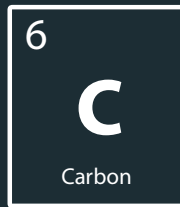




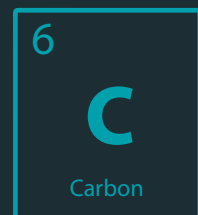
Kohlenstoff kann Klimaschutz

Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen





„Wir können zukünftig nicht auf Kohlenstoff verzichten. Und das müssen wir auch nicht. Aber wir müssen ganz anders damit umgehen. Dafür brauchen wir neue Technologien und Prozesse, die mit weniger oder teilweise auch ganz ohne Kohlenstoff auskommen.“



Prof. Dr. Andreas Pinkwart
Minister für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen



Liebe Leserinnen und Leser,

die weltweiten Kohlenstoffdioxidemissionen erreichen auch 2021 ein neues Rekordhoch und schädigen unser Klima mit immer deutlicher spürbaren Folgen. Und das längst nicht mehr nur in den südlicheren Regionen der Welt, die zunehmend durch Hitzewellen, unberechenbare Brände und Trinkwasserknappheit unter den Folgen der globalen Erwärmung leiden. Auch hier in Nordrhein-Westfalen bekommen wir durch sturzflutartige Regenfälle und Hochwasser, die für viele Bürgerinnen und Bürger im Sommer katastrophale Konsequenzen hatten, inzwischen ein Gefühl für das Ausmaß der drohenden Klimakatastrophe.

Verständlich und nachvollziehbar also, dass Kohlenstoff, englisch Carbon, nicht gerade den besten Ruf genießt – insbesondere, wenn durch den Einsatz von fossilen Rohstoffen klimaschädliches Kohlenstoffdioxid (CO₂) entsteht. Kohlenstoff selbst hingegen ist für uns lebensnotwendig – wörtlich, weil Kohlenstoff nach Wasserstoff und Sauerstoff das wichtigste Element im menschlichen Körper und in der Natur ist. Aber auch die Grundprodukte unserer modernen Industriegesellschaft wie Stahl, Aluminium, Zement oder Kunststoff bestehen aus Kohlenstoff oder benötigen ihn, um hergestellt werden zu können.

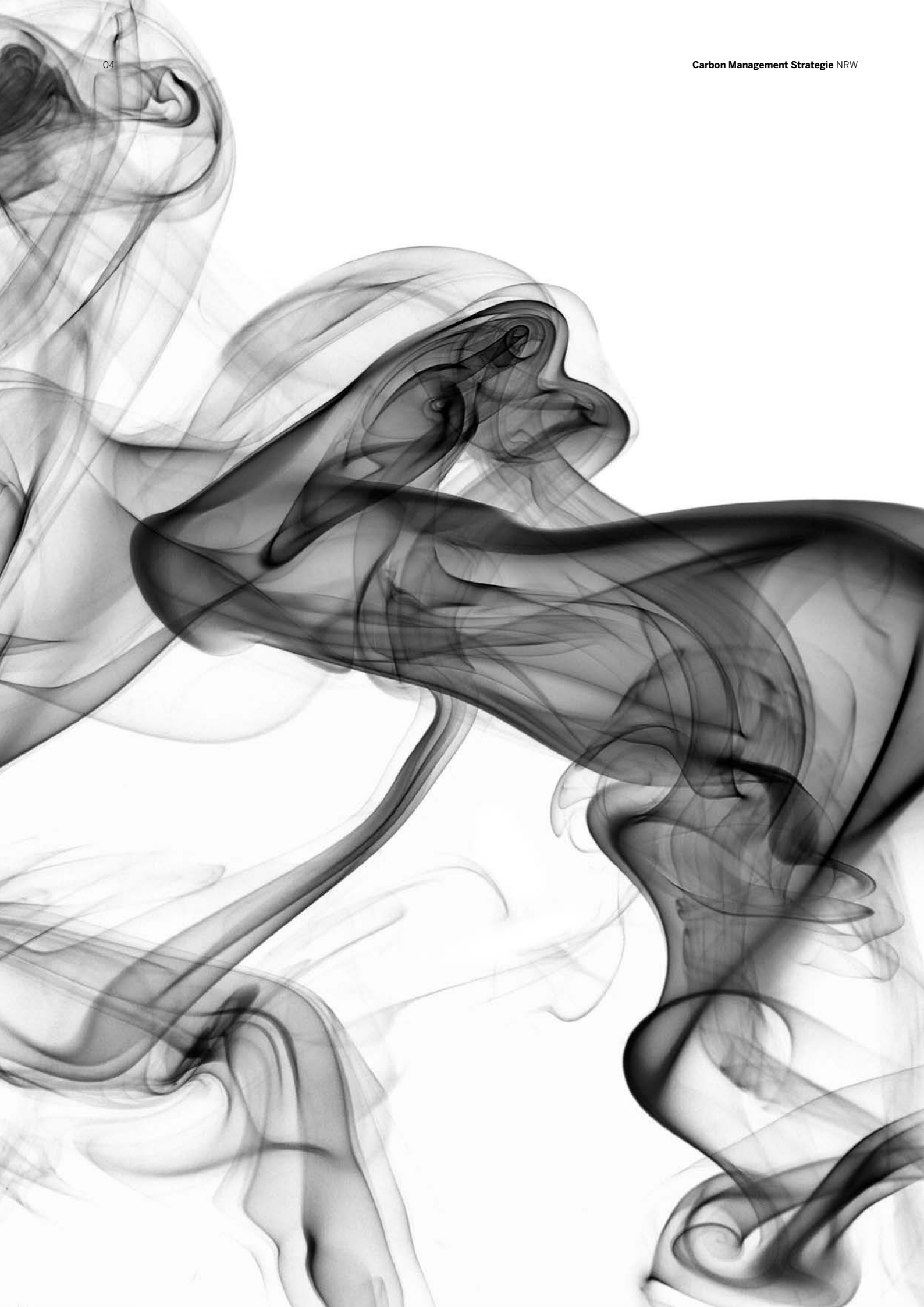
Wir können also auch zukünftig nicht auf Kohlenstoff verzichten. Und das müssen wir auch nicht. Aber wir müssen ganz anders damit umgehen. Dafür brauchen wir neue Technologien und Prozesse, die mit weniger oder teilweise auch ganz ohne Kohlenstoff auskommen. Und wir brauchen andere Kohlenstoffquellen, vor allem in Form von sekundären Rohstoffen, die im Sinne einer Kreislaufwirtschaft oder Circular Economy wieder und wieder verwendet werden – anstelle von fossilen Rohstoffen.

Dass dies die Industrie vor große Herausforderungen stellt, ist uns natürlich bewusst – nicht zuletzt, weil neue Technologien häufig sehr viel mehr Energie benötigen und der Einsatz von grünem Strom oder grünem Wasserstoff zurzeit noch höhere Kosten verursacht. Doch zugleich liegen in solchen innovativen Lösungen für die klimafreundliche Produktion unserer Grundstoffe und die Transformation in eine Low Carbon Industry enorme internationale Wettbewerbschancen.

Genau deshalb möchten wir jetzt einen Impuls setzen, ein neues Verständnis von und einen neuen Umgang mit Kohlenstoff zu etablieren. Wir zeigen in der Carbon Management Strategie NRW, wie der Übergang in eine nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft in Nordrhein-Westfalen gelingen kann, welche Herausforderungen dabei bestehen und wie wir diese überwinden können. Ich lade Sie ganz herzlich ein, jetzt mit uns gemeinsam eine Industrie zu gestalten, in der Kohlenstoff nicht nur als Problem, sondern auch als Teil der Lösung gesehen wird. Die Zeit drängt. Aber: Unter Druck entstehen Diamanten – natürlich aus Kohlenstoff. Ich wünsche Ihnen eine spannende und informative Lektüre!

Prof. Dr. Andreas Pinkwart

Minister für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



Inhalt



01 08–15 Zusammenfassung



02 16–19 Einleitung



17–18 2.1 Motivation und Ziele



19 2.2 Einordnung



03 20–27 Kohlenstoff: Das Rückgrat der nordrhein-westfälischen Industrie





04

28–55

Ansätze zur Transformation in eine Low Carbon Industry in Nordrhein-Westfalen



30–31

4.1

Potenziale und Grenzen
der Dekarbonisierung



32–34

4.2

Defossilisierung mit Biomasse:
Gut, aber nicht beliebig skalierbar



34–35

4.3

Sekundärrohstoffnutzung: Kern
der industriellen Transformation



36–53

4.4

CCX: Voraussetzung für eine
klimaneutrale Industrie in
Nordrhein-Westfalen



54–55

4.5

Fazit: Leitlinien für den nachhaltigen
Umgang mit Kohlenstoff in
Nordrhein-Westfalen



05

56–69

Branchenfokus: Chemie und Zement



57–65

5.1

Carbon Management in der chemischen
Industrie in Nordrhein-Westfalen



66–69

5.2

Carbon Management in der Zementindustrie
in Nordrhein-Westfalen



06

70–75

Vorreiter beim Carbon Management: Projekte in Nordrhein-Westfalen



07

76–85

Erforderliche Rahmenbe- dingungen und Instrumente, um richtig durchzustarten



77–78

7.1

Green Deal und
Klimaschutzgesetze



78–79

7.2

Rechtlicher Rahmen für die Ver-
wendung alternativer Kohlenstoffe



80–85

7.3

Rahmenbedingungen im
Kontext des EU ETS



08

86–93

Unser Weg in eine Low Carbon Industry: Der Carbon Management Plan für Nord- rhein-Westfalen

94 **Ausblick**

96 **Anhang**

102 **Quellenverzeichnis**

114 **Impressum**




01

08–15

Zusammenfassung



Das Erreichen der Klimaschutzziele bei gleichzeitigem Erhalt von Wohlstand und Wettbewerbsfähigkeit in einer Industriegesellschaft erfordert eine umfassende Transformation industrieller Prozesse. Ebenso ist dafür ein verändertes Wirtschaften mit Energie, Rohstoffen und CO₂ vonnöten.



Mit der Carbon Management Strategie NRW verfolgt das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE) das Ziel, die Transformation in eine Low Carbon Industry in Nordrhein-Westfalen zu beschleunigen, um die Klimaschutzziele zu erreichen und den Industriestandort Nordrhein-Westfalen zu stärken. Es werden Ansätze und Leitplanken zum nachhaltigen Umgang mit Kohlenstoff in Nordrhein-Westfalen vorgestellt und Maßnahmen entwickelt, die eine zukunftsfähige Kohlenstoffwirtschaft in unserem Bundesland unterstützen sollen. Im Vorder-

grund stehen dabei die Abkehr von der weiteren Ausbeutung fossiler Kohlenstoffquellen und der wirtschaftliche Umgang mit nachhaltigen alternativen Kohlenstoffquellen. Dadurch werden gleichermaßen die CO₂-Emissionen in Nordrhein-Westfalen gesenkt, die Versorgung der nordrhein-westfälischen Industrie mit Rohstoffen gesichert und Wettbewerbsvorteile durch eine frühzeitige Einführung innovativer Prozesstechnologien geschaffen, die mit neuen Chancen für Unternehmen verknüpft sind – zum Beispiel für die starke Basis der Anlagenbauer in Nordrhein-Westfalen.

Fossiler Kohlenstoff ist derzeit noch das **Rückgrat unserer Industrie.**

Es bestehen neben der Dekarbonisierung, also dem vollständigen Verzicht auf Kohlenstoff, drei Ansätze, um den Umgang mit Kohlenstoff klimaneutral zu gestalten:



→ **Defossilisierung**
(Ersatz von fossilem Kohlenstoff durch Biomasse)



→ **Nutzung von Sekundärrohstoffen**
(Recycling)



→ **Carbon Capture and X**
(CO₂-Abscheidung, -Transport, -Nutzung und -Speicherung)

Kohlenstoff hat vielfältige Einsatzfelder und -zwecke in der Industrie. Somit gibt es auch keine pauschale Lösung für die Transformation. Vielmehr muss branchenspezifisch nach Möglichkeiten gesucht werden, um die Nutzung von und den Verzicht auf Kohlenstoff nachhaltig zu gestalten. Aus diesem Grund werden in der Carbon Management Strategie NRW auch verschiedene, auf alternativen Kohlenstoffquellen basierende industrielle

Wertschöpfungspfade beleuchtet. Alternative Wertschöpfungspfade, also solche, die nicht auf fossilen Rohstoffen und konventionellen Technologien oder Prozessen basieren, weisen in Abhängigkeit von Kohlenstoffquelle und Anwendungsfall deutliche Unterschiede auf. Bei deren Betrachtung steht insbesondere ihre Nachhaltigkeit im Fokus, die nicht allein anhand der Kohlenstoffquelle bestimmt werden kann.

Die für die Beurteilung der Nachhaltigkeit heranzuziehenden Kriterien sind umfassender:



→ CO₂- und Energiebilanz des Wertschöpfungspfades



→ Stofflicher Bedarf an Wasserstoff im Zuge der Umwandlung und Produktherstellung



→ Qualität, Schädlichkeit und Marktpotenzial des resultierenden Produktes

Zwei Branchen stehen bei der Transformation in eine Low Carbon Industry besonders im Fokus. Zum einen die chemische Industrie, die zwar auf Kohlenstoff angewiesen ist, jedoch aufgrund des CO₂-Verwertungspotenzials eine Branche sein könnte, die sich von einer CO₂-Quelle in Zukunft zu einer CO₂-Senke wandelt. Zum anderen die Zementindustrie, in der die CO₂-Entstehung im Zuge der kalkbasierten Klinkerherstellung auch zukünftig nicht vermieden werden kann. Deshalb wird die Möglichkeit

zur Abscheidung, Nutzung und Speicherung von CO₂ hier auch langfristig von Bedeutung sein.

Nordrhein-Westfalen wird im Rahmen des Carbon Managements Aktivitäten in vier Handlungsfeldern aufnehmen, um die Transformation in eine Low Carbon Industry – auf Basis der oben genannten Ansätze zum Verzicht auf beziehungsweise klimaneutralen Umgang mit Kohlenstoff – weiter zu beschleunigen.

Abbildung 1: Ansätze und Handlungsfelder zur Transformation in eine Low Carbon Industry in Nordrhein-Westfalen



Handlungsfeld I: Reduzierung der Kohlenstoffintensität in der nordrhein-westfälischen Industrie

Wir möchten die Verringerung der Kohlenstoffintensität in der Industrie ermöglichen und die Umwandlung von einer High Carbon Industry in eine Low Carbon Industry beschleunigen. Der vollständige Verzicht auf Kohlenstoff ist längerfristig in solchen Bereichen erforderlich, die einer Dekarbonisierung grundsätzlich zugänglich sind. Seitens der Landesregierung unterstützte Entwicklungen, wie der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft, der Ausbau von Wind- und Solarenergie, der Ausbau von Energieinfrastrukturen wie Netzen und Speichern sowie die Förderung kohlenstofffreier Prozesse und Technologien, begleiten die Dekarbonisierungsanstrengungen der Industrie.

Handlungsfeld II: Nachhaltige Kohlenstoffnutzung in Nordrhein-Westfalen

Wir wollen einen nachhaltigen Umgang mit Kohlenstoff in Nordrhein-Westfalen etablieren. Dazu zählt der adäquate Umgang mit Biomasse ebenso wie der gezielte Ausbau der sekundären Rohstoffbasis und die (Weiter-)Entwicklung von Carbon-Capture-and-Usage-Anwendungen. Die Voraussetzung für ein nachhaltiges Wirtschaften mit Kohlenstoff ist eine technologieoffene Abwägung der verschiedenen alternativen Wertschöpfungspfade – sowohl im Vergleich zu dem jeweiligen konventionellen Prozess als auch untereinander. Ökonomische,

regulatorische und organisatorische Gegebenheiten, die die nachhaltige Kohlenstoffnutzung derzeit ebenso hemmen wie bilanzielle, werden wir kurzfristig angehen, um die schnelle Transformation in eine zukunftsfähige, zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft in Nordrhein-Westfalen zu ermöglichen.

Handlungsfeld III: CO₂-Management

Wir werden uns dafür einsetzen, dass geeignete Optionen zur Abscheidung, zum Transport, zur Nutzung und zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid nutzbar werden. Diese müssen ergebnisoffen und zügig geprüft werden, um deren zeitnahe und langfristige Beiträge zur Emissionsreduktion zu ermöglichen, ohne die unsere Klimaschutzziele nicht zu erreichen sind. Dafür, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden, werden wir uns auf Bundesebene einsetzen. Zeitgleich werden wir die CO₂-Infrastrukturplanung in Nordrhein-Westfalen vorantreiben.

Handlungsfeld IV: Gesellschaftlicher Diskurs

Wir wollen die Einbeziehung der Gesellschaft in Nordrhein-Westfalen durch frühzeitige Einbindung, transparente Informationen und nachvollziehbare, einvernehmlich gestaltbare Prozesse auf eine neue Ebene heben. Die skizzierte Transformation der Industrie geht sicherlich mit umfassenden Veränderungen einher, die auch der Akzeptanz in der Gesellschaft bedürfen. Gerade deshalb wollen wir die Zukunft unseres Bundeslandes mit den Bürgerinnen und Bürgern gemeinsam und auf Augenhöhe gestalten.

Abbildung 2: Carbon Management Plan NRW

Carbon Management Strategie NRW

Niederlande

Niedersachsen



HANDLUNGSFELD I

→ Reduzierung der Kohlenstoffintensität

HANDLUNGSFELD II

→ Nachhaltige Kohlenstoffnutzung

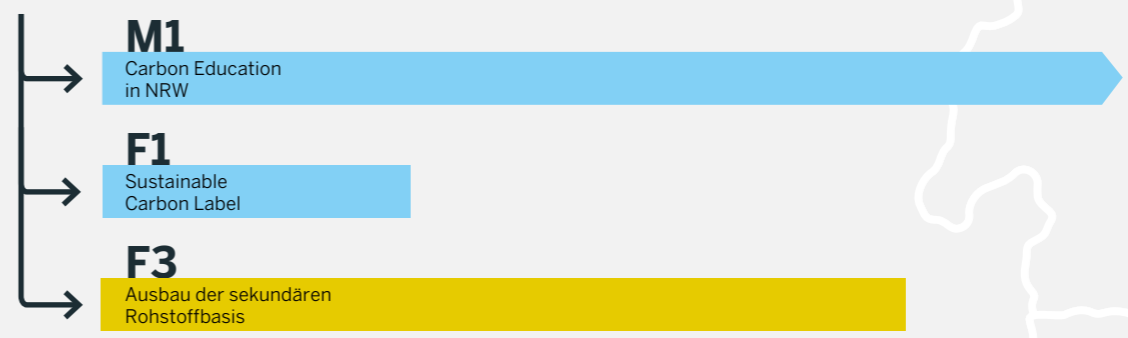
HANDLUNGSFELD III

→ CO₂-Management

HANDLUNGSFELD IV

→ Gesellschaftlicher Diskurs

M Maßnahme F Forderung



Hessen

Den nachhaltigen Umgang mit Kohlenstoff zu etablieren, stellt für die nordrhein-westfälische Industrie eine erhebliche Chance dar. Als Vorreiter im Bereich Low Carbon Industry können entscheidende Wettbewerbsvorteile geschaffen werden: Durch die früh- beziehungsweise vorzeitige Reaktion auf die immer stärkere Nachfrage nach grünen Produkten und den steigenden regulatorischen und ökonomischen Druck zur Erreichung der Klimaschutzziele (beispielsweise durch steigende CO₂-Preise oder den Wegfall kostenloser Zuteilungen im EU ETS) sowie durch die Entwicklung von Carbon-Management-Blaupausen und Klimaschutz-Technologien für die ganze Welt.

Die Landesregierung unterstützt die Transformation in eine Low Carbon Industry in Nordrhein-Westfalen bereits durch die zielgerichtete Förderung von Schlüsselprojekten für die nachhaltige Kohlenstoffnutzung, die Positionierung gegenüber der Bundesregierung und der Europäischen Kommission und die bundesweit einzigartige Landesinitiative IN4climate.NRW, welche Akteuren aus Industrie, Wissenschaft und Politik eine Plattform zur gemeinschaftlichen Erarbeitung innovativer Strategien für eine klimaneutrale Industrie bietet.

Mit der Carbon Management Strategie setzt das MWIDE nun den entscheidenden Impuls, um die nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft in der nordrhein-westfälischen Industrie zu starten.

