *Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 Szenarien und Pfade im Modellvergleich*. <https://doi.org/https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>.
- Lagioia, Giovanni, Maria Pia Spinelli, und Vera Amicarelli. 2023. „Blue and green hydrogen energy to meet European Union decarbonisation objectives. An overview of perspectives and the current state of affairs“. *International Journal of Hydrogen Energy* 48 (4): 1304–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.044>.
- Lanjewar, Bhagyashri A., Ravijanya Chippagiri, Vaidehi A. Dakwale, und Rahul V. Ralegaonkar. 2023. „Application of Alkali-Activated Sustainable Materials: A Step towards Net Zero Binder“. *Energies* 16 (2): 969. <https://doi.org/10.3390/en16020969>.
- Loose, Milan. 2025. „CO2-Entnahme: Wie wird Deutschland jetzt eigentlich noch klimaneutral?“ *Tagesspiegel Background Energie & Klima*, April 15. <https://background.tagesspiegel.de/energie-und-klima/briefing/wie-wird-deutschland-jetzt-eigentlich-noch-klimaneutral>.
- Malmqvist, Tove, Marie Nehasilova, Alice Moncaster, u. a. 2018. „Design and Construction Strategies for Reducing Embodied Impacts from Buildings – Case Study Analysis“. *Energy and Buildings* 166 (Mai): 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.033>.

- Marathe, Shriram, Akhila Sheshadri, und Vsevolod Nikolaiev. 2025. „Life Cycle Assessment of Sustainable Air-Cured Alkali-Activated Concrete for Permeable Pavements Using Agro-Industrial Wastes“. *Scientific Reports* 15 (1): 22012. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04783-x>.
- Marique, Anne-Françoise, und Barbara Rossi. 2018. „Cradle-to-Grave Life-Cycle Assessment within the Built Environment: Comparison between the Refurbishment and the Complete Reconstruction of an Office Building in Belgium“. *Journal of Environmental Management* 224 (Oktober): 396–405. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.055>.
- Markewitz, Peter, Li Zhao, Maximilian Ryssel, u. a. 2019. „Carbon Capture for CO₂ Emission Reduction in the Cement Industry in Germany“. *Energies* 12 (12): 2432. <https://doi.org/10.3390/en12122432>.
- Material Economics. 2018. *The Circular Economy a Powerful Force for Climate Mitigation*. <https://www.sitra.fi/en/publication/circular-economy-powerful-force-climate-mitigation/>.
- Material Economics. 2019. *Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry | Material Economics*. <https://materialeconomics.com/node/13>.
- Meyer, Jörg, Louisa Zaubitzer, Frank Alsmeyer, Andreas Seeliger, und Lara Schmitt. 2025. *Kurzstudie Volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Bewertung der Energieeffizienz in der Industrie - Marktnahe und wirtschaftliche Energieeinsparpotentiale in der Industrie: Im Auftrag von Umweltinstitut München e.V., Deutsche Umwelthilfe e.V. und Bellona Deutschland gGmbH*. <https://de.bellona.org/publication/kurzstudie-energieeffizienz/>.
- Neuhoff, Karsten, Fernanda Ballesteros, Antonia Kurz, und Paula Niemöller. 2025. *Reform des CO₂-Grenzausgleichs ist entscheidend für wettbewerbsfähige Industrie*. Nr. 47. DIW Wochenbericht. DIW Berlin. https://doi.org/10.18723/diw_wb:2025-47-4.
- Odenweller, Adrian, und Falko Ueckerdt. 2025. „The Green Hydrogen Ambition and Implementation Gap“. *Nature Energy* 10 (1): 110–23. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01684-7>.
- OECD. 2022. „Affordable Housing Database“. <https://www.oecd.org/en/data/datasets/oecd-affordable-housing-database.html>.
- Peng, Mi, Yuzhen Ge, Rui Gao, u. a. 2025. „Thermal Catalytic Reforming for Hydrogen Production with Zero CO₂ Emission“. *Science* 387 (6735): 769–75. <https://doi.org/10.1126/science.adt0682>.