Kernaussagen und Eckpunkte im Überblick



3

Die Industrie in Nordrhein-Westfalen braucht eine andere Rohstoffbasis: Sekundärrohstoffe sollten insgesamt Vorrang haben vor Biomasse und CO₂. Kreislaufwirtschaft ist der zentrale Schlüssel für die Transformation und die Voraussetzung für den wettbewerbsfähigen Umbau der Wertschöpfungsketten. Nur durch eine zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft können die Ziele Klima- und Ressourcenschutz vereint werden. Recycling muss „der“ zentrale Stoffstrom der nordrhein-westfälischen Industrie werden – dafür müssen auf Bundesebene entsprechende Anreize gesetzt und Vorgaben zur Normung gemacht werden.

CO₂-basierte Produkte sind weder automatisch „grün“ noch nachhaltig: Unternehmen sind bei der Umsetzung von Projekten und der Technologieauswahl dazu angehalten, den gesamten Kohlenstofflebenszyklus sowie insbesondere auch die Energieeffizienz zu betrachten.

6

Den Unternehmen der Kreislaufwirtschaft kommt eine tragende Rolle zu. Starke Allianzen mit der Industrie müssen aufgebaut und neue Geschäftsmodelle entwickelt werden, um die Verfügbarkeit und die stoffliche Verwertung von Abfällen zu maximieren.

4

5

Wir brauchen eine CO₂-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen und über die Landesgrenzen hinaus, die CCU und CCS möglich macht. Die Planung und Entwicklung dieser werden wir mit Hochdruck vorantreiben. Von der Bundesregierung fordern wir zugleich, dass die erforderlichen rechtlichen Voraussetzungen geschaffen werden.

Eine Elektrifizierung von Prozessen ist nicht immer die beste Wahl. Denn in manchen Prozessen führt Elektrifizierung zu einer Verschlechterung der CO₂-Bilanz oder zieht unverhältnismäßig hohe Energieaufwände nach sich. Alternative Prozessrouten müssen daher generell immer technologieoffen und ganzheitlich betrachtet und bezüglich ihrer Eignung abgewogen werden.

7

02

16–19

Einleitung



Kohlenstoff ist unverzichtbar. Wir müssen aber viel bewusster damit umgehen – um das Klima zu schützen, um die Rohstoffversorgung zu sichern und um wettbewerbsfähig zu bleiben.



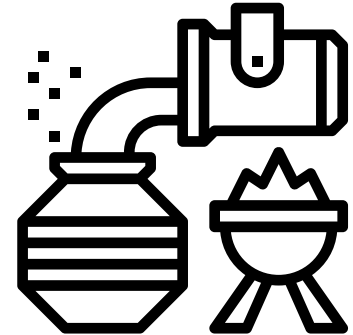
2.1 Motivation und Ziele

Kohlenstoff ist allgegenwärtiger Bestandteil industrieller Wertschöpfungsprozesse. Als häufigstes, reaktionsfreudigstes und in vielen Verbindungen vorkommendes Element auf der Erde übernimmt Kohlenstoff zugleich mehrere Funktionen. So kommen kohlenstoffhaltige Rohstoffe in der Industrie bei weitem nicht nur zum Einsatz, um Wärme oder Strom zu erzeugen. Vielmehr übernehmen sie neben ihrer Funktion als Energieträger gleichermaßen Funktionen als prozesstechnische Hilfsmittel, etwa als Reduktionsmittel in der Stahlherstellung, oder dienen als Grundstoffe zur Herstellung von Produkten wie zum Beispiel Arzneimitteln oder Kunststoffen.

Fossile Rohstoffe sind besonders kohlenstoffhaltig und bilden bislang die Basis industrieller Fertigung.

Aus Steinkohle hergestellter Koks wird zum Beispiel als Reduktionsmittel bei der Stahlherstellung benötigt und Erdöl und Erdgas, die aus Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen, sind die stofflichen Hauptbestandteile beinahe aller chemischen Produkte und Kraftstoffe. Während die energetische Nutzung zum Teil schon durch erneuerbare Energien ersetzt wird, ist Kohlenstoff als Roh- oder Hilfsstoff in der Industrie derzeit noch fast ausschließlich fossilen Ursprungs. Vor dem Hintergrund der Verschärfung der Klimaschutzziele ist daher eine schnellstmögliche Abkehr von fossilen Kohlenstoffen notwendig. Dies gilt in besonderem Maße für das Industrieland Nordrhein-Westfalen.

Mit gut 22 Prozent Anteil an den Treibhausgasemissionen Nordrhein-Westfalens rangiert die Industrie auf Platz 2 unter den Sektoren (Platz 1: Energiewirtschaft mit knapp 45 Prozent).¹



Der Einsatz von fossilen Ressourcen führt dazu, dass immer neue, zusätzliche Mengen CO₂ in die Atmosphäre eingebracht werden. Ohne einen veränderten Umgang mit Kohlenstoff in der Industrie können die Klimaschutzziele daher nicht erreicht werden.

Mit dem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts vom 24. März 2021, in dem die teilweise Verfassungswidrigkeit der nationalen Klimaschutzziele entschieden wurde², und der daraufhin erfolgten Änderung des nationalen Klimaschutzgesetzes, die der Bundesrat nur acht Wochen später bestätigte³, hat sich der Druck nochmal deutlich erhöht. Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bereits 2045 die Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. Dazu wurden die Emissionsreduktionsziele in den einzelnen Sektoren deutlich verschärft. Auch Nordrhein-Westfalen hat sich mit der am 1. Juli 2021 im Landtag beschlossenen Novelle des Klimaschutzgesetzes aus dem Jahr 2013 als erstes Bundesland den ambitionierten Zielen der Bundesregierung angeschlossen.

Aber nicht nur aus Gründen des Klimaschutzes muss die Nutzung fossiler Ressourcen deutlich reduziert werden. Auch die grundsätzliche Begrenztheit des globalen Vorrats an fossilen Ressourcen macht es erforderlich, dass vor allem die heutige intensive Nutzung der Rohstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle in allen Sektoren sukzessive zurückgehen muss.

Für die nordrhein-westfälische Industrie bedeutet dies, dass innovative Technologien und Verfahren, eine alternative Rohstoffbasis und ein nachhaltiger Umgang mit Kohlenstoff erforderlich sind, um die rohstoffliche

Versorgung der Industrie zu sichern, Klimaschutz zu betreiben und die Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts Nordrhein-Westfalen zu erhalten.

Um den eingangs geschilderten Herausforderungen zu begegnen, sollen im Rahmen der Carbon Management Strategie NRW Leitlinien zum nachhaltigen Umgang mit Kohlenstoff in Nordrhein-Westfalen erarbeitet werden. Im Vordergrund stehen dabei die Abkehr von zukünftig zu substituierenden fossilen Kohlenstoffquellen und der wirtschaftliche Umgang mit nachhaltigen, alternativen Kohlenstoffquellen.

Die zentralen Ziele, die wir mit dem Carbon Management in Nordrhein-Westfalen verfolgen, sind:

- Senkung der CO₂-Emissionen in Nordrhein-Westfalen
- Langfristige Sicherstellung einer nachhaltigen rohstofflichen Versorgung der nordrhein-westfälischen Industrie
- Erhalt und Stärkung des Industriestandorts Nordrhein-Westfalen



Die Carbon Management Strategie NRW setzt den entscheidenden Impuls, um die Transformation in eine Low Carbon Industry in Nordrhein-Westfalen zu beschleunigen und damit lokal und global einen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele und zum nachhaltigen Umgang mit Kohlenstoff zu leisten.

2.2 Einordnung

Die vorliegende [Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen](#) behandelt die Transformation der nordrhein-westfälischen Industrie von einer fossilen in eine weitgehend defossile, kohlenstoffreduzierte und dennoch wettbewerbsfähige Wirtschaftsweise. Es werden alternative, nachhaltige industrielle Wertschöpfungsketten beleuchtet, um den Übergang in eine Low Carbon Industry in Nordrhein-Westfalen zu beschleunigen und einen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele zu leisten.⁴

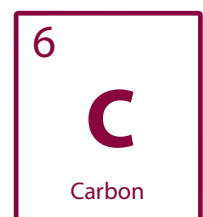
Das 2019 vorgestellte [Industriepolitische Leitbild des Landes Nordrhein-Westfalen](#)⁵, mit welchem die Landesregierung den Industriestandort Nordrhein-Westfalen dauerhaft zum weltweit führenden Innovationsmotor und zum modernsten, klima- und umweltfreundlichsten Industriestandort weltweit machen will, zeigt die Handlungsfelder und die Zielrichtung für eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Industriestandorts Nordrhein-Westfalen auf.

Mit der [Energieversorgungsstrategie Nordrhein-Westfalen](#)⁶ wurden Mitte 2019 die wesentlichen Handlungsfelder beschrieben, die Nordrhein-Westfalen als innovativen Industrie- und Wirtschaftsstandort erhalten und stärken sollen und gleichzeitig einen Beitrag

zu den europäischen und deutschen Klimaschutzziele leisten können. Die Energieversorgungsstrategie wird im November 2021 in aktualisierter Fassung vorgestellt.

Die Verfügbarkeit von sauberem Wasserstoff ist entscheidend für eine Low Carbon Industry. Aufbauend auf den Wasserstoffstrategien der Europäischen Union (EU) und des Bundes wurde Ende 2020 die [Wasserstoff-Roadmap des Landes Nordrhein-Westfalen](#)⁷ veröffentlicht und darin die Chancen und Herausforderungen, Handlungsfelder und Ziele beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Nordrhein-Westfalen und beim Einsatz von Wasserstoff in den Sektoren Industrie, Mobilität und Energie beschrieben.

Die in Hinblick auf die Produktionsmenge und das Marktvolumen größte mögliche Carbon-Capture-and-Usage-Anwendung (CCU-Anwendung) ist die Herstellung synthetischer Kraftstoffe für die Mobilität. Das [Handlungskonzept Synthetische Kraftstoffe Nordrhein-Westfalen](#), das Ende 2021 vorgelegt wird, weist das zugehörige Marktpotenzial in Nordrhein-Westfalen aus und definiert Maßnahmen zur Unterstützung eines zielgerichteten Markthochlaufs.






03

20–27

Kohlenstoff: Das Rückgrat der nordrhein-westfälischen Industrie



Zurzeit decken fast ausschließlich fossile Rohstoffe die Bedürfnisse unserer Industriegesellschaft nach Strom, Wärme, Mobilität und einer Vielzahl von Dienstleistungen und Produkten – allen voran Erdöl, Erdgas und Kohle: Rohstoffe, die reich an dem wertvollen Element Kohlenstoff sind.



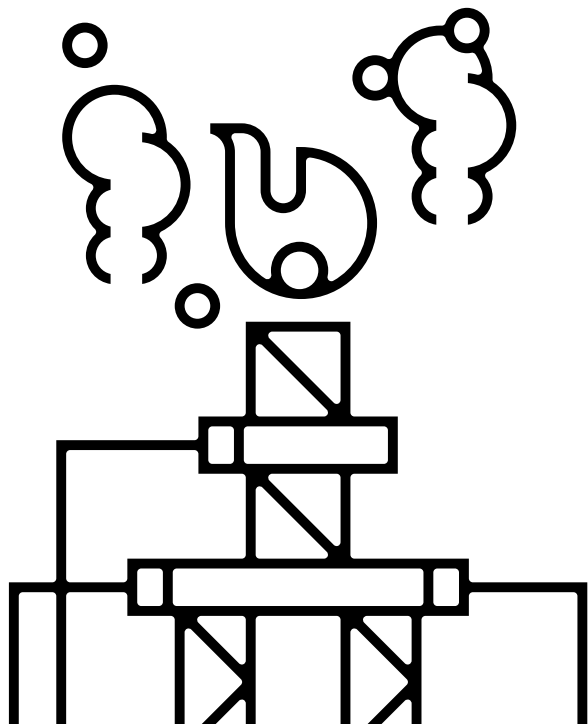
Fossile Rohstoffe haben Kohlenstoff über geologische Zeiträume – in der Regel über mehrere Hunderttausend Jahre oder länger – natürlich eingelagert. Infolge ihrer Nutzung wird dieser sicher konservierte Kohlenstoff plötzlich frei, lagert sich in sehr kurzer Zeit und in großen Mengen in der Atmosphäre ein und wird so zum Haupttreiber des Klimawandels. Sowohl aus Klimaschutzgründen als auch mit Blick auf die Endlichkeit dieser Ressourcen müssen fossile Kohlenstoffquellen daher künftig so weit wie möglich ersetzt werden.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) legt seit 1980 in jährlicher Folge den Rohstoffsituationsbericht für Deutschland⁸ vor, der für die fossilen

Rohstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle (Stein- und Braunkohle) zum Bezugsjahr 2019 die nachfolgend skizzierte Datenlage ausweist.

Erdöl ist mit einem Anteil von gut 35 Prozent am Primärenergieverbrauch der wichtigste Energieträger Deutschlands. Als einer der größten Mineralölverbraucher weltweit ist Deutschland fast vollständig auf den Import von Erdöl und Erdölprodukten angewiesen. Bei einem Verbrauch von 103 Millionen Tonnen Erdöl stammen nur knapp 2 Prozent aus inländischer Förderung – mit weiter rückläufiger Tendenz. Es besteht somit beim Erdöl eine fast vollständige Importabhängigkeit. In Nordrhein-Westfalen wird kein Erdöl gefördert.

35 Prozent
**der Energieversorgung Deutschlands
wird derzeit durch Erdöl gedeckt.**

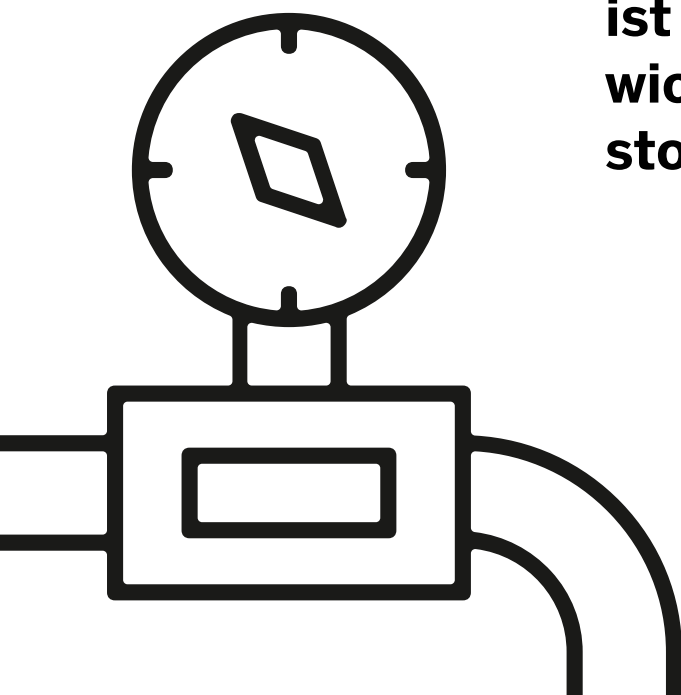


Erdgas ist derzeit mit einem Anteil von rund 25 Prozent am Primärenergieverbrauch der zweitwichtigste Energieträger Deutschlands. Aus der inländischen Förderung stammten im Jahr 2019 mit rund 6,7 Milliarden Kubikmetern knapp 6 Prozent des in Deutschland verbrauchten Erdgases – mit seit vielen Jahren weiter rückläufiger Tendenz aufgrund zunehmender Erschöpfung der Lagerstätten und fehlender signifikanter Neufunde. Aus gleichen Gründen gehen die Rohgasreserven (sichere Reserven 24,8 Milliarden Kubikmeter, wahrscheinliche Reserven 21,8 Milliarden Kubikmeter) in Deutschland erheblich zurück. Niedersachsen verfügt im Ländervergleich mit einem Anteil von knapp 99 Prozent an den gesamten Rohgasreserven über die größten Erdgasvorkommen in Deutschland. Dieses Bundesland erbringt mit einem Anteil von rund 97 Prozent auch den größten Anteil an der Förderung. In Nordrhein-Westfalen wird kein Erdgas gefördert.

Die Erdgasimporte wie auch die Re-Exporte nahmen hingegen deutlich zu – dies ist auch ein Zeichen der hohen Bedeutung Deutschlands mit seinem sehr gut ausgebauten Gasnetz und den großen Gasspeicherinfrastrukturen als internationale Drehscheibe für Gastransporte auch in andere europäische Mitgliedstaaten, wo dies ebenfalls zur Versorgungssicherheit beiträgt.

Im Jahr 2019 war Kohle mit einem Anteil von 17,9 Prozent (Steinkohle mit 8,8 Prozent, Braunkohle mit 9,1 Prozent) am Primärenergieverbrauch nach Erdöl und Erdgas der dritt wichtigste Energieträger Deutschlands. Mit dem gesetzlich beschlossenen Ausstieg aus der subventionierten Steinkohlenförderung endete Ende 2018 die Steinkohlenförderung in Deutschland. Der weiter bestehende Bedarf an Steinkohle wird ausschließlich über Importe gedeckt. Die Importe von Steinkohle und Steinkohlenprodukten lagen 2019 bei 42,2 Millionen Tonnen.⁹

Mit **25** Prozent
ist **Erdgas** derzeit der zweit-
wichtigste Energie- und Kohlen-
stoffträger Deutschlands.



18

Prozent

Anteil an der Energieversorgung machen Kohle aktuell noch zum drittwichtigsten Energieträger Deutschlands.



Braunkohle ist derzeit der wichtigste heimische fossile Energieträger, wenngleich Kohle gemäß dem vom Deutschen Bundestag im August 2020 verabschiedeten Kohleausstiegsgesetz nur noch bis spätestens 2038 einen Beitrag zur deutschen Energieversorgung leisten wird.¹⁰ Der gesamte Absatz an Braunkohle aus inländischem Aufkommen lag im Berichtsjahr 2019 bei 131,3 Millionen Tonnen und wurde in drei Revieren gefördert: im Rheinischen Revier im Südwesten Nordrhein-Westfalens (Förderung 64,8 Millionen Tonnen) mit den drei Tagebauen Garzweiler, Hambach und Inden sowie in den Revieren Mitteldeutschland und Lausitz (zusammen 66,5 Millionen Tonnen).¹¹ Bis einschließlich 2029 übernimmt Nordrhein-Westfalen mit mehr als 70 Prozent der bundesweit zu reduzierenden Braunkohlekapazitäten eine Vorreiterrolle beim Kohleausstieg.

Kalk ist ebenfalls eine fossile Kohlenstoffquelle, nimmt jedoch im Vergleich zu den obenstehenden fossilen Energieträgern eine andere Rolle ein – denn weder kann Kalk energetisch genutzt noch in signifikantem Umfang substituiert werden. Vor allem aus der Baustoffindustrie ist Kalk als Grundstoff für die Zementherstellung nicht wegzudenken. Aber auch in der chemischen Industrie und zur Reinigung der Abgase aus industriellen Prozessen wird Kalk benötigt. Zudem ist zukünftig von einer weiteren Steigerung der Nachfrage bei Kalk auszugehen.

Die aktuelle Rohstoffbasis der nordrhein-westfälischen Industrie: ein eng vernetztes, fossil geprägtes Wertschöpfungsnetzwerk

Die Wertschöpfungspfade der nordrhein-westfälischen Industrie sind zurzeit enorm von den oben beschriebenen fossilen Primärrohstoffen abhängig. Diese Abhängigkeit zieht sich durch alle Branchen:

Die (petro-)chemische Industrie in Deutschland setzte 2017 rund 20 Millionen Tonnen Erdöl, Erdgas und Kohle stofflich ein. Dies entspricht etwa 5 Prozent der hierzulande insgesamt eingesetzten fossilen Rohstoffe (insgesamt 397 Millionen Tonnen im Jahr 2017). Betrachtet man nur Erdöl, liegt der Anteil der stofflichen Nutzung durch die Chemie mit 15 Prozent deutlich darüber. An erster Stelle steht dabei das Spalten von Rohbenzin (Naphtha) in eine Reihe von Basischemikalien, deren Weiterverarbeitung eine nahezu unerschöpfliche Vielfalt an Synthesemöglichkeiten bietet. Immerhin 2,7 Millionen Tonnen nachwachsende Rohstoffe, von denen Fette und Öle knapp die Hälfte ausmachten, wurden 2017 stofflich in der chemischen Industrie eingesetzt. Sie haben sich überall dort erhalten oder durchgesetzt, wo technische und ökonomische Vorteile gegenüber fossilen Einsatzstoffen bestehen.

Das sind meist spezielle, aber äußerst vielfältige Anwendungen, von der Herstellung von Kunststoffen und Fasern über Waschmittel, Kosmetika, Farben und Lacke, Druckfarben, Klebstoffe, Baustoffe, Hydrauliköle und Schmiermittel bis hin zu Arzneimitteln.¹²

Die Baustoffindustrie bezieht vor allem mineralische Primärrohstoffe: Gips/Anhydrit, Ölschiefer, Trass, Kalkmergel, Kalkstein und Kreide. Kalkstein kommt in der Glasindustrie zusammen mit Sand, Feldspat und Dolomit als Primärrohstoff zum Einsatz. Das aus Kalkmergel, Kalkstein und Kreide hergestellte Vorprodukt Kalk wird zudem branchenübergreifend zum Beispiel zur Neutralisierung und zur Rauchgasreinigung genutzt.