- Pol Segura, Isabel, Navid Ranjbar, Anne Juul Damø, Lars Skaarup Jensen, Mariana Canut, und Peter Arendt Jensen. 2023. „A Review: Alkali-Activated Cement and Concrete Production Technologies Available in the Industry“. *Heliyon* 9 (5): e15718. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15718>.
- Preston Aragonès, Mark. 2022. *NEGEM Briefing on the Role of CDR in IPCC AR6 WGIII | Negem Project*. <https://www.negemproject.eu/news/negem-briefing-on-the-role-of-cdr-in-ipcc-ar6-wgiii/>.
- Rat für technologische Souveränität. 2025. *Positionspapier „Materialforschung“*.
- Rehfeldt, Matthias, und Tobias Fleiter. 2024. *CO₂-neutrale Prozesswärme durch Elektrifizierung und Einsatz von Wasserstoff - perspektiven policy brief*. Fraunhofer ISI.
- Reigstad, G. A., J. Straus, O. Wolfgang, und Ouassou, J. A.1, Seck, G.S.2, Hache, E.2, Villavicencio, M. 2021. „CCS IN THE EUROPEAN ENERGY TRANSITION TO CLIMATE NEUTRALITY“. *Trondheim Conference on CO₂ Capture, Transport and Storage*.
- Reisinger, Andy, Jan S. Fuglestad, Anna Pirani, u. a. 2025. „Overshoot: A Conceptual Review of Exceeding and Returning to Global Warming of 1.5°C“. In *Annual Review of Environment and Resources*, Bd. 50. Nr. Volume 50, 2025. Annual Reviews. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-environ-111523-102029>.

- Reyes, Natalia, Barbara Rodríguez, Eduardo Wiegand, u. a. 2021. „Achieving zero carbon emissions in the construction sector: The role of timber in decarbonising building structures“. Preprint, Engineering, November 17. <https://doi.org/10.33774/coe-2021-hgd6q-v2>.
- Rüter, Sebastian, Elias Hurmekoski, Petr Havlík, und Elonora Tan. 2025. *D5.2 Report on HWP contribution potentials to EU forest sector mitigation*. https://www.forestnavigator.eu/wp-content/uploads/FN_D5.2_final.pdf.
- Ryung Kim, Hyae, Jessica Cong, Isabel Hoyos, und et al. 2024. *Decarbonizing Cement*. Columbia Business School. <https://business.columbia.edu/sites/default/files-efs/imce-uploads/CKI/Documents/CKI%20Cement-241017.pdf>.
- Sadr, Mohammad, Danial Esmaeili Aliabadi, Matthias Jordan, und Daniela Thrän. 2024. „A Bottom-up Regional Potential Assessment of Bioenergy with Carbon Capture and Storage in Germany“. *Environmental Research Letters* 19 (11): 114047. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad7edd>.
- Scholz, A., Y. Kloo, S. Theisen, S. Saurat, und M. Schneider. 2025. *Unsicherheiten überwinden, grüne Märkte erschließen. Kompass zur Defossilisierung der Petrochemie in Deutschland. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GreenFeed*. Wuppertal Institut.
- Scholz, Alexander, Ylva Kloo, Svenja Theisen, u. a. 2025. *Unsicherheiten überwinden, grüne Märkte erschließen : Kompass zur Defossilisierung der Petrochemie in Deutschland ; Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Green Feedstock for a Sustainable Chemistry - Energiewende und Ressourceneffizienz im Kontext der dritten Feedstock-Transformation der chemischen Industrie“*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Application/pdf, 9411 KB, 117 pages. <https://doi.org/10.48506/OPUS-8856>.
- Science Based Targets initiative. 2022. *CEMENT SCIENCE BASED TARGET SETTING GUIDANCE - version 1.0*. <https://files.sciencebasedtargets.org/production/files/SBTi-Cement-Guidance.pdf>.