Während in der Stahlindustrie Eisenerz, Kohle, Erdgas und Legierungsmetalle eingesetzt werden, sind in der Aluminiumindustrie Bauxit und Kryolith die einzigen Primärrohstoffe. Für die Primärrohstoffe der Aluminiumindustrie ist Nordrhein-Westfalen vollständig von internationalen Importen abhängig. Bauxit wird als Aluminiumoxid aus dem Ausland importiert.

2,7 Millionen Tonnen
**nachwachsender Rohstoffe wurden
2017 stofflich in der chemischen
Industrie eingesetzt.**

Oftmals entstehen in der Grundstoffindustrie im Zuge der Herstellung der Hauptprodukte auch Nebenprodukte und Reststoffe, die in anderen Branchen weiterverwendet werden:

- Der in der Petrochemie anfallende Koks dient als Brennstoff, Reduktionsmittel und Kohlenstoffquelle für die Rohstahlerzeugung im Hochofen.
- Anfallender Petrolkoks wird zur Herstellung von Kohlenstoff-Anoden für die Aluminiumelektrolyse eingesetzt.
- In der chemischen Industrie anfallende Natronlauge hat sich von einem Nebenprodukt aus der Chlorherstellung zu einem wichtigen Rohstoff für die Aluminiumindustrie entwickelt und wird inzwischen sogar gezielt hergestellt.
- Des Weiteren stellt die Chemieindustrie das Natrium- und Kaliumkarbonat für die Glasherstellung zur Verfügung.
- Das in der Kokerei anfallende Steinkohlenteerpech aus der Stahlindustrie wird – zusätzlich zum Petrolkoks aus der Petrochemie – für die Herstellung von Kohlenstoff-Anoden genutzt. Steinkohlenteerpech liefert dabei einerseits Kohlenstoff als Reduktionsmittel (wie der Petrolkoks), dient aber andererseits vor allem auch als Bindemittel für die Anoden.
- Sowohl in der Stahl- als auch in der Aluminiumindustrie entstehen außerdem Schlacken, die im Straßenbau und in der Landwirtschaft eingesetzt werden.
- Der ebenfalls in der Stahlindustrie anfallende Hüttensand wird in der Zementindustrie als Ersatz für Zementklinker eingesetzt.
- Auch bei der energiewirtschaftlichen Nutzung von fossilen Rohstoffen in Kraftwerken fallen Reststoffe an, die in der Zement- und Kalkindustrie als Rohstoff dienen: Flugasche und REA-Gips enthalten Mineralien, die wichtige Bestandteile von Kalk und Zement sind.
- Die Abfallaufbereitung liefert ebenfalls Reststoffe: Rostschlacken aus Müllverbrennungsanlagen werden der Aluminiumherstellung zugeführt, kalkhaltige Reststoffe finden stofflich, kohlenstoffhaltige Reststoffe als Sekundärbrennstoffe in der Zementindustrie Anwendung.

Neben Reststoffen und Nebenprodukten werden zunehmend auch Produktions- und „Post-Consumer-Abfälle“ eingesetzt, die recycelt werden und als sogenannte Rezyklate zu sekundären Rohstoffen für die Herstellung neuer Produkte werden.

In der Metallbranche zum Beispiel wird bereits ein Großteil der anfallenden Schrotte recycelt. Ebenfalls hohe Recyclingquoten werden bei Behältergläsern erreicht. Für die Baustoffindustrie stehen Technologien, um Rezyklat in die Zement- und Kalkherstellung zurückzuführen, noch am Anfang. Gebraucher Beton wird in Deutschland lediglich zu 21 Prozent hochwertig in der Asphalt- und Betonherstellung verwendet. Der Rest erfährt ein Downcycling als Füllstoff.¹³ Kunststoffabfälle werden zwar zu fast 100 Prozent gesammelt, nur knapp die Hälfte wird jedoch recycelt, also stofflich genutzt. Der Rest wird energetisch verwertet (vgl. Abschnitt 5.1.1).¹⁴

Deutlich wird an den vorangegangenen Ausführungen und der nebenstehenden Grafik nicht nur, dass die Kohlenstoffintensität der Industrie in Nordrhein-Westfalen aktuell sehr hoch ist, sondern auch, dass die Wertschöpfungsketten überaus eng und branchenübergreifend miteinander vernetzt sind. Die Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen ist dabei mit Blick auf Weiterverwertungsmöglichkeiten weitestgehend optimiert. Dieses Optimum hat sich in der nordrhein-westfälischen Industrie über Jahrzehnte eingestellt und zu einer äußerst integrierten Wertschöpfung und Produktionsweise geführt.

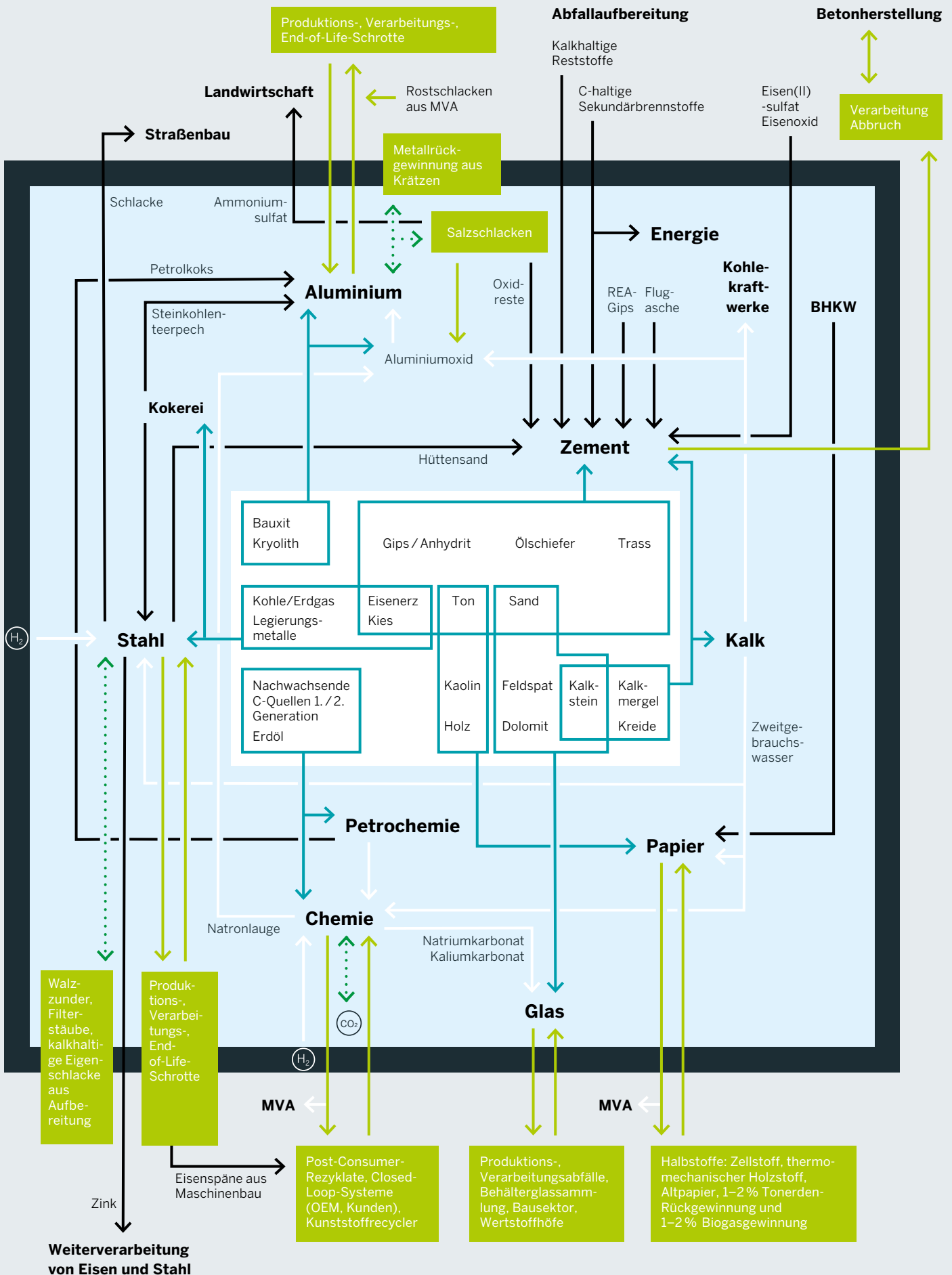
Mit einer Veränderung der primären Kohlenstoffbasis und der Herstellungsprozesse werden heute breit genutzte Nebenprodukte und Vernetzungen zukünftig zum Teil wegfallen. Dies hat nicht nur Auswirkung auf die primären Wertschöpfungspfade, sondern wird durch die starke Verzahnung eine Veränderung des gesamten Wertschöpfungsnetzwerkes in Nordrhein-Westfalen nach sich ziehen.

Bezogen auf die kohlenstoffhaltigen Nebenerzeugnisse werden sich vorrangig die Sekundärrohstoffe aus der Stahlindustrie und die Stoffströme aus Müllverbrennungsanlagen im Zuge der Transformation und des Ausbaus der Circular Economy sowohl qualitativ als auch in ihrer Zusammensetzung verändern. Neue Quervernetzungen, die ein neues ökonomisches Optimum ermöglichen, müssen daher gezielt identifiziert und deren Etablierung unterstützt werden.

Abbildung 3 stellt die primären und sekundären Stoffströme in der nordrhein-westfälischen Grundstoffindustrie dar.

-  Primärrohstoffe
-  Grundstoffindustrie
-  Transportinfrastruktur
-  Peripherie
-  Primärstoffe
-  Reststoffe
-  Stoffströme Recycling
-  Recycling von Reststoffen aus eigener Produktion
-  (Neben-)Produkte

Abbildung 3: Stoffströme in der nordrhein-westfälischen Grundstoffindustrie¹⁵





04

28–55

Ansätze zur Transformation in eine Low Carbon Industry in Nordrhein-Westfalen



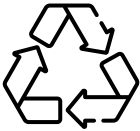
Eine nachhaltige Kohlenstoffnutzung im Sinne einer Low Carbon Industry kann nur durch die Reduktion der Kohlenstoffmenge insgesamt, den weitestgehenden Verzicht auf fossile Kohlenstoffe sowie das geschickte Haushalten mit den Kohlenstoffmengen, die sich bereits im System befinden, erreicht werden.



Die heutige Wirtschaftsweise der Industrie in Nordrhein-Westfalen sowie die zugrundeliegenden Wertschöpfungsketten müssen sich dafür zukünftig fundamental ändern. Neben der Dekarbonisierung, also dem vollständigen Verzicht auf Kohlenstoff, bestehen drei Ansätze, mittels derer der Umgang mit Kohlenstoff klimaneutral gestaltet werden kann:



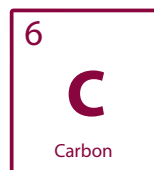
→ **Defossilisierung**
(Ersatz von fossilem Kohlenstoff durch Biomasse)



→ **Nutzung von Sekundärrohstoffen**
(Recycling)



→ **Carbon Capture and X**
(CO₂-Abscheidung, -Transport, -Nutzung und -Speicherung)



Eine vollständige Dekarbonisierung unserer Industrie ist nicht möglich. Für die Transformation in eine Low Carbon Industry ist die Erschließung alternativer Kohlenstoffquellen (Biomasse, Sekundärrohstoffe und CO₂) und darauf basierender Wertschöpfungspfade in Nordrhein-Westfalen somit ebenso erforderlich wie das Management überschüssiger CO₂-Mengen, die nicht genutzt werden können.

Alternative Kohlenstoffquellen sollten langfristig in ausreichender Menge zur Verfügung stehen und dazu beitragen, die Klimaschutzziele zu erreichen. Wie nachhaltig die Nutzung alternativer Kohlenstoffe ist, kann dabei jedoch nicht allein anhand der Kohlenstoffquelle festgemacht werden. Eine Beurteilung der Nachhaltigkeit kann vielmehr nur durch die Betrachtung des gesamten Wertschöpfungspfadens von der Kohlenstoffgewinnung über die Produktherstellung bis hin zur Produktnutzung und -nachnutzung erfolgen.



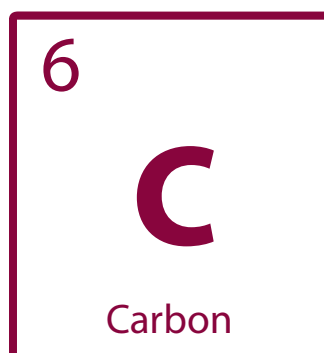
Für die Nachhaltigkeit alternativer Wertschöpfungspfade sind folgende Kriterien entscheidend:

- CO₂-Bilanz des Wertschöpfungspfad¹⁶
- Energiebilanz des Wertschöpfungspfad¹⁷
- Qualität des resultierenden Produktes
- Stofflicher Bedarf an Wasserstoff im Zuge der Umwandlung und Produktherstellung
- Schädlichkeit des resultierenden Produktes für den Menschen und/oder die Umwelt
- Marktpotenzial des resultierenden Produktes und somit das absolute Klimaschutz⁻¹⁸ und/oder rohstoffliche Substitutionspotenzial.

4.1 Potenziale und Grenzen der Dekarbonisierung

Der Begriff der Dekarbonisierung, der wortwörtlich die vollständige Abkehr von Kohlenstoff bedeutet, hält seit Mitte der 2010er Jahre zunehmend Einzug in die Klimaschutzdebatte.¹⁹ Inzwischen wurde der Begriff der Dekarbonisierung aufgeweicht und wird in der breiten Debatte als die „Verminderung kohlenstoffhaltiger Emissionen (besonders durch die Abkehr von fossilen Energieträgern)“²⁰ verstanden. Dies birgt Risiken. Zum einen behindert diese Aufweichung die Ausschöpfung tatsächlich

vorhandener Dekarbonisierungspotenziale, die nicht ungenutzt bleiben dürfen. Zum anderen käme eine vollständige Dekarbonisierung aller Wirtschaftsbereiche im ursprünglichen Wortsinn einer vollkommenen Deindustrialisierung gleich, die insbesondere für ein Industrieland wie Nordrhein-Westfalen keine Option darstellt. Die Anforderungen im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung im industriellen Sektor müssen somit differenzierter betrachtet werden.



Kohlenstofffreie Energieträger in der Industrie

Eine Dekarbonisierung der industriellen Energieerzeugung und -nutzung ist – zumindest theoretisch – in weiten Teilen möglich. Der Bezug eines grünen Strommixes ist hierzu zwar nicht geeignet, da in diesem auch kohlenstoffhaltige Biomasse enthalten ist.²¹ Power Purchase Agreements, zum Beispiel mit einem Windpark, ermöglichen dagegen aber eine reelle oder zumindest eine bilanzielle Dekarbonisierung.²² Grundsätzlich ist die Dekarbonisierung der industriellen Energieversorgung anzustreben. Auch wenn der direkte Einsatz von Strom mit den geringsten Umwandlungsverlusten behaftet ist, gibt es durchaus Bereiche, in denen eine Dekarbonisierung auf Basis einer Elektrifizierung energetisch und CO₂-bilanziell derzeit nicht sinnvoll ist oder aufgrund eingeschränkter Flexibilisierungsmöglichkeiten in Anbetracht der Fluktuation erneuerbarer Energien (noch) nicht infrage kommt. Hier müssen wasserstoffbasierte Wärmeerzeugungsverfahren erwägt und dem Einsatz von alternativen Brennstoffen (mit dem Ziel der Defossilisierung) sowie den Optionen im Rahmen von Carbon Capture and X gegenübergestellt werden, um anhand obiger Kriterien die beste Alternative zu identifizieren.

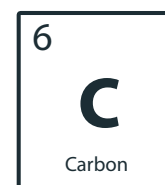
Kohlenstofffreie Hilfsstoffe in der Industrie

Als Hilfsstoff wird Kohlenstoff vor allem für die Herstellung von Metallen (Stahl und Aluminium) benötigt. Die jährliche Stahlerzeugung in Deutschland in Höhe von circa 45 Millionen Tonnen erfolgt heute weitestgehend mithilfe von kohle- beziehungsweise koks-basierten Prozessen über die Hochofenroute.²³ Bei der Reduktion des Eisenerzes mit Koks entstehen große Mengen CO₂. Eine Alternative zu dieser konventionellen Eisenerzreduktion ist die sogenannte Direktreduktion von Eisenerz unter Einsatz von Wasserstoff, die zunehmend in den Fokus rückt. Dennoch geht in der konventionellen Hochofenroute ein Teil des Kohlenstoffs aus dem Koks in den Stahl ein. Auch bei der Direktreduktion mit Wasserstoff wird somit noch Kohlenstoff benötigt, der hierbei über die Zugabe von Erdgas (CH₄) bereitgestellt wird. Wenngleich die Mengen gering sind, kann über dieses Verfahren keine Dekarbonisierung realisiert werden. Nichtsdestotrotz handelt es sich um einen klimaneutralen Prozess, da der Kohlenstoff im Stahl permanent chemisch gebunden ist und kein CO₂ entsteht.

Die Aluminiumherstellung könnte im Gegensatz zur Stahlherstellung durch den Einsatz einer inerten Anode anstelle einer Kohlenstoff-Anode vollständig kohlenstofffrei erfolgen. Dadurch würde nicht nur die Entstehung von CO₂, sondern auch die Entstehung der höchst klimawirksamen Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) vermieden werden.²⁴ Zwar wurden in den vergangenen zehn Jahren deutliche Fortschritte bei der Entwicklung inerte Anoden gemacht, bisher ist es aber noch keinem Industrieunternehmen gelungen, diese erfolgreich zur Aluminiumelektrolyse einzusetzen, auch wenn weltweit an der Umsetzung dieser Technologie unter Betriebsbedingungen gearbeitet wird.²⁵ Auch das nordrhein-westfälische Unternehmen Trimet forciert, unterstützt von der Landesregierung, den Einsatz der inerten Anode.

Kohlenstofffreie Rohstoffe für die Industrie

Die gesamte organische Chemie und die nachgelagerten Wertschöpfungen basieren auf Kohlenstoff als Rohstoff. Eine Dekarbonisierung ist hier ausgeschlossen. Dasselbe trifft auf die kalkbasierten Prozesse, insbesondere die Zementherstellung, zu. Eine Ausnahme stellt die Glasindustrie dar, die zurzeit auf Soda und Kalkstein (Karbonate) als Rohstoff setzt. Um die Rohstoffbasis der Glasindustrie zu dekarbonisieren, wird zurzeit der Einsatz von Hydroxiden erforscht, der keine rohstoffbedingte CO₂-Entstehung mit sich bringt. Gelingt zudem die Umstellung auf kohlenstofffreie Energie, besteht das Potenzial einer vollständigen Dekarbonisierung der Glasindustrie.



4.2 Defossilisierung mit Biomasse: Gut, aber nicht beliebig skalierbar

Mit der Defossilisierung wird im Unterschied zur Dekarbonisierung die Abkehr von fossilen Rohstoffen, nicht aber die Abkehr von Kohlenstoff an sich angestrebt. Durch eine Defossilisierung kann erreicht werden, dass trotz kohlenstoffhaltiger Prozesse und Produkte keine zusätzlichen CO₂-Mengen in die Atmosphäre eingebracht werden. Die zentrale Rolle dabei spielt die Nutzung von Biomasse.

Biomasse ist ein wichtiger Bestandteil des Kohlenstoffkreislaufs. Im Zuge der Photosynthese wird der Atmosphäre CO₂ entzogen und unter anderem in Kohlenstoff umgewandelt. Pflanzen sind somit eine natürliche Kohlenstoffsенke. Ein Hektar Wald bindet ungefähr 10 Tonnen CO₂ pro Jahr. In Nordrhein-Westfalen werden ca. 8,5 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr von Waldflächen absorbiert.²⁶ Die Nutzung von Biomasse wird als klimaneutral betrachtet, da bei deren Verwertung maximal so viel CO₂ frei wird, wie zuvor während des Wachstums auch aufgenommen wurde.²⁷

Zwar handelt es sich bei Biomasse um einen nachwachsenden Rohstoff, der sowohl stofflich als auch energetisch klimaneutral genutzt werden kann. Gleichzeitig tragen der Erhalt von Wäldern, die Wiederaufforstung und eine stärkere Begrünung urbaner Regionen aber auch zur Verbesserung der Boden- und Luftqualität bei. Da die Anbauflächen insgesamt stark begrenzt sind, tritt der Anbau von Biomasse zur Nutzung als Rohstoff also nicht nur in Konkurrenz mit der Lebensmittelproduktion, sondern steht auch in Konflikt mit der Biodiversität. Grundsätzlich ist bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Biomasse als Kohlenstoffquelle daher zwischen nachwachsenden Rohstoffen und Restbiomassen zu unterscheiden. Die Nutzung von nachwachsender Biomasse als Rohstoff für die Industrie ist häufig nur eingeschränkt nachhaltig. Bei biogenen Rohstoffen, die stofflich in industriellen Prozessen genutzt werden sollen, kann nur dann von Nachhaltigkeit gesprochen werden, wenn diese vor allem auf Flächen angebaut werden, die aus Umwelt- und Naturschutzsicht unproblematisch sind. Eine Konkurrenz mit Flächen, die für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion genutzt werden, ist dabei ebenso zu vermeiden wie die energetische Nutzung von Anbaubiomasse und Waldrestholz, die laut Umweltbundesamt zu einer Minderung der natürlichen CO₂-Senken führt.²⁸

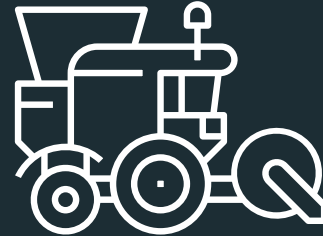
8,5 Millionen Tonnen CO₂
werden jährlich in Nordrhein-Westfalen
von **Waldflächen** absorbiert.

In Deutschland wurden 2015 knapp 185 Millionen Tonnen Biomasse (Trockengewicht) in Land- (137 Millionen Tonnen) und Forstwirtschaft (48 Millionen Tonnen) erzeugt. Weitere 72 Millionen Tonnen Biomasse in Form von Rohstoffen und verarbeiteten Waren wurden importiert. Der Gesamtexport betrug 65 Millionen Tonnen. In Summe resultiert im Bezugsjahr 2015 ein deutschlandweites Inventar von 192 Millionen Tonnen Biomasse.²⁹

Weniger problematisch als die Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist die Verwendung von biogenen Rest- und Abfallstoffen, vorzugsweise organischer Reststoffe aus der Industrie und der kommunalen Entsorgung. Hierbei handelt es sich um eine weitgehend uneingeschränkt zukunftsfähige alternative Kohlenstoffquelle.³⁰ Abgesehen von der Quelle wird die Nachhaltigkeit biobasierter Wertschöpfungsketten häufig auch insbesondere durch deren Kaskadennutzung determiniert.³¹

Eine Defossilisierung ist im Gegensatz zur Dekarbonisierung in vielen Bereichen der Wirtschaft und insbesondere auch der Industrie ein zumindest technisch mögliches Szenario. Dennoch sind dem Grenzen gesetzt. Zum einen durch die Knappheit der Biomasse, zum anderen mangels Substitutionsmöglichkeiten für kalkbasierte Anwendungen und Baustoffe wie Zement.

192 Millionen Tonnen Rohbiomasse in Deutschland



**185 MILLIONEN
TONNEN**

erzeugt



**72 MILLIONEN
TONNEN**

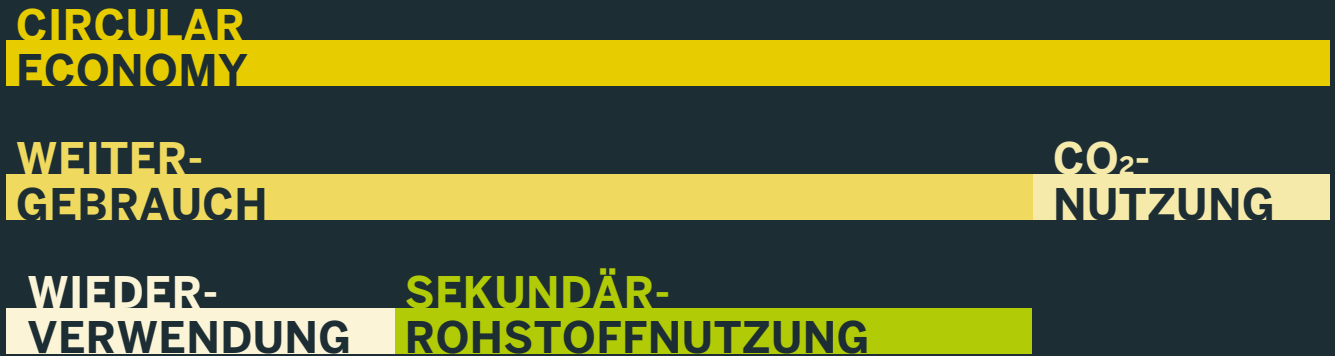
importiert



**65 MILLIONEN
TONNEN**

exportiert

Abbildung 4: Einordnung der Sekundärrohstoffnutzung innerhalb der Circular Economy



4.3 Sekundärrohstoffnutzung: Kern der industriellen Transformation

Mit dem European Green Deal³² und dem Circular Economy Package von 2015³³ hat die Europäische Union zwei wichtige Eckpfeiler in die Diskussion um die Transformation der europäischen (und internationalen) Industriegesellschaften eingebracht. Das Verständnis der Circular Economy geht dabei deutlich über die klassische Kreislaufführung und Abfallhierarchie hinaus und greift in den Kern der industriellen Wertschöpfung ein.

Eine Circular Economy umfasst den Weitergebrauch von Produkten, Komponenten und elementaren Bestandteilen im weitesten Sinne sowie die Nutzung des entstehenden

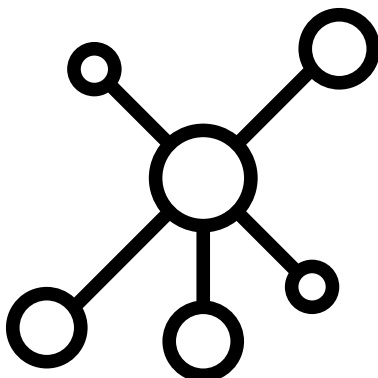
CO₂. Hinsichtlich des Weitergebrauchs kann die Wiederverwendung (auf Produktebene) von der Sekundärrohstoffnutzung unterschieden werden. Die Wiederverwendung durch Aufarbeitung, Instandsetzung und/oder Neukonfigurierung bezieht sich auf ein bereits bestehendes Produkt. Für die industrielle (Grundstoff-)Produktion ist daher insbesondere die Sekundärrohstoffnutzung von Bedeutung. Sekundärrohstoffe schonen natürliche Vorräte und ermöglichen den (anteiligen) Verzicht auf fossile Ressourcen. Zudem sind entsprechende Verarbeitungsprozesse nicht selten deutlich energieeffizienter als die jeweiligen primären Routen.

Viele potenzielle Sekundärrohstoffe werden heute zunächst als Abfälle behandelt und klassifiziert. Allerdings **endet die Abfalleigenschaft eines Stoffes** gemäß Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, wenn dieser ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

- ⌚ er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
- ⌚ ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
- ⌚ er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
- ⌚ seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.³⁴

Wenngleich diese Kriterien zunächst eindeutig scheinen, sind sie dennoch für den praktischen Einsatzfall häufig zu unkonkret, wodurch eine Ausweitung der Sekundärrohstoffnutzung derzeit gehemmt wird: Da für Produkte aus Sekundärrohstoffen keine Produktnormen existieren und Normen für Primärprodukte nur bedingt angewendet werden können, werden viele potenzielle Sekundärrohstoffe heute entsorgt beziehungsweise energetisch verwertet. Somit besteht auch kaum die Möglichkeit, dass ein Markt oder eine Nachfrage dafür entsteht.

Hinsichtlich der Gewinnung sekundärer Rohstoffe, sogenannter Rezyklate, sollte werkstoffliches (mechanisches) Recycling dem chemischen Recycling aus energetischer Sicht vorgezogen werden.



Sind die mechanischen Möglichkeiten ausgeschöpft, ist das chemische Recycling allerdings eine vielversprechende Option, um die Kohlenwasserstoffe im Stoffkreislauf zu halten, anstatt sie energetisch zu verwerten und damit abzuwerten.³⁵

Müllverbrennungsanlagen sollten letztlich nur noch zur Ausschleusung von Schadstoffen dienen. Ziel muss somit sein, den Anteil tatsächlicher Abfallstoffe zu minimieren. Die Zusammensetzung der Reststoffe aus der Müllverbrennungsanlage muss dazu laufend untersucht werden, um das Potenzial einer stofflichen Nutzung heben zu können.

Bei aus Rezyklaten hergestellten Produkten handelt es sich in der Regel um Produkte, in denen der Kohlenstoff dauerhaft chemisch gebunden ist (zum Beispiel Kunststoffe). Im Rahmen der vorgesehenen Nutzung entsteht daher kein CO₂. Wichtig ist hier vielmehr die Frage danach, was nach der Nutzung mit dem Produkt geschieht. Die Kreislaufführung (Sammelquote) muss hier ebenso maximiert werden wie der Anteil stofflich verwerteter Abfälle (Recyclingquote).

Wichtig ist dafür ein Design for Recycling, das mechanisches Recycling erleichtert und Downcycling besser vermeidbar macht.

4.4 CCX: Voraussetzung für eine klimaneutrale Industrie in Nordrhein-Westfalen

Ohne das vorausschauende und ganzheitliche Management von CO₂ durch Abscheidung und Transport (Carbon Capture and Transport, CCT), Nutzung (Carbon Capture and Usage, CCU) sowie Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS), wird das Ziel der Treibhausgasneutralität in Nordrhein-Westfalen voraussichtlich nicht erreicht werden können. Die Summe dieser CO₂-Managementaktivitäten CCT, CCU und CCS, die nicht losgelöst voneinander betrachtet werden dürfen, wird hier auch als CCX bezeichnet.

Während CCU primär darauf abzielt, den im CO₂ enthaltenen Kohlenstoff erneut zu nutzen, besteht das Ziel von CCS darin, das Kohlenstoffdioxid aus dem Kreislauf zu entfernen und dauerhaft zu speichern. Auch CCU-Anwendungen haben in der Regel einen positiven Klimaeffekt. Dennoch sind heute keine Anwendungen mit langfristiger CO₂-Bindung in dem Umfang und in der kurzfristigen Verfügbarkeit bekannt, die mit den Treibhausgasreduktionszielen und dem Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 vereinbar wären. Insofern müssen parallel die Voraussetzungen für die Speicherung von CO₂ geschaffen werden. Die Voraussetzung für CCU und CCS ist gleichermaßen eine geeignete Transportinfrastruktur. Aufgrund der Komplexität und Dauer großer Infrastrukturprojekte muss die Planung dieser schleunigst aufgenommen und vorangetrieben werden.

4.4.1 CO₂-Abscheidung in Nordrhein-Westfalen

CO₂ kann direkt an energiewirtschaftlichen oder industriellen Anlagen, sogenannten Punktquellen, abgeschieden werden, bevor es in die Atmosphäre gelangt. Alternativ können CO₂-Emissionen aus diffusen Quellen, wie der Landwirtschaft und dem Verkehr, sowie das bisher angereicherte CO₂ aus der Atmosphäre genutzt werden, indem mithilfe der sogenannten Direct-Air-Capture-Technologie (DAC-Technologie) Umgebungsluft durch einen Filter bewegt und das in der Luft enthaltene CO₂ chemisch gebunden wird.

Die Abscheidung aus der Luft ist jedoch aufgrund der geringen CO₂-Konzentration äußerst energieintensiv und mit Kosten in Höhe von 600 bis 1000 Euro pro Tonne CO₂ derzeit noch um ein Vielfaches teurer als die Abscheidung aus industriellen Punktquellen,³⁶ deren Kosten je nach CO₂-Konzentration im Rauchgas und Abscheidetechnologie meist bereits deutlich unterhalb von 100 Euro pro Tonne CO₂ liegen. Die künftige Bedeutung von DAC in Nordrhein-Westfalen ist daher aus heutiger Sicht noch fraglich.

Der Fokus muss kurz- und mittelfristig entsprechend auf die Abscheidung von CO₂ an industriellen Punktquellen gelegt werden.³⁷ Die größten Punktquellen und deren CO₂-Konzentrationen in Nordrhein-Westfalen sind in Tabelle 1 dargestellt. Auf die wichtigsten Punktquellen und den Umgang mit der Möglichkeit der CO₂-Abscheidung in Nordrhein-Westfalen wird nachfolgend eingegangen.

Knapp die Hälfte (44 Prozent) der 2019 in Nordrhein-Westfalen angefallenen 228,5 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen waren dem Sektor Energiewirtschaft zuzuschreiben (ca. 102 Millionen Tonnen CO₂).

Neben der Energiewirtschaft stellte die Industrie den zweitgrößten Emittenten in Nordrhein-Westfalen dar (ca. 51 Millionen Tonnen CO₂). Insgesamt fielen über zwei Drittel (67,3 Prozent) der Emissionen in Nordrhein-Westfalen an Punktquellen an.³⁸



Die Kohlekraftwerke in Nordrhein-Westfalen sind derzeit noch der Hauptverursacher der an Punktquellen anfallenden CO₂-Emissionen. Die Beendigung der Kohleverstromung ist jedoch bis spätestens 2038 beschlossen.³⁹ Studien, die das neue Ziel der Klimaneutralität bis 2045 in den Blick nehmen, ergeben sogar, dass ein Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland bis 2030 erforderlich sei.⁴⁰

Unzweifelhaft implizieren die nunmehr nochmals verschärften Klimaschutzziele die Notwendigkeit einer höheren Transformationsgeschwindigkeit für den Energiesektor. Der Umbau des Energiesystems muss nun schneller erfolgen als bisher vorgesehen. Gleichwohl lässt die einseitige Beschränkung auf einen früheren Kohleausstieg die Komplexität unseres Energiesystems gänzlich außer Acht. Ein gegenüber den gesetzlich fixierten Kohleausstiegspfadern nochmals frühzeitigerer Kohleausstieg kann nur dann erfolgreich sein, wenn die energiewirtschaftlichen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen gegeben sind. Nicht ohne Grund sieht das Kohleverstromungsbeendigungsgesetz⁴¹ vor, dass im Rahmen der Revisionspunkte in den Jahren 2022, 2026, 2029 und 2032 insbesondere die Auswirkungen des Kohleausstiegs auf die Versorgungssicherheit und die Klimaschutzziele, aber auch die Entwicklung der Strompreise auf wissenschaftlicher Grundlage und anhand von festgelegten Kriterien überprüft werden sollen. Klar erkennbar ist dabei schon jetzt, dass ohne den deutlichen Zubau von erneuerbaren Energien, den Ausbau unserer Stromnetze und den Neubau von Gaskraftwerken der Kohleausstieg wohl nicht gelingen wird.

Auch ungeachtet der Diskussionen um eine weitere Beschleunigung des Kohleausstiegs ist die stark degressive Entwicklung der Kohleverstromung in Nordrhein-Westfalen am Vergleich der Emissionen im Jahre 2019 mit den vorläufigen Daten des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) für das Jahr 2020 bereits jetzt deutlich zu erkennen: Innerhalb eines Jahres hat Nordrhein-Westfalen eine Reduktion der CO₂-Emissionen aus der Kohleverstromung um 15 Millionen Tonnen erreicht.

Die verschärften Klimaschutzziele implizieren die Notwendigkeit einer höheren Transformationsgeschwindigkeit für den Energiesektor. Der Umbau des Energiesystems muss nun schneller erfolgen als bisher vorgesehen.



Tabelle 1: Wesentliche Punktquellen in Nordrhein-Westfalen und deren Emissionen, CO₂-Konzentrationen, Abscheideaufwände⁴²

Quelle		CO ₂ -Emissionen in Millionen Tonnen pro Jahr (2019)		CO ₂ -Emissionen in Millionen Tonnen pro Jahr (2020, vorläufig)		CO ₂ -Konzentration im Rauchgas in Prozent	Kostenbandbreite in Euro pro Tonne CO ₂	Ansatz
Kohle- kraftwerke (Braunkohle)	Energiewirtschaft	57,6	58,4	44,8	45,5	12–15 % 54–76 % im Oxyfuel-Verfahren	25–110	Keine Abscheidung
	Industrie	0,8		0,7				Keine Abscheidung
Kohle- kraftwerke (Steinkohle)	Energiewirtschaft	15,2	19,1	13,2	16,9	12–15 % 80 % im Oxyfuel-Verfahren	25–110	Keine Abscheidung
	Industrie	3,9		3,7				Keine Abscheidung
Eisen- und Stahlindustrie inkl. Kokereien		-	20,3	-	17,7	2–35 % 1–5,4 % für Koksofengas	40–212	Abscheidung zur Technologienent- wicklung
Chemische Industrie			15,0		14,2	bis zu 100 %	19–28	Abscheidung
Zement- und Kalkindustrie			10,3		9,8	14–33 %	14–165	Abscheidung
Raffinerien			7,2		7,0	3–13 % 20 % bei Ölraffinerien		Abscheidung
Gas- kraftwerke (KWK)	Energiewirtschaft (IA1a – IA1c)	11,1	12,9	11,3	13,1	3–10 %	63–75	Umrüstung auf Wasserstoff
	Industrie (IA2a – IA2m)	1,8		1,8				Umrüstung auf Wasserstoff
Müllverbrennungsanlagen		-	3,1	-	N. A.	12–15 %	25–110	Abscheidung

Vor dem Hintergrund der weiter beschleunigten Fortsetzung dieses Trends, der aus Klimaschutzgründen sehr zu begrüßen ist, ist eine Investition in Abscheidetechnologien in Kohlekraftwerken nicht zielführend. Dies gilt für Kohlekraftwerke der Energiewirtschaft sowie gleichermaßen auch für Industriekraftwerke. Denn die CO₂-Abscheidung in Kohlekraftwerken ist trotz des hohen Reifegrades der Abscheidetechnologien als Klimaschutzmaßnahme ökonomisch deutlich unvorteilhafter als der Einsatz von erneuerbaren Energien.

Auch eine Abscheidung in Gaskraftwerken, denen beim Fuel Switch von Kohle auf Gas eine entscheidende Rolle bei der weiteren Gewährleistung der Versorgungssicherheit zukommen wird, stellt keine sinnvoll nutzbare Option dar. Vielmehr werden hier sukzessive gasbasierte Anlagen zum Einsatz kommen, die perspektivisch eine Umrüstung auf Wasserstoff, Biogas oder wasserstoffbasierte Brennstoffe⁴³ ermöglichen.

Vorrangig stehen hier somit solche industriellen Prozesse im Fokus, bei denen die CO₂-Reduktionsmöglichkeiten aufgrund prozessbedingter CO₂-Entstehung limitiert sind.⁴⁴

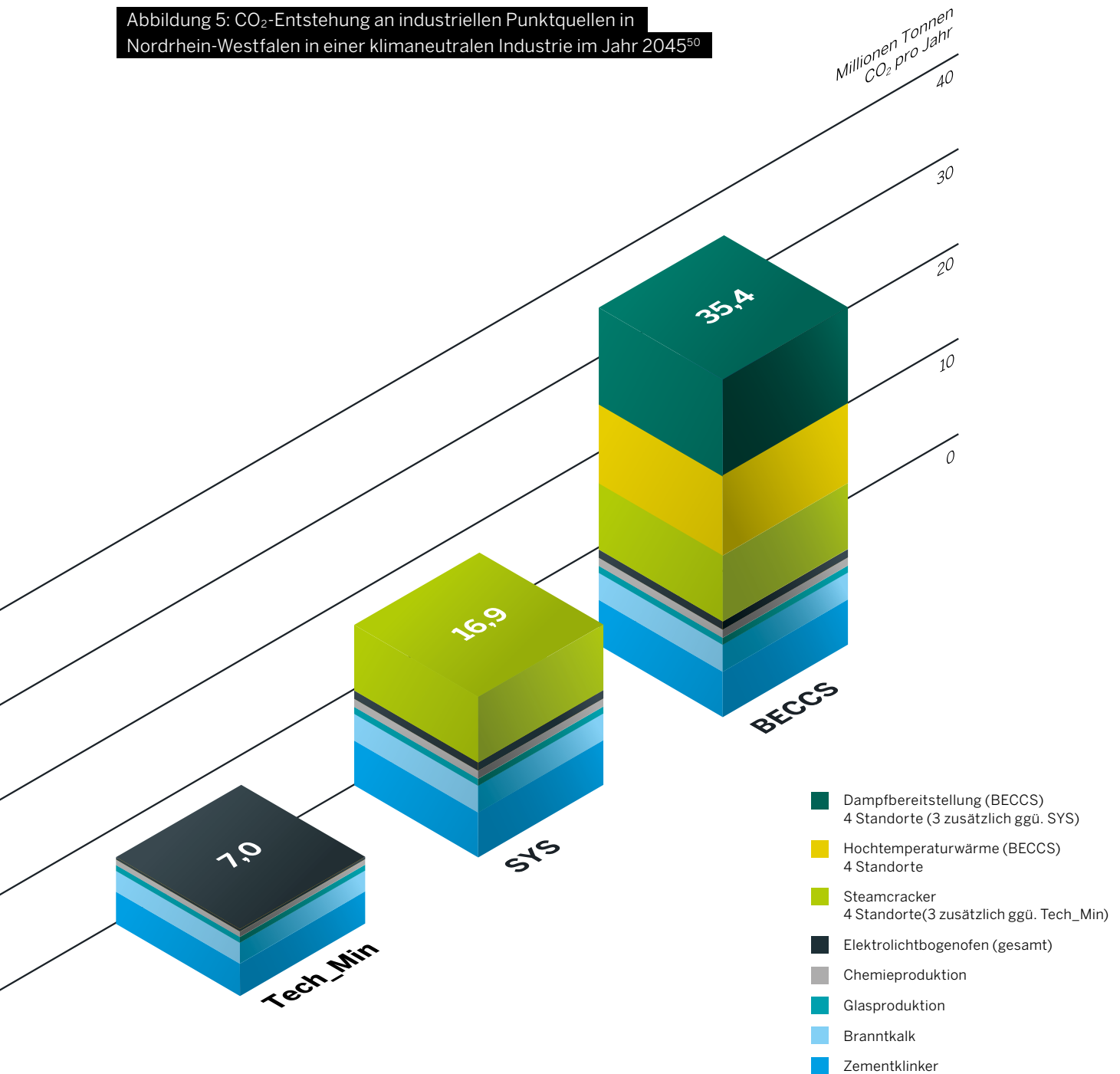
Prozessbedingte CO₂-Mengen kommen durch die Reaktion selbst und nicht durch den Einsatz der für den Prozess benötigten Energie zustande.