- Scrivener, Karen L., Vanderley M. John, und Ellis M. Gartner. 2018. „Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low-CO₂ Cement-Based Materials Industry“. *Cement and Concrete Research* 114 (Dezember): 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- Shahriari, Sahar, Davood Iranshahi, und Amin Nikzad. 2025. „Optimization of a Novel Configuration for an Autothermal Reformer to Produce Hydrogen from Natural Gas“. *Process Integration and Optimization for Sustainability* 9 (1): 75–91. <https://doi.org/10.1007/s41660-024-00466-8>.
- Sun, Xi, Frederik Lettwo, und Karsten Neuhoﬀ. 2021. *Klimaneutralität braucht koordinierte Maßnahmen zur Stärkung von hochwertigem Recycling -DIW Wochenbericht*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V.
- Sund, J. H., P. F. Albizzati, C. Scheutz, und D. Tonini. 2025. „Comprehensive Assessment of Environmental and Economic Impacts of the Entire EU Waste Management System“. *Waste Management* 204 (August): 114910. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114910>.
- Thrän, Daniela, Malgorzata Borchers, Matthias Jordan, u. a. 2025. „The Role of BECCS in Germany: A Key to Sustainable and Permanent CO₂ Removal?“ *Environmental Research Communications* 7 (9): 091010. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ae02ee>.
- UBA. 2022. *Überprüfung der Wirksamkeit des § 21 VerpackG und Entwicklung von Vorschlägen zur rechtlichen Weiterentwicklung - Endbericht*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/479/publikationen/texte_118-2022_ueberpruefung_der_wirk-samkeit_des_ss_21_verpackg_und_entwicklung_von_vorschlaegen_zur_rechtlichen_weiterent-wicklung.pdf.
- UBA. 2025a. *Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ambitionierte-pfade-fuer-treibhausgasneutralitaet>.

- UBA. 2025b. „Kunststoffabfälle“. Umweltbundesamt, April 30. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle>.
- VCI, und VDI. 2024. *Wie die Transformation gelingen kann. Ein Update*.
- VDE. 2024. *VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: Höherauslastung von Betriebsmitteln im Netz der Energiewende, VDE Studie*. Offenbach am Main. <https://www.vde.com/resource/blob/2354236/97cf00aeb5a93af09000a0d5951c6228/studie-hoeherauslastung-von-betriebsmitteln-im-netz-der-energiewende-data.pdf>.
- VDZ. 2021. *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien: Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie*. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/dekarbonisierung-von-zement-und-beton-minderungspfade-und-handlungsstrategien>.
- Wehnenmann, Kai, Marcel Koßmann, Katja Purr, u. a. 2026. *Treibhausgas-Projektionen 2026 – Ergebnisse kompakt*. Umweltbundesamt. <https://openumwelt.de/handle/123456789/11471>.
- Wei, Yi-Ming, Lan-Cui Liu, Jia-Ning Kang, u. a. 2025. „Navigating Energy Transition Solutions for Climate Targets with Minerals Constraint“. *Nature Climate Change* 15 (8): 833–41. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02373-3>.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. 2025. *Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland*. https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Daten-und-Fakten-2025_Web.pdf.
- Wollnik, Ronja, Malgorzata Borchers, Ruben Seibert, u. a. 2023. *Factsheets for Bio-Based Carbon Dioxide Removal Options in Germany*. <https://doi.org/10.48480/x293-8050>.
- Woodard, A. C., und H. R. Milner. 2016. „Sustainability of Timber and Wood in Construction“. In *Sustainability of Construction Materials*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00007-X>.
- Wuppertal Institut. 2021. *Chancen und Risiken im Gebäudesektor für die Umsetzung einer klimaneutralen und ressourceneffizienten zirkulären Wirtschaft – Vorstudie im Rahmen des Verbundvorhabens Circular Economy als Innovationsmotor für eine klimaneutrale und ressourceneffiziente Wirtschaft (CEWI)*.