Prozessbedingt anfallende CO₂-Mengen in der Industrie gelten als unvermeidbar, sofern deren Entstehung trotz Optimierung des Produktionsverfahrens oder des Produktes nicht vermieden werden kann, das heißt, wenn keine alternativen Prozesse und keine alternativen Produkte oder Ressourcen in ausreichendem Maße für denselben Anwendungsfall verfügbar sind. Dazu zählen derzeit beispielsweise prozessbedingte CO₂-Mengen aus der Glasherstellung, der Chemieindustrie, der Kalk- und Zementproduktion und den Elektrolichtbogenöfen in der Stahlbranche. Die Unvermeidbarkeit ist allerdings nicht statisch, sondern dynamisch zu verstehen, da heute unvermeidbare CO₂-Mengen durch Innovationen oder veränderte Rahmenbedingungen gegebenenfalls in Zukunft vermeidbar sein könnten.⁴⁵

Die Aluminiumherstellung, im Rahmen derer während der Aluminiumelektrolyse durch den Verbrauch der Kohlenstoff-Anode CO₂ entsteht, zählt zurzeit noch zu denjenigen Prozessen, in denen die Entstehung von CO₂ unvermeidbar ist. Durch die weitere Entwicklung von inerteren Anoden können diese CO₂-Mengen zukünftig vielleicht vermieden werden. Ähnliches gilt für die Glasherstellung, die durch den Einsatz von Hydroxiden statt Karbonaten perspektivisch CO₂-frei werden könnte, sowie die Produktion von Soda in der Chemieindustrie.

Auch in einem klimaneutralen Nordrhein-Westfalen im Jahre 2045 werden nach heutigem Kenntnisstand unvermeidbare CO₂-Mengen anfallen. Die verbleibenden industriellen CO₂-Mengen in einem klimaneutralen Nordrhein-Westfalen belaufen sich einer Untersuchung von SCI4climate.NRW⁴⁶ zufolge aus heutiger Sicht je nach Szenario auf 7 bis 35 Millionen Tonnen pro Jahr.⁴⁷ Zum Vergleich: Die Gesamtemissionen in Nordrhein-Westfalen beliefen sich in 2020 auf voraussichtlich 203,5 Millionen Tonnen CO₂.⁴⁸ Auf die Höhe der verbleibenden CO₂-Mengen hat in Nordrhein-Westfalen insbesondere die Entwicklung der Steamcracker, die wesentlich für die Herstellung von Basischemikalien sind, einen großen Einfluss (vgl. Abbildung 5).⁴⁹

Abbildung 5: CO₂-Entstehung an industriellen Punktquellen in Nordrhein-Westfalen in einer klimaneutralen Industrie im Jahr 2045⁵⁰



Grundsätzlich wäre anzustreben, alle Anlagen mit langfristig oder dauerhaft unvermeidbarer CO₂-Entstehung mit Abscheideanlagen auszurüsten, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Unter Energieeffizienzaspekten sind industrielle CO₂-Quellen für eine Abscheidung umso attraktiver, je höher die vorliegenden CO₂-Konzentrationen im Rauchgas und je geringer die enthaltenen Verunreinigungen sind, da der Energieaufwand für die Abscheidung und Reinigung von CO₂ aus Gasen mit hochkonzentrierten

CO₂-Mengen, wie bereits oben im Zusammenhang mit DAC erwähnt, geringer ist als für die Abscheidung aus verdünnten Rauchgasen.^{51,52} Insbesondere in der chemischen Industrie fallen CO₂-Konzentrationen von bis zu 100 Prozent an. Auch CO₂ aus der Kalk- und Zementindustrie bietet sich trotz der geringen Konzentrationen von 14 bis 33 Prozent für eine Abscheidung an, da die CO₂-Mengen dauerhaft anfallen werden.

Neben der Abscheidung und Verwendung von reinem CO₂ gibt es Wertschöpfungspfade, die eine Verwertung von Gasgemischen forcieren, wodurch der Aufwand zur Abtrennung des CO₂ gering gehalten werden kann und der Bedarf an Wasserstoff für die Produktherstellung sinkt.⁵³ Dies betrifft zum Beispiel Koksöfen. Hier liegt CO₂ im Koksofengas zwar mit maximal 5,4 Prozent vor, diese Gase sind jedoch trotz der geringen CO₂-Konzentrationen insbesondere aufgrund des hohen Wasserstoffanteils und weiterer Bestandteile wie Methan und Kohlenstoffmonoxid interessant.⁵⁴ Hierauf basierend werden integrierte Ansätze zur Nutzung der Hüttengasgemische verfolgt, indem die Gase in ihre Komponenten zerlegt und vollständig in der chemischen Industrie eingesetzt werden.⁵⁵ In Nordrhein-Westfalen lassen die geringen Mengen jedoch keine Skalierung zu – zumal Hüttengase mit der Umstellung der Stahlproduktion auf eine Direktreduktion entfallen würden. Jedoch wird die Hochofenroute weltweit noch mehrere Jahrzehnte weitergenutzt werden, sodass ein Export der Technologien und Verfahren auf Abscheidungs- und Nutzungsseite eine Chance für neue Wertschöpfung in Nordrhein-Westfalen sein könnte.

Auch die Abscheidung kurz- bis mittelfristig vermeidbarer (fossiler) industrieller CO₂-Mengen muss jedoch in den Blick genommen werden, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Dazu müssen technische und logistische Konzepte und Geschäftsmodelle entwickelt werden, die Stranded Assets vermeiden.

4.4.2 CO₂-Nutzung (CCU) in Nordrhein-Westfalen

Bereits heute werden weltweit jährlich 230 Millionen Tonnen CO₂ genutzt.⁵⁶ Die derzeitige technische Nutzung von Kohlenstoffdioxid erfolgt fast ausschließlich in Anwendungen, in denen man sich dessen spezifische stoffliche Eigenschaften zunutze macht.⁵⁷ Insbesondere die große Wärmeaufnahmekapazität, die stabile und nicht reaktive Natur und die Fähigkeit, als Lösungsmittel zu fungieren, machen CO₂ beispielsweise in der Produktion von Lebensmitteln und Getränken, in der Metallverarbeitung, bei der Kühlung, bei der chemischen Reinigung, im Gesundheitswesen, bei der Wasseraufbereitung, in der Brandbekämpfung und zur Verbesserung der Ausbeute der Rohölgewinnung schon heute zum wertvollen Einsatz-

stoff.⁵⁸ Bei dem eingesetzten Kohlenstoffdioxid handelt es sich zurzeit vorwiegend um das als Nebenprodukt anfallende CO₂ aus der Ammoniakherstellung oder um Kohlensäure, die aus natürlichen Vorräten unter der Erde gefördert wird.

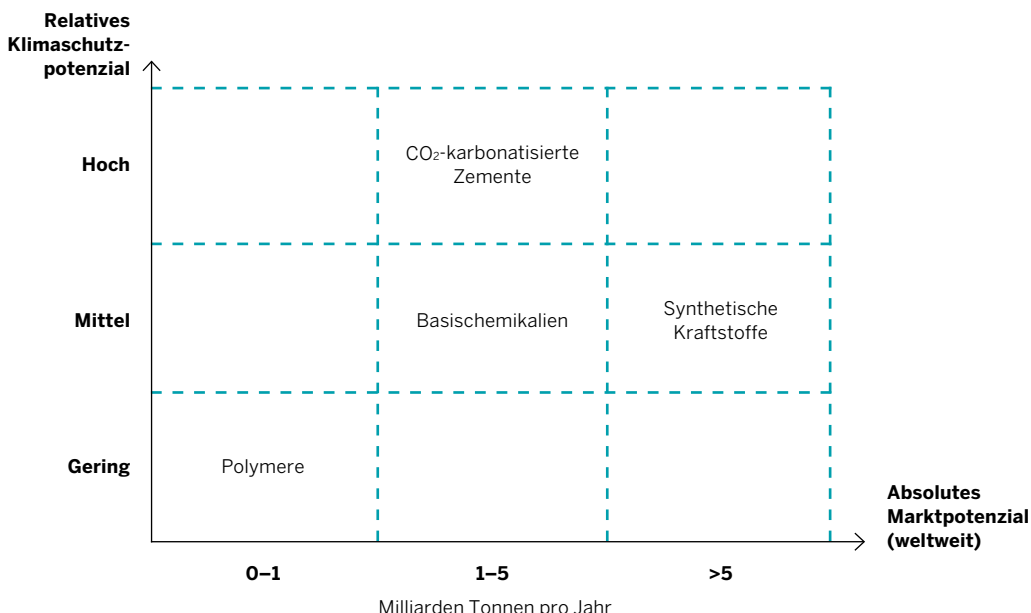
CO₂ aus den Abgasen industrieller Prozesse kommt heute noch nicht in nennenswertem Umfang zum Einsatz. Die Nutzung abgeschiedener industrieller CO₂-Mengen in Anwendungen, in denen Kohlenstoffdioxid ein Ersatz für fossile Kohlenstoffe sein kann, und in solchen, die zur Verlängerung der Kohlenstoff-Nutzungskette beziehungsweise zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs beitragen, rückt jedoch zunehmend in den Fokus.⁵⁹ CCU kann dabei zugleich zur Vermeidung von Emissionen und zur Erschließung einer alternativen Kohlenstoffquelle beitragen.

Auch die Nutzung von CO₂ ist im weitesten Sinne zirkulär, muss aber getrennt von der Sekundärrohstoffnutzung betrachtet werden. Nicht nur, weil CO₂ reaktions-träge ist und energieintensiv wieder für neue, nützliche Verbindungen zugänglich gemacht werden muss, sondern auch, weil die rechtlichen Rahmenbedingungen für CO₂ als klimaschädliches Treibhausgas zum Teil vollständig andere sind.

Auch wenn einige CCU-Prozesse wirtschaftlich, ökologisch und technisch aussichtsreiche Wege zur stofflichen Verwertung von CO₂ darstellen, ist die Entwicklung einer Methode zur systematischen ökologischen und ökonomischen Gesamtbewertung unabdingbar, um eine positive Gesamtwirkung sicherzustellen.^{60,61} Hinzu kommt, dass das Potenzial von CCU-Anwendungen häufig erst im Zuge der Abkehr von fossilen Rohstoffen erschlossen werden kann. So ist die Harnstoffsynthese aus Ammoniak und Kohlenstoffdioxid das hinsichtlich der weltweiten Produktionsmenge derzeit bedeutsamste Verfahren, in dem CO₂ großtechnisch als Einsatzstoff verwendet wird.⁶² Im Fall einer erdgasbasierten Ammoniakproduktion steht das CO₂ jedoch bereits aus dem Vorprozess im Überschuss zur Verfügung. Ein CCU-Potenzial ergibt sich somit erst, wenn das Ammoniak künftig ohne die Nutzung kohlenstoffhaltiger fossiler Rohstoffe erzeugt würde.⁶³

Der zukünftige Markt für CO₂-basierte Produkte, dessen Potenzial ausschlaggebend ist für das absolute Klimaschutz- und/oder rohstoffliche Substitutionspotenzial sowie die generierbare Wertschöpfung, die ein wirtschaftlich tragfähiges Modell erst ermöglicht,⁶⁴ kann aufgrund des größtenteils noch frühen Stadiums der Technologieentwicklung und der großen Abhängigkeit von politischen Rahmenbedingungen nur schwer abgeschätzt werden. Eine von der International Energy Agency (IEA) durchgeführte Analyse des theoretischen Potenzials für die CO₂-Nutzung und der einhergehenden wahrscheinlichen Klimavorteile zeigt, dass synthetische Kraftstoffe das größte Marktpotenzial haben, während karbonatisierte Baustoffe aufgrund des geringen Energiebedarfs bei der Herstellung und der dauerhaften Bindung von Kohlenstoff im Produkt das größte Klimaschutzpotenzial aufweisen (vgl. Abbildung 6).⁶⁵ Gerade am Standort Nordrhein-Westfalen sind aber auch Chemikalien und Polymere in Bezug auf CCU-Anwendungen von erheblichem Interesse (vgl. dazu Abschnitt 5.1).

Abbildung 6: Theoretisches Markt- und Klimaschutzpotenzial CO₂-basierter Produkte⁶⁶



Wird CO₂ als alternative Kohlenstoffquelle genutzt, stellt sich vor allem auch die Frage nach dessen Verbleib während beziehungsweise nach der Nutzung. Der größte Teil der derzeitigen und mittelfristig absehbaren CO₂-Nutzung weist eine sehr kurze CO₂-Bindungszeit von Monaten oder maximal wenigen Jahren auf.^{67,68,69} In dem CCU-Marktsegment, in dem laut IEA am meisten Markt-

potenzial liegt – den synthetischen Kraftstoffen – wird das eingesetzte CO₂ bereits in der Nutzungsphase des Kraftstoffs wieder freigesetzt. Hier sollte präferiert CO₂ aus biogenen Quellen (grünes CO₂) zum Einsatz kommen, da somit selbst bei einer kurzfristigen Freisetzung Klimaneutralität erreicht werden kann, sofern der Prozess nachhaltig gestaltet wird.

Grünes CO₂

entsteht bei der Verwertung biogener Kohlenstoffe (Biomasse). Die Nutzung von grünem CO₂ ist unter denselben Umständen klimaneutral wie die Nutzung von Biomasse selbst. Auch Anwendungen, in welchen das CO₂ nicht permanent chemisch gebunden wird, wie zum Beispiel synthetische Kraftstoffe, können somit auf Basis von grünem CO₂ klimaneutral gestaltet werden. Ersetzt das grüne CO₂ fossile Kohlenstoffquellen oder kommt bei der Herstellung von Produkten zum Einsatz, in denen der Kohlenstoff permanent chemisch gebunden ist, ist sogar von einem (zeitweisen) positiven Klimaeffekt auszugehen.

Bei CO₂-basierten Produkten, in welchen der Kohlenstoff chemisch so gebunden ist, dass bei der bestimmungsgemäßen Nutzung kein CO₂ frei wird (in erster Linie Baustoffe und Polymere), können vorrangig auch fossile indus-

trielle CO₂-Mengen (graues CO₂) zum Einsatz kommen, sofern die Kreislaufführung in der Nachnutzungsphase definiert und vorbereitet wird, bevor entsprechende Produkte in den Markt gebracht werden.

Graues CO₂

entsteht bei der Verwertung fossiler Kohlenstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle, Kalk). Die Nutzung von grauem CO₂ zur Herstellung von Produkten, in welchen der Kohlenstoff nicht permanent chemisch gebunden ist, ist daher nicht klimaneutral. Dennoch können durch den Einsatz von grauem CO₂ die Gesamtemissionen gesenkt werden, wenn dadurch der Einsatz konventioneller fossiler Kohlenstoffe, deren Verwertung zur Entstehung weiterer CO₂-Mengen führen würde, reduziert wird. Mittel- und langfristig sollte graues CO₂ somit nur in Anwendungen zum Einsatz kommen, in denen eine (zeitnahe) Freisetzung ausgeschlossen werden kann.⁷⁰

4.4.3 CO₂-Speicherung (CCS) zur Begrenzung des Klimawandels

In Nordrhein-Westfalen werden auch nach erfolgreicher Transformation in eine Low Carbon Industry CO₂-Mengen anfallen, die nicht weiter reduziert werden können. Darüber, dass CCS, also die Abscheidung und Ablagerung zur dauerhaften Speicherung von CO₂, selbst bei Ausschöpfung aller Innovationspotenziale und vorgezogenen Investitionen benötigt wird, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, herrscht weitgehende Einigkeit in Fachkreisen (Wissenschaft und Industrie). Mit der Verschärfung der Klimaschutzziele hin zur Treibhausgasneutralität 2045 ist der Handlungsbedarf nochmal gestiegen.⁷¹

Gemäß der im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende von Prognos, des Öko-Instituts und des Wuppertal Instituts durchgeführten und im Juni 2021 veröffentlichten Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (KD45) würden 2045 ohne die Anwendung von CCS jährliche Restemissionen aus der Oxidation von fossilem Kohlenstoff oder der Entstehung von vor allem N₂O oder CH₄ in der Landwirtschaft in Höhe von ca. 80 Millionen Tonnen verbleiben. Davon entfielen 31 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr auf die Industrie.⁷²

Die CO₂-Emissionen der deutschen Industrie lagen im Jahr 2020 bei 178,1 Millionen Tonnen. Insofern wird in der Studie eine Reduktion der CO₂-Entstehung von über 83 Prozent innerhalb der (ab 2020) nächsten 25 Jahre unterstellt. Zum Vergleich: Die Reduktion der Industrieemissionen in den vergangenen 30 Jahren betrug ca. 37 Prozent und konnte insbesondere durch Energieträgerwechsel, Energieeffizienz, die Minderung prozessbedingter Emissionen und Produktionsrückgänge bewerkstelligt werden.

Die nordrhein-westfälische Industrie ist für rund 40 Prozent der Industrieemissionen in Deutschland verantwortlich und konnte seit 1990 eine Reduktion um ganze 46 Prozent erzielen.

Um diese enorme Reduktion der derzeitigen industriebedingten CO₂-Mengen auf 31 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr 2045 zu erreichen, müsste die durchschnittliche Reduktionsrate der letzten drei Jahrzehnte mehr als verdoppelt werden. Dafür sind fundamentale Innovationen in Verfahren und Technologie sowie die Nutzung aller anstehenden Reinvestitionen zur kommerziellen Umsetzung dieser erforderlich. Abwanderungen hingegen, die zwar bilanziell die Emissionen Deutschlands mindern, nicht aber zum Klimaschutz, der letztlich nur global betrachtet werden kann, beitragen, sofern konventionelle Prozesse andernorts fortgesetzt werden, müssen vermieden werden.

Doch selbst bei optimaler Ausschöpfung sämtlicher Innovations- und Umsetzungspotenziale und bei konstruktiver Kooperation aller Akteure verbleiben 2045 nach heutigem Stand der Kenntnis die oben erwähnten industriebedingten CO₂-Mengen in Deutschland in Höhe von laut KD45 31 Millionen Tonnen CO₂, die nicht weiter reduziert werden können. Ohne den Einsatz von CCS werden somit weder eine klimaneutrale Industrie noch ein klimaneutrales Nordrhein-Westfalen oder Deutschland erreicht werden können.

CCS ist keineswegs als Instrument zu verstehen, welches erlaubt, eingeschlagene Pfade weiterzuverfolgen, sondern als die letzte ergänzende Maßnahme nach einem enormen technologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Kraftakt.

Auch die jüngsten im Auftrag des BMWi von Fraunhofer ISI, consentec, ifeu und TU Berlin erstellten Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland („Langfristszenarien 3“), deren Ergebnisse im Zeitraum von Juni bis Juli 2021 im Rahmen einer Webinarreihe vorgestellt wurden, zeigen, dass Treibhausgasneutralität ohne CCS⁷³ in Deutschland kaum erreichbar sein dürfte.

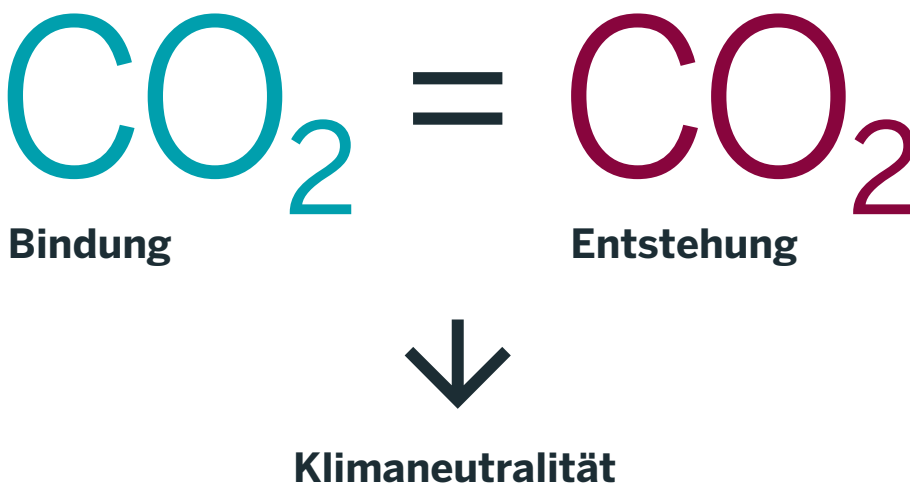
Gleichwohl wird dort ein deutlich geringerer CCS-Bedarf von 6 bis 9 Millionen Tonnen in 2050 ausgewiesen.⁷⁴ Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zugrundeliegenden Annahmen bezüglich des Ausbaus der erneuerbaren Energien, der Einführung von Breakthrough-Technologien und der Kreislaufführung im Vergleich zu

anderen Studien und Szenarien und laut eigener Aussage als überaus optimistisch zu werten sind. Exemplarisch sei hier zum Vergleich die CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie erwähnt, die bei Ausschöpfung aller Innovations- und Optimierungspotenziale einen verbleibenden CCS-Bedarf von mindestens 10,4 Millionen Tonnen ausweist, um Klimaneutralität zu erreichen,⁷⁵ wohingegen die BMWi-Langfristszenarien von nur 5 bis 7 Millionen Tonnen prozessbedingt verbleibenden CO₂-Mengen in der Zementindustrie ausgehen.⁷⁶ Die Langfassung der Studie und die Anpassung auf das neue Ziel 2045 sind im Nachgang der öffentlichen Konsultation im Rahmen der Webinarreihe derzeit in Arbeit.

Ein CCS-Bedarf
von bis zu **31** Millionen Tonnen
CO₂ pro Jahr in der deutschen Industrie
wird **für das Jahr 2045** ausgewiesen.

Um sicherzustellen, dass CCS tatsächlich nur zum Einsatz kommt, wenn Lock-in-Effekte ausgeschlossen werden können, sind – abgesehen von grundsätzlichen rechtlichen Anpassungen – klare, bundeseinheitliche Kriterien erforderlich, unter welchen Umständen CO₂ zur dauerhaften Verbringung abgedichtet werden darf.

Auch wenn die Nutzung von CO₂ als Rohstoff in Nordrhein-Westfalen etabliert werden und somit möglichst Vorrang gegenüber der Speicherung haben soll, bleibt zu berücksichtigen, dass Klimaneutralität nur erreicht werden kann, wenn mindestens ebenso viel CO₂ dauerhaft gebunden wird wie entsteht. Zwar wäre eine CCU-Anwendung, in der die dauerhafte Bindung des CO₂ sichergestellt ist, aus Klimaschutzgesichtspunkten gleichwertig zu CCS – in der Praxis sind jedoch derzeit noch keine CCU-Anwendungen bekannt, in denen Kohlenstoffdioxid im erforderlichen Umfang dauerhaft gebunden werden könnte.



Die geologische Speicherung von CO₂ innerhalb von Deutschland ist derzeit rechtlich ausgeschlossen.⁷⁷ Aufgrund fehlender gesellschaftlicher Akzeptanz wurden seit 2009 weder Infrastruktur und Speicherstätten noch die erforderlichen Rahmenbedingungen in Deutschland weiterentwickelt. Inwiefern eine Speicherung in Deutschland in der Zukunft technisch und gesellschaftspolitisch möglich sein wird, ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht abzusehen. Kurz- und mittelfristig wird Nordrhein-Westfalen somit auf Speichermöglichkeiten außerhalb Deutschlands setzen.

Derzeitige CCS-Projekte im internationalen Umfeld speichern CO₂ in Öl- und Gasfeldern, über deren Strukturen und Verhalten man aufgrund der jahrzehntelangen Erforschung durch die Öl- und Gasindustrie hervorragende Kenntnis besitzt.⁷⁸

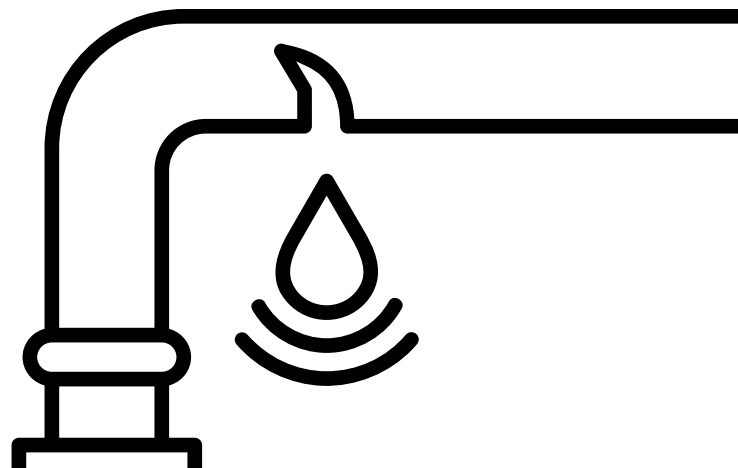
Grundsätzlich ist bei Erdöl- und Erdgaslagerstätten von einem geringen Leckagepotenzial auszugehen.

Hier sind geologische Bedingungen vorhanden, die Öl und Gas dort über viele Millionen Jahre zurückgehalten haben, bevor der Aufschluss der Lagerstätte und die Gewinnung der Kohlenwasserstoffe erfolgten. Das Risiko einer Wiederfreisetzung des in ausgebeutete Öl- und Erdgaslagerstätten eingespeicherten CO₂ ist grundsätzlich ähnlich zu beurteilen wie das der Freisetzung von Erdöl- und Erdgas während der Phase der Ausbeutung der Lagerstätte. Mögliche Leckagewege können sich aus betriebenen oder stillgelegten Bohrungen ergeben. Zudem stellen Kluftsysteme und geologische Störungen des Gebirgsaufbaus potenzielle Leckagewege dar. Diese Aspekte bedürfen einer sorgfältigen Erforschung im Einzelfall und eines umfassenden Monitorings während des Betriebs der Speicherung und über lange Zeiträume in der nachbetrieblichen Phase.

Für den Fall einer Wiederfreisetzung geringer Anteile des eingespeicherten CO₂ bleibt der positive Effekt für das Klima bestehen, da ohne Speicherung die gesamte Menge CO₂ unmittelbar freigesetzt wäre.

CO₂ ist inert und ungiftig. In stärkeren Konzentrationen ist es jedoch gefährlich für Mensch und Tier. Daher bedarf es einer entsprechenden Gefahrenprävention.

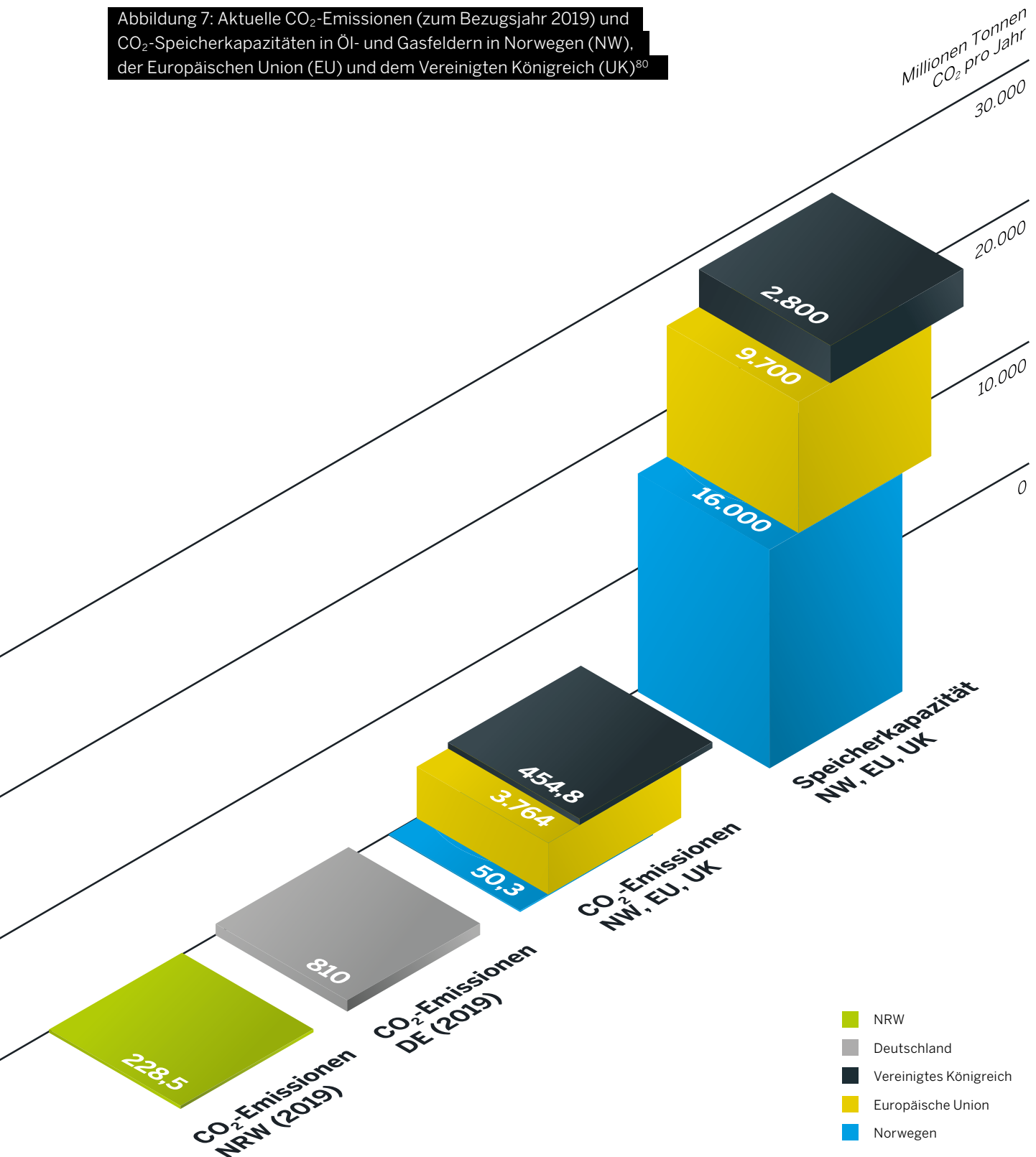
Hinsichtlich potenzieller Umweltauswirkungen ist in den Blick zu nehmen, dass austretendes CO₂ Schadstoffe im Gestein löst und den pH-Wert von Grundwasser oder – lokal begrenzt – von Meereswasser bei marinen Speicherstandorten absenken kann mit entsprechenden Auswirkungen auf die Gewässerqualität beziehungsweise die Meeresbiologie. Auch wenn das Risiko eines Austritts der Schadstoffe seitens führender Experten als gering oder gar ausgeschlossen eingeschätzt wird, sind dezidierte Kriterien für die Überwachung solcher Speicherstätten festzulegen, anhand welcher die Auswahl der Projekte erfolgen muss.



Die für Nordrhein-Westfalen primär als Speicherstätten infrage kommenden Öl- und Gasfelder in Norwegen, Europa und dem Vereinigten Königreich verfügen über eine Speicherkapazität für 28,5 Milliarden Tonnen CO₂.⁷⁹ Die

Speichermöglichkeiten in Öl- und Gasfeldern sind zwar angesichts der angestrebten Treibhausgasreduktionen zunächst ausreichend und aus nordrhein-westfälischer Sicht geografisch auch gut gelegen (vgl. Abbildung 7),

Abbildung 7: Aktuelle CO₂-Emissionen (zum Bezugsjahr 2019) und CO₂-Speicherkapazitäten in Öl- und Gasfeldern in Norwegen (NW), der Europäischen Union (EU) und dem Vereinigten Königreich (UK)⁸⁰



langfristig und unter der Berücksichtigung voraussichtlich erforderlicher negativer Emissionen werden aber auch die Speicherkapazitäten saliner Aquifer-Strukturen benötigt werden, die Hunderte Male so groß sind. Da saline Aquifere keinen oder einen nur geringen wirtschaftlichen Wert haben, wurde auch international bislang kaum in deren Erforschung investiert. Es besteht daher dringender Bedarf für die Erforschung und Erschließung dieser Speicherstätten.⁸¹ Gegenüber der Speicherung von CO₂ in ausgeförderten Erdöl- und Erdgaslagerstätten sind hierbei jedoch auch weitere potenzielle Umweltauswirkungen zu prüfen. Bei der Speicherung in salinen Aquifer-Strukturen werden hochmineralisierte Formationswässer verdrängt. Das Risiko einer Schädigung von anderen Grundwasserhorizonten, Böden und Oberflächengewässern ist daher bei der Standortbeurteilung mit zu betrachten.

Am Pilotstandort Ketzin, etwa 40 Kilometer westlich von Berlin, wurde bereits 2017 ein Projekt zur Erforschung der geologischen Speicherung von CO₂ in salinen Aquiferen erfolgreich abgeschlossen.⁸²

Auf Bundesebene wird bereits an der Überwindung rechtlicher Hürden zur Speicherung von CO₂ im Ausland gearbeitet. Insbesondere die Ratifizierung des Amendments zum Artikel 6 des London-Protokolls zum Meeresschutz, welches den grenzüberschreitenden Transport von CO₂ zum Zweck der unterirdischen CO₂-Speicherung erlaubt und CCS im Ausland erst möglich macht, wird derzeit vorbereitet.

Die Ratifizierung setzt auch eine Anpassung des innerstaatlichen Rechtsrahmens sowie bilaterale oder multilaterale Vereinbarungen, in denen die Zuständigkeit der beteiligten Länder für Genehmigungen, Monitoring und Umgang mit Leckagen geregelt werden, voraus.

Nordrhein-Westfalen wird sich auf Bundesebene für eine Beschleunigung des Prozesses zur Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen einsetzen und den neuerlichen CCS-Dialog mit der Gesellschaft, der derzeit seitens des BMWi vorbereitet wird, regional unterstützen. Erste Projekte mit dem Ziel der Sensibilisierung und Einbindung der Bevölkerung sind in Nordrhein-Westfalen bereits auf den Weg gebracht (vgl. Kapitel 6).

4.4.4 CO₂-Transport (CCT) als Voraussetzung für CCU und CCS

Sowohl für die Nutzung als auch für die Speicherung von CO₂ ist eine geeignete CO₂-Transportinfrastruktur vonnöten. Der Transport von CO₂ via Schiff oder LKW ist zwar in geringem Umfang möglich – für eine kontinuierliche Abscheidung und Nutzung oder Speicherung von CO₂ im industriellen Maßstab in Nordrhein-Westfalen bedarf es jedoch (auch) einer leitungsgebundenen Infrastruktur.

Im Rahmen des Gesetzes zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (KSpG) kam es insbesondere aufgrund fehlender gesellschaftlicher Akzeptanz nicht zur Genehmigung von großmaßstäblichen Testspeicherstätten, sodass bislang auch keine entsprechende CO₂-Transportinfrastruktur in Deutschland errichtet worden ist.⁸³ Laut der „Langfristszenarien 3“ des BMWi existieren hohe Unsicherheiten bei der zukünftigen Entwicklung einzelner Standorte, insbesondere bei der Umstellung auf neue Verfahren. Die Infrastrukturplanung müsse daher regionale Unterschiede berücksichtigen.⁸⁴ Die Infrastrukturanforderungen zum Umgang mit verbleibenden CO₂-Mengen in einer klimaneutralen Industrie in Nordrhein-Westfalen hat jüngst IN4climate.NRW in einem Diskussionspapier eruiert.⁸⁵

Abbildung 8: Schematischer CO₂-Pipelineinfrastruktur-Entwurf für das Rhein- und Westfalen-Cluster in einer klimaneutralen Industrie in Nordrhein-Westfalen⁸⁶



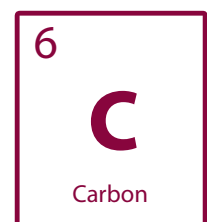
Die Ausgestaltung der dort vorgeschlagenen Pipelineinfrastruktur, die 97 Prozent der gemäß Betrachtung anfallenden CO₂-Mengen abdeckt, orientiert sich an den standortspezifischen CO₂-Mengen, der geografischen Lage der Punktquellen in Abhängigkeit angedachter CCS-Standorte im Ausland sowie an der Möglichkeit alternativer Transportmöglichkeiten.⁸⁷ Die 30 von 50 Standorten, die gemäß Papier mit einer Pipeline verbundenen werden würden, befinden sich vor allem rund um die Kalk- und Zementherstellung im sogenannten Westfalen-Cluster und die großen Chemie- und Stahlstandorte im Rhein-Cluster (vgl. Abbildung 8).

Die dahinterstehende Grundannahme ist, dass ein CO₂-Netz in Nordrhein-Westfalen in erster Linie dort sinnvoll und notwendig ist, wo langfristig unvermeidbare CO₂-Mengen anfallen.⁸⁸

Darüber hinaus müssen im Zuge der zukünftigen Planungsaktivitäten allerdings weitere Aspekte in Betracht gezogen werden. In Bezug auf eine Pipelineinfrastruktur betrifft dies vor allem mögliche, langfristige CCU-Anwendungen in Nordrhein-Westfalen, die in diese Überlegungen bislang nicht eingegangen sind.^{89,90} CCU-Senken in Nordrhein-Westfalen befinden sich größtenteils im Rhein-Cluster. Hier muss eruiert werden, ob die im Rhein-Cluster befindlichen CO₂-Quellen den CCU-Bedarf allein decken können oder ob eine Verbindung zwischen Rhein-Cluster und Westfalen-Cluster hergestellt werden müsste.

Ungeachtet dessen könnte durch eine Verbindung der Rhein- und Westfalen-Cluster vom Chemiepark Marl zu den Zementwerken in Beckum gemäß Diskussionspapier eine erhöhte Flexibilität beim Abtransport des CO₂, wahlweise in Richtung Rotterdam oder Wilhelmshaven, erreicht werden.⁹¹

Darüber hinaus stellt sich die Frage nach der Anbindung temporärer CO₂-Quellen. Dazu zählen erstens Standorte, die perspektivisch klimaneutrale Verfahren einsetzen, in den kommenden zehn bis fünfzehn entscheidenden Jahren jedoch noch erhebliche CO₂-Mengen verursachen werden. Ein Beispiel ist die Stahlherstellung, in der absehbar eine Umstellung auf die Direktreduktions-Route vollzogen werden wird. Bis dahin bleibt die Stahlindustrie aber weiterhin ein großer Emittent. Zweitens stehen hierbei potenzielle Produktionsstandorte von blauem Wasserstoff in der Betrachtung, die von zentraler Bedeutung für den schnellen Start der Wasserstoffwirtschaft in Nordrhein-Westfalen sind, wie in der Wasserstoff-Roadmap NRW dargelegt ist.⁹²



In den weiteren Infrastruktur-Planungsaktivitäten, die gemeinschaftlich von Industrie, Wissenschaft und Politik (Land und Bund) vorangebracht werden sollten, müssen neben technischen Fragestellungen des Transportes daher vor allem folgende Aspekte berücksichtigt werden:

1

→ Standorte mit langfristig unvermeidbarer CO₂-Entstehung in Nordrhein-Westfalen und in Deutschland

Welche CCS-Projekte/Standorte kommen kurz-, mittel- und langfristig infrage?

Welche Bestrebungen haben andere Bundesländer hinsichtlich CCS im Ausland und inwiefern ist das nordrhein-westfälische CO₂-Netz hierfür auszulegen?⁹³



→ Standorte mit langfristigem CCU-Potenzial in Nordrhein-Westfalen, Deutschland und an Nordrhein-Westfalen angrenzenden (Bundes-)Ländern

Welche CCU-Standorte existieren beziehungsweise werden existieren und welche Abnahmemengen sind dauerhaft zu erwarten?

Besteht (heute oder in Zukunft) ein Bedarf zur Belieferung anderer (Bundes-)Länder mit CO₂ als Rohstoff?

2

3

→ Standorte mit temporär unvermeidbarer CO₂-Entstehung in Nordrhein-Westfalen

Sollte hier auf eine Pipelineinfrastruktur gesetzt werden oder sind alternative Transportmöglichkeiten vorzuziehen?

Wie können Stranded Assets und Lock-in-Effekte vermieden werden?

→ Standorte zur Produktion von blauem Wasserstoff in Nordrhein-Westfalen

Sollte hier auf eine Pipelineinfrastruktur gesetzt werden oder sind alternative Transportmöglichkeiten vorzuziehen?

Können Synergien mit Standorten unter Punkt 1 und 2 geschöpft werden, sodass der schnelle Hochlauf von blauem Wasserstoff den Ausbau derjenigen CO₂-Infrastruktur vorantreibt, die langfristig sicher benötigt werden wird?

4

5

→ Infrastrukturplanung auf europäischer Ebene

Welche Aktivitäten mit Bezug zu oder Relevanz für Nordrhein-Westfalen (wie beispielsweise Delta Corridor, PCI Cross-border carbon dioxide network und weitere) werden bereits auf europäischer Ebene verfolgt und wie lässt sich an diese anknüpfen?

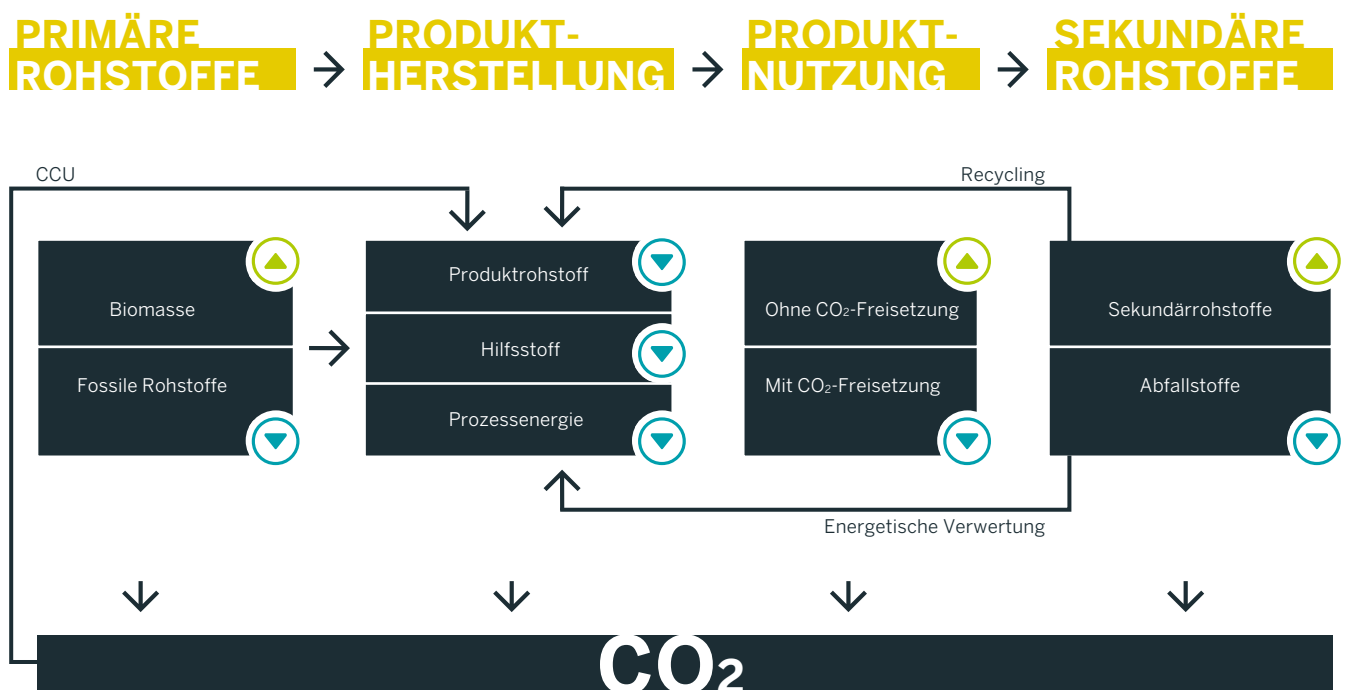
Die Erweiterung der Planungsaktivitäten um diese Aspekte ist in einem nächsten Schritt ebenso zu leisten wie die Prüfung der Umwidmung heutiger Erdgasinfrastrukturen, die als kosteneffiziente Alternative zum Neubau gesehen wird.⁹⁴ Dieselbe Überlegung hinsichtlich des Wasserstoffnetzes hat bereits dazu geführt, dass im Energiewirtschaftsgesetz eine entsprechende Regelung für die Umstellung von Gasversorgungsleitungen für den Transport von Wasserstoff aufgenommen wurde. Durch

den engen Austausch aller beteiligten Akteure bei der Entstehung von Wasserstoffnetzen und einer CO₂-Infrastruktur muss die Entstehung von Konkurrenzsituationen vermieden werden. Diesbezüglich muss auch die Rolle der Netzbetreiber adressiert werden und es müssen Überlegungen hinsichtlich einer gemeinsamen Regulierung mit Gas zwecks Vermeidung prohibitiv hoher Netzentgelte in der Aufbauphase einbezogen werden.

4.5 Fazit: Leitlinien für den nachhaltigen Umgang mit Kohlenstoff in Nordrhein-Westfalen

Ein nachhaltiger Umgang mit einer deutlich reduzierten Menge an Kohlenstoff setzt die fundamentale Veränderung heutiger Produktionsverfahren voraus und impliziert die Veränderung etablierter industrieller Wertschöpfungsnetzwerke.

Abbildung 9: Angestrebte Entwicklungstendenz der industriellen Rohstoffnutzung in Nordrhein-Westfalen



→ In Bezug auf den Einsatz primärer Rohstoffe muss der Anteil der fossilen Rohstoffe schnell und kontinuierlich zurückgefahren werden. Mit Blick auf die heutige Bedeutung der fossilen Rohstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle hinsichtlich der verschärften gesetzlichen Klimaschutzanforderungen müssen sich die Reduktionspfade zunehmend stark degressiv entwickeln.

→ Vor allem die benötigte Prozessenergie sollte möglichst kohlenstofffrei, das heißt aus Wind- und Sonnenenergie, bezogen werden. Restinventare an Kohlenstoff aus der Nutzung von Mineralöl werden gegebenenfalls für stoffliche Nutzungen (zum Beispiel in der chemischen Industrie) auch längerfristig verbleiben.

- Biomasse ist nur begrenzt verfügbar. Auch wenn Biomasse als klimaneutraler Primärrohstoff zu verstehen ist, deren Einsatz perspektivisch auch die Möglichkeit der Erzeugung negativer Emissionen (BECCS) bietet, sollte deren Nutzung dementsprechend nur gezielt und möglichst kaskadiert erfolgen.
- Die Rohstoffbasis muss künftig viel stärker auf Sekundärrohstoffen basieren. Bei Abfällen muss der Anteil an Stoffen, die als Sekundärrohstoffe genutzt werden, gegenüber denjenigen, die energetisch verwertet werden, gesteigert werden. Abfälle sollten möglichst energetisch verwertet und nicht auf Deponien gelagert werden, da es hier zur Entstehung nicht unerheblicher Mengen von Methan, das ungenutzt in die Atmosphäre entwindet, kommt.⁹⁵
- Auch CO₂ sollte nach Möglichkeit und unter Berücksichtigung der oben angeführten Kriterien einer Nutzung zugeführt werden und die Rohstoffbasis zusätzlich erweitern.
- Neben der Verwendung alternativer Kohlenstoffe muss die Kohlenstoffintensität in der Produktion insgesamt verringert werden. Der Einsatz kohlenstoffarmer und kohlenstofffreier Substitute für Produkte und Verfahren ist sukzessive auszuweiten.
- Grundsätzlich ist bei der Wahl des Wertschöpfungspfades zu beachten, dass die CO₂-Bilanz mindestens ebenso gut sein muss wie die des besten konventionellen Pfades.⁹⁶
- Hinsichtlich der CO₂-Entstehung über den Wertschöpfungspfad gilt zudem, dass die während der Produktnutzung entstehenden Mengen als deutlich unvorteilhafter zu bewerten sind als solche, die während der Herstellung entstehen, da an Punktquellen die Möglichkeit besteht, CO₂ verhältnismäßig effizient abzuscheiden.
- Produkte, die in großem Umfang eingesetzt werden und bei deren Nutzung CO₂ unmittelbar emittiert wird, sollten – wenn möglich – vorwiegend aus Biomasse beziehungsweise aus grünem CO₂ hergestellt werden, sodass die Klimabilanz der Produktnutzung neutral ist. Dies betrifft insbesondere die Produktgruppe der synthetischen Kraftstoffe.

6

C

Carbon




05

56–69

Branchenfokus: Chemie und Zement



Besonders im Fokus stehen die Branchen Chemie und Zement. Kohlenstoff ist hier nicht wegzudenken. Trotzdem könnte die chemische Industrie perspektivisch zu einer CO₂-Senke werden. Die Zementindustrie hingegen wird auch langfristig überschüssige unvermeidbare CO₂-Mengen produzieren und wird auf CCS angewiesen sein, um klimaneutral zu werden.



5.1 Carbon Management in der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen

Nordrhein-Westfalen ist der bedeutendste Chemiestandort Deutschlands und liegt gemessen am Umsatz EU-weit auf Rang 5 sowie weltweit auf Rang 14.⁹⁷ Über 97.000 Beschäftigte arbeiteten 2019 in den 455 Chemiebetrieben des Landes Nordrhein-Westfalen. Viele davon sind räumlich gebündelt in Chemieparks angesiedelt, die ideale Voraussetzungen für die Schöpfung von Synergien bieten. Im Bereich der Kunststoffe weist Nordrhein-Westfalen die größte Vielfalt an Wertschöpfungsketten aller Produktionscluster innerhalb Europas auf. Doch wenngleich die chemische Industrie in Nordrhein-Westfalen hetero-

gen aufgestellt ist und über ein breites Produktportfolio verfügt, basieren beinahe alle Wertschöpfungsketten auf rohstofflich eingesetzten Kohlenwasserstoffen. Für die chemische Industrie ist Kohlenstoff somit von zentraler Bedeutung. Herausforderungen im Zuge der Transformation bestehen sowohl darin, vermeidbare CO₂-Mengen auf null zu reduzieren und Lösungen für den klimaneutralen Umgang mit unvermeidbaren CO₂-Mengen zu finden, als auch den weiter bestehenden Kohlenstoffbedarf in einer klimaneutralen Wirtschaft möglichst ohne fossile Rohstoffe zu decken.

455 Chemiebetriebe
existieren in Nordrhein-Westfalen mit über 97.000 Beschäftigten.

Handlungsoptionen und erforderliche Rahmenbedingungen für die chemische Industrie in Nordrhein-Westfalen

Laut der 2019 veröffentlichten Roadmap Chemie 2050 des Verbands der Chemischen Industrie (VCI) sind für eine nahezu vollständige Reduktion der Treibhausgasinvestitionen in Höhe von 68 Milliarden Euro erforderlich. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, müssen CO₂-einsparende Technologien bereits eingeführt werden, bevor ihr Einsatz wirtschaftlich ist.⁹⁸ Den VCI-Szenarien liegen dabei noch die ursprünglichen Klimaschutzziele (Treibhausgasneutralität 2050) zugrunde. Angesichts der verschärften Klimaschutzziele (Treibhausgasneutralität 2045) werden die Investitionen, von denen gemäß Roadmap ein Großteil erst ab 2040 fällig gewesen wäre, nun noch früher benötigt. Messbare Effekte erst in den 40er Jahren kämen angesichts dessen deutlich zu spät.

Die chemische Industrie ist eine der energie- und emissionsintensivsten Branchen in Deutschland. Und sie steht im starken internationalen Wettbewerb. Die Umstellung von fossilen Produkten auf ihre erneuerbaren Alternativen erfordert einen wesentlich höheren Energieeinsatz, der durch erneuerbare Energien gedeckt werden muss. Der Strombedarf der deutschen chemischen Industrie betrug im Jahre 2019 etwa 54 Terrawattstunden. Bei einer klimaneutralen Wirtschaftsweise im Jahre 2050 wird sich dieser Bedarf durch den Einsatz neuer, innovativer Verfahren, erneuerbarer Energien und grünem Wasserstoff Studien zufolge mehr als verzehnfachen haben und 628 Terrawattstunden⁹⁹ betragen.

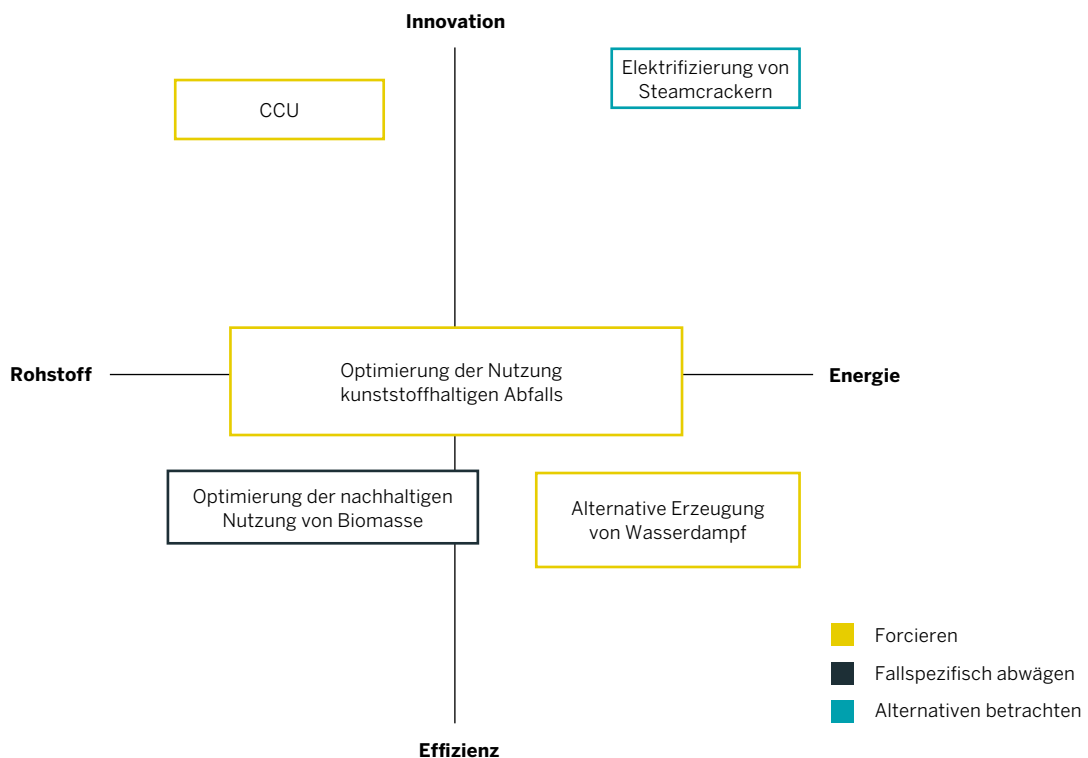
Zum Vergleich: Der gesamte Bruttostromverbrauch in Deutschland im Jahre 2020 lag bei knapp 552 Terrawattstunden.¹⁰⁰ Die Herausforderung liegt nicht allein in der Verfügbarkeit, sondern auch in der Wirtschaftlichkeit dieser enormen Strommengen: Die Strompreise für Industriekunden in Deutschland liegen im weltweiten Vergleich in der Spitzengruppe.

Um die Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie und vieler anderer energieintensiver Branchen in Nordrhein-Westfalen zu erhalten, sind politische Reformen insbesondere auch mit Blick auf das Steuer-, Abgaben- und Umlagensystem erforderlich. Da Investitionen allerdings so früh wie möglich erfolgen müssen, um die neuen Klimaschutzziele zu erreichen, werden für einen Über-

gangszeitraum zudem geeignete Fördermechanismen, die sowohl Capex- als auch Opex-Kosten adressieren, benötigt.

Im Fokus der Transformation der chemischen Industrie stehen derzeit die in Abbildung 10 dargestellten Ansätze. Diese sind in der Regel entweder auf Effizienzsteigerung oder auf Innovation ausgerichtet und adressieren wiederum entweder überwiegend rohstoffliche oder energetische Aspekte. Eine Ausnahme stellt die Optimierung der Nutzung kunststoffhaltigen Abfalls dar, welche alle vier Aspekte des unten dargestellten Schaubilds bedient. Dies unterstreicht die enorme Bedeutung der Kreislaufwirtschaft für die chemische Industrie.

Abbildung 10: Ansätze zur klimaneutralen Transformation der chemischen Industrie (schematische Darstellung)

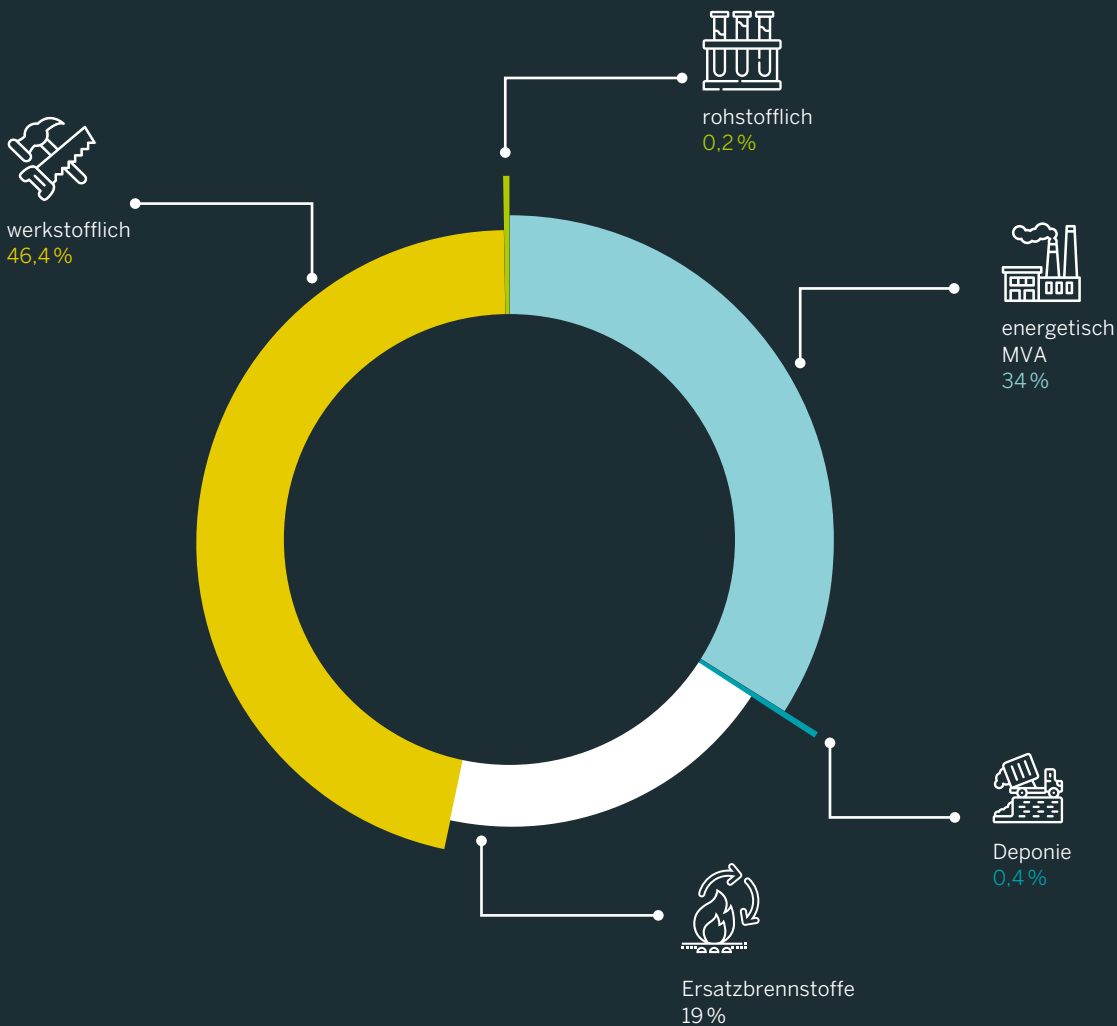




5.1.1 Optimierung der Nutzung kunststoffhaltigen Abfalls: Die No-regret-Option

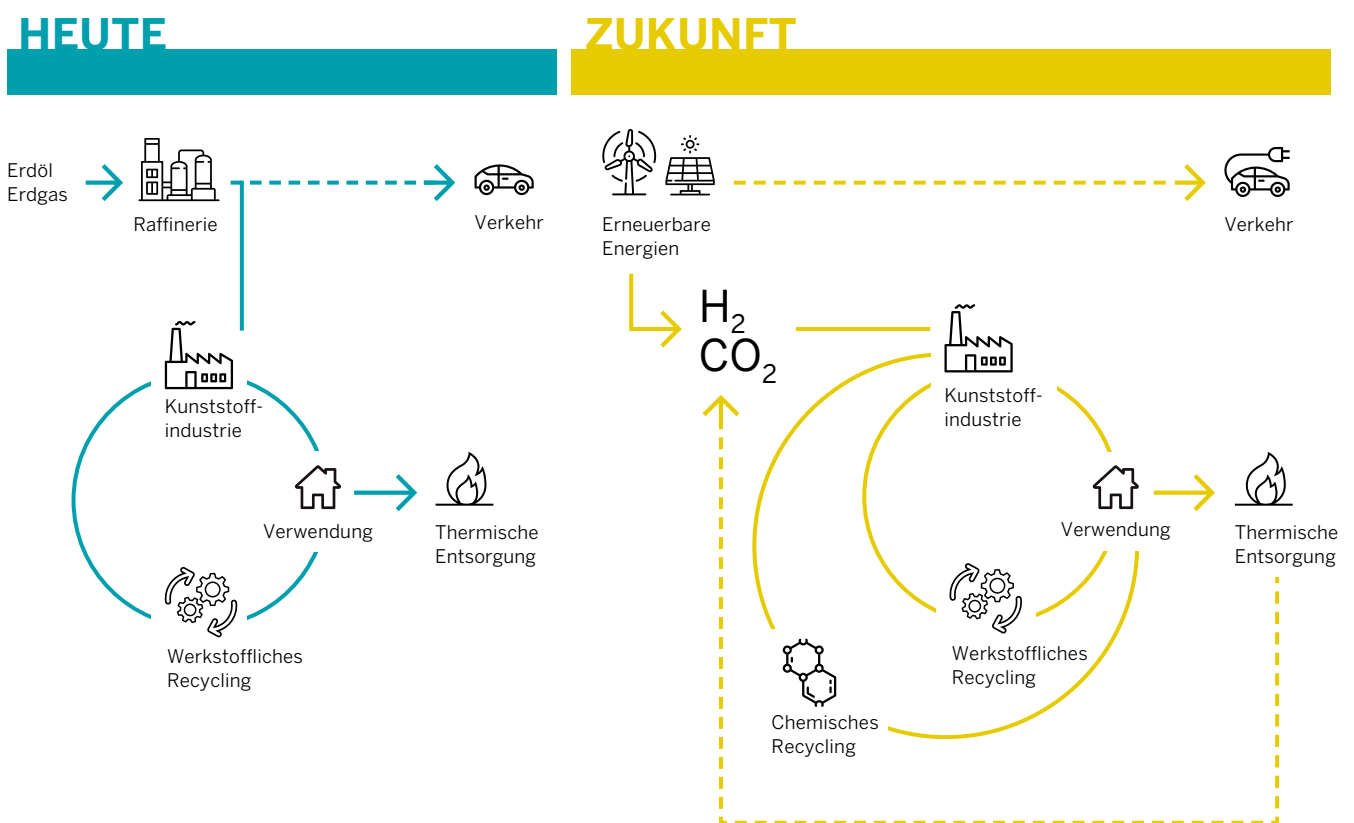
Schon heute werden die 6,28 Millionen Tonnen¹⁰¹ jährlich in Deutschland anfallenden Kunststoffabfälle nahezu vollständig (zu 99,6 Prozent) weiterverwertet.¹⁰² Um die bestmögliche Nutzung des kunststoffhaltigen Abfalls zu erreichen, müssen die Verwertungsstufen jedoch zukünftig optimiert werden. Denn nur knapp 47 Prozent der verwerteten Abfälle werden aktuell recycelt. Über die Hälfte (53 Prozent) der anfallenden Kunststoffe wird hingegen energetisch verwertet. Diese kommen entweder in Müllverbrennungsanlagen oder als Ersatzbrennstoffe zum Einsatz (vgl. Abbildung 11).¹⁰³

Abbildung 11: Verwertung von in Deutschland anfallenden Kunststoffen, inklusive Verwertung in anderen Ländern¹⁰⁴



Bei der energetischen Verwertung werden die Kohlenstoffverbindungen in kleine Moleküle zersetzt und stehen dem stofflichen Kreislauf damit nicht mehr ohne weiteres zur Verfügung. Zudem ist eines der entstehenden Moleküle das klimaschädliche CO_2 . Ziel muss daher sein, dass die energetische Verwertung der Restabfälle als letzte Verwertungsstufe letztlich nur noch zum Ausschleusen von Schadstoffen genutzt wird. Zudem sollte die energetische Verwertung möglichst mit der Abscheidung des CO_2 verknüpft werden (vgl. Abbildung 12).¹⁰⁵

Abbildung 12: Circular Economy in der Kunststoffindustrie¹⁰⁶



Die stoffliche Verwertung hingegen, das Recycling, sollte maximal ausgeweitet werden, da bei diesem Verfahren die Strukturen der Werkstoffe (Polymere, Monomere, Kohlenwasserstoffe) erhalten bleiben. Die werkstoffliche Verwertung (mechanisches Recycling) sollte dabei – wenn möglich – Vorrang vor dem chemischen Recycling haben.

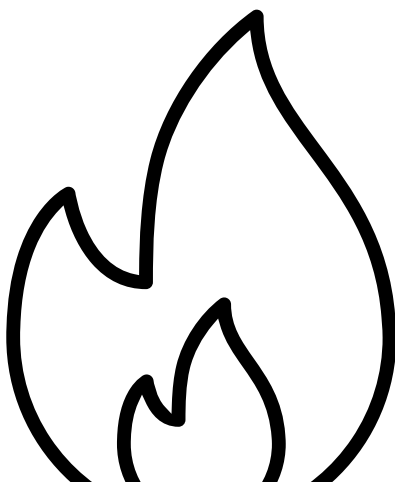
Das chemische Recycling von Kunststoffen, beispielsweise durch Pyrolyse, kann auch zu Fraktionen führen, die nicht als Rezyklat in der Kunststoffherstellung, aber zum Beispiel für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen verwendet werden können. Solche Synergien gilt es zu identifizieren und bei der Entwicklung der Verfahren zu berücksichtigen, um auch hier alle (Neben-) Erzeugnisse als Sekundärrohstoffe weiterzuverwenden.

Um Potenziale, die in der optimierten Verwertung liegen, zu heben, sind neue Technologien erforderlich. Das Investitionsrisiko ist hierbei vergleichsweise gering, da die stoffliche Kreislaufführung und Nutzung von Sekundärrohstoffen eine No-regret-Option darstellt, deren Potenziale in jedem Fall gehoben werden müssen. Zudem ist mit der Umstellung auf Sekundärrohstoffe gerade beim mechanischen Recycling nicht selten eine Energieeinsparung gegenüber der Primärproduktion verbunden, weshalb auch hier im Vergleich zu vielen anderen, vor allem hochinnovativen Technologien, kein erhöhtes Betriebskostenrisiko entsteht. Um die Verwertungsstufen von kunststoffhaltigen Abfällen zu optimieren, muss dennoch zugleich eine Anrechnung des chemischen Recyclings in der Recyclingquote im Verpackungsgesetz möglich werden. Dazu sollte die Industrie vorbereitend zunächst transparente Lebenszyklusanalysen veröffentlichen, die die Bilanzierung und Ableitung geeigneter Kriterien und Maßstäbe für die Anrechnung ermöglichen.

Um eine Optimierung der Verwertungsstufen zu ermöglichen, muss auch die Sammelquote betrachtet werden. Hier sollte eine Ausweitung der Herstellerverantwortung überlegt werden, die sich derzeit nur auf Verpackungen bezieht. Erweiterte Rücknahmesysteme für Kunststoffprodukte könnten hier sinnvoll sein. Aber auch neue Geschäftsmodelle und privatwirtschaftliche Rücknahmesysteme werden benötigt. Hier ist die Industrie im Bereich Geschäftsmodellinnovation gefragt und sollte anstreben, noch stärker wertschöpfungsstufenübergreifend zu agieren und zusammenzuarbeiten.

Nur insgesamt rund 1,95 Millionen Tonnen (also nur knapp ein Drittel) der deutschen Kunststoffabfälle werden auch in Deutschland als Rezyklat eingesetzt, der Rest im Ausland.¹⁰⁷ Auch wenn in Deutschland insgesamt mehr Kunststoffabfälle importiert als exportiert werden,¹⁰⁸ müssen Qualität und Verwertungspotenziale der Importe denen der Exporte gegenübergestellt werden:

- Könnten exportierte Abfälle, die im Ausland verwertet werden, in Deutschland noch stofflich genutzt werden?
- In welchem Maße werden Importe stofflich, in welchem Maße energetisch eingesetzt?



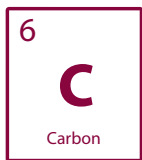


5.1.2 Optimierung der nachhaltigen Nutzung von Biomasse: Ein Einzelfallentscheid

Der nachhaltigere Einsatz von Biomasse ist ökobilanziell betrachtet in der Regel mindestens klimaneutral, in manchen Anwendungen sogar klimapositiv, beispielsweise wenn Biomasse zur Herstellung biobasierter Kunststoffe verwendet wird. Auch wenn diesen gegenüber fossilen Kunststoffen ein Klimaschutzpotenzial zugesprochen wird, schneiden sie in anderen Ökologiekriterien, wie dem Wasserverbrauch, schlechter ab.

Vorteile könnten aber darin liegen, Biomasse in der Spezialchemie zu nutzen. Hier könnten die besonderen Eigenschaften von Biomasse gezielt zur Herstellung von Spezialchemikalien genutzt werden, statt diese bei der Nutzung als Kohlenstoffquelle für Basischemikalien und auch für Biokraftstoffe zu zerstören.

Ein anderer Ansatz ist die kaskadierte Nutzung, etwa in Bioraffinerien, in welchen Biomasse für die nachhaltige Erzeugung eines ganzen Spektrums unterschiedlicher (Zwischen-)Produkte der chemischen Industrie genutzt und erst nach Ausschöpfung dieser Potenziale energetisch für Strom, Wärme und Kraftstoffe verwendet wird (vgl. Abbildung 13).



„Eine Bioraffinerie zeichnet sich durch ein explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept aus, das Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Zwischenprodukte und Produkte (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie inkl. Biokraftstoffe) unter möglichst vollständiger Verwendung aller Rohstoffkomponenten nutzt.“¹⁰⁹

Bundesregierung

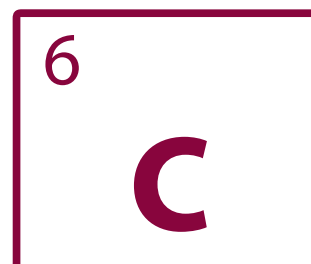
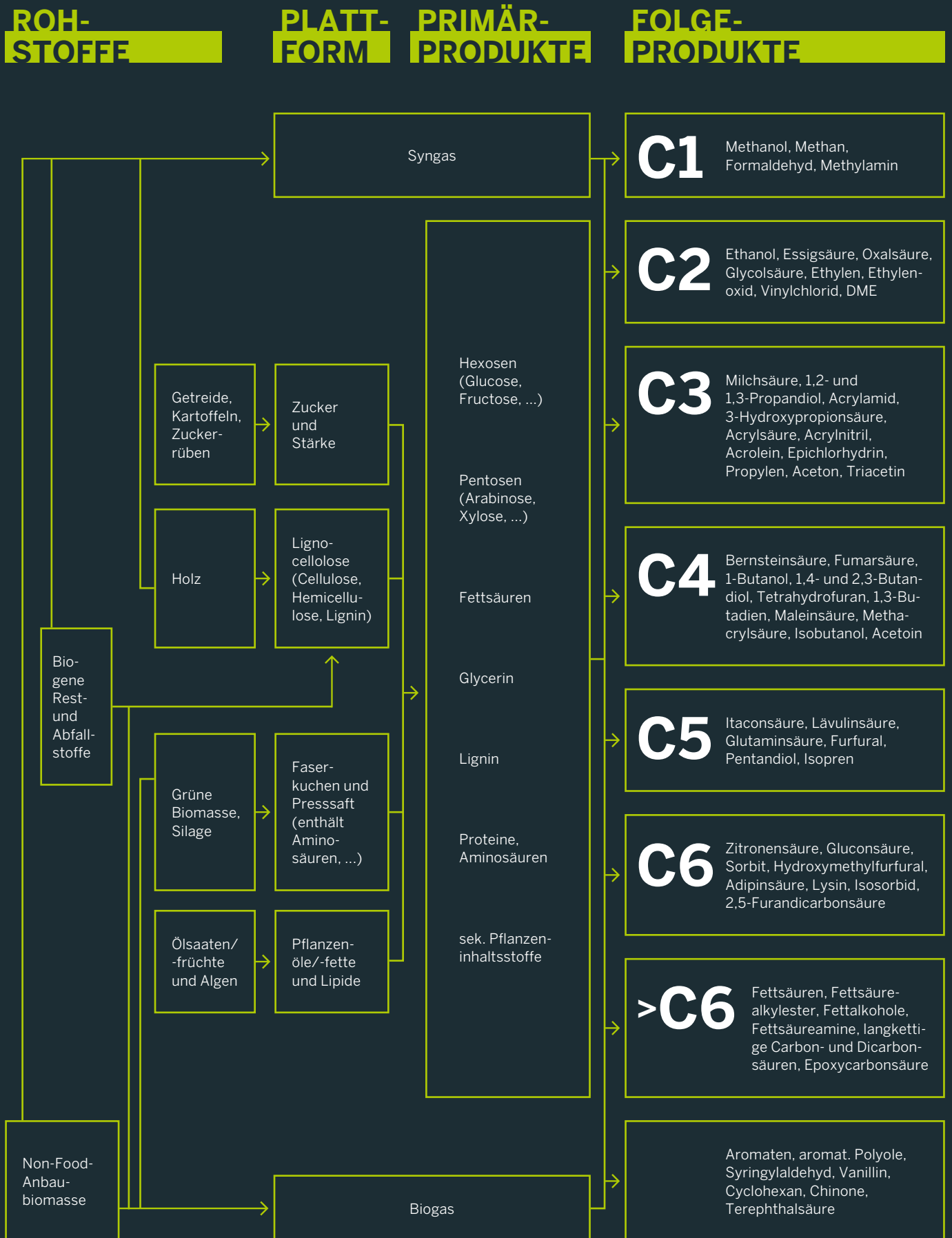


Abbildung 13: Produkte von Bioraffinerien (Auswahl)¹¹⁰



Das Problem des tatsächlich nachhaltigen Einsatzes von Biomasse ist jedoch (sowohl aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und potenziellen Konkurrenzsituation als auch in Hinblick auf logistische Aspekte) äußerst komplex. Für eine ganzheitliche Bewertung muss dieser daher spezifisch nach Produkt, Produktionsverfahren, Anbau, Behandlung und Nutzungsdauer bewertet werden.¹¹¹ Der Biomasseeinsatz ist insgesamt sehr kontrovers und keine breite Lösung für die Chemie.



5.1.3 CCU: Neue Wertschöpfungspotenziale auf Basis von CO₂ erschließen

CO₂ ist ein aussichtsreicher alternativer Rohstoff für die chemische Industrie. Bei einer weitestgehenden Umstellung des heutigen Produktportfolios der chemischen Produktion in Nordrhein-Westfalen auf CO₂-basierte Herstellungspfade würden 50 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr benötigt werden, um den rohstofflichen Kohlenstoffbedarf zu decken.¹¹² Dies entspricht in etwa der Menge, die der Sektor Industrie im Jahr 2019 emittiert hat (ca. 51 Millionen Tonnen).¹¹³ Diese CO₂-Mengen werden sich zukünftig durch Energieeffizienzmaßnahmen und Innovationen weiter verringern, sodass Szenarien zufolge 7 bis 35 Millionen Tonnen durch die nordrhein-westfälische Industrie verursachte Restemissionen verbleiben.¹¹⁴ Demgegenüber steht insbesondere im Zuge der Einführung synthetischer Kraftstoffe ein großes Potenzial zur Steigerung der benötigten CO₂-Mengen.¹¹⁵

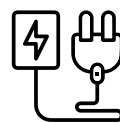
Auch wenn nicht alle Herstellungspfade auf CO₂ umgestellt werden, da andere Wertschöpfungspfade (zum Beispiel die Verwendung von Kunststoffzyklat) ökologisch und ökonomisch vorteilhafter sind, wird die chemische Industrie voraussichtlich zum größten Abnehmer von CO₂-Mengen in Nordrhein-Westfalen werden und den CCS-Bedarf erheblich schmälern können. Die chemische Industrie könnte somit von einer CO₂-Quelle zu einer CO₂-Senke werden. Voraussetzungen dafür sind allerdings – sofern fossile CO₂-Mengen genutzt werden – Produkte, die CO₂ langfristig chemisch binden, sowie die Sicherstellung geschlossener Stoffkreisläufe.

Für die vorrangigen CO₂-Verwertungswege ist die Verfügbarkeit von klimaneutralem Wasserstoff, wie oben dargestellt, eine Grundvoraussetzung. Zudem ist Wasserstoff der Energieträger der Wahl für heute fossil gefeuerte Prozesse, bei denen eine Elektrifizierung nicht möglich ist.

Klimaneutraler Wasserstoff wird im Wesentlichen importiert werden müssen, um CCU-Anwendungen in der chemischen Industrie zu skalieren.

Laut wissenschaftlicher Begleitstudie des Forschungszentrums Jülich zur Wasserstoff-Roadmap NRW¹¹⁶ werden in 2050 nur etwa 18 Terrawattstunden der insgesamt benötigten 104 Terrawattstunden hier vor Ort erzeugt werden.

Nordrhein-Westfalen wird somit eine Importquote von knapp 90 Prozent haben, welche deutlich über der bundesweiten Importquote von 70 Prozent zur Deckung der bundesweit benötigten 900 Terrawattstunden pro Jahr liegt. Der Import von blauem Wasserstoff nach Deutschland wird in den Jahren 2030 bis 2040 eine wichtige Brückentechnologie bis zum Import ausreichender Mengen grünen Wasserstoffs darstellen. Mit etwa 50 Prozent des benötigten Wasserstoffbedarfs für ganz Deutschland lässt sich gemäß der Studie in 2050 ein erheblicher Anteil ökonomisch effizient inländisch herstellen.



5.1.4 Elektrifizierung von Steamcrackern: Zunächst kein geeigneter Lösungsansatz

Steamcracker, in denen bei Temperaturen von etwa 850 Grad Celsius Kohlenwasserstoffe in Olefine und Aromaten aufgespalten werden, sind zentral für die Herstellung von Basischemikalien. Da die hohen Temperaturen bis dato durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe erreicht werden, stellen sie jedoch eine der größten CO₂-Quellen in der gesamten petrochemischen Wertschöpfungskette dar. Die künftige Entwicklung der Steamcracker hat einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der verbleibenden CO₂-Mengen in Nordrhein-Westfalen und machen je nach Szenario bis zu 60 Prozent dieser CO₂-Mengen aus.¹¹⁷ Die elektrische Beheizung der Steamcracker mit erneuerbarem Strom bietet das Potenzial, diese CO₂-Entstehung zu vermeiden. Der Strombedarf wäre jedoch enorm.

7 Terrawattstunden Strom pro Jahr wären Szenarien von SCI4climate.NRW zufolge allein für die Elektrifizierung der beiden Steamcracker in Gelsenkirchen erforderlich, die etwa ein Viertel der Steamcracker-Produktionskapazität in Nordrhein-Westfalen abdecken. Insgesamt würde somit in Nordrhein-Westfalen ein zusätzlicher Strombedarf von etwa 28 Terrawattstunden entstehen. Zum Vergleich: Der gesamte Nettostromverbrauch in Nordrhein-Westfalen lag 2018 bei circa 120 Terrawattstunden (entsprechend 437.597 Terajoule¹¹⁸).

7 Terrawattstunden Strom pro Jahr wären für die Elektrifizierung der beiden **Steamcracker in Gelsenkirchen** nötig.

Hinzu kommt, dass konventionelle Cracker in der Regel zu 100 Prozent aus Restchemikalien beheizt werden, die bei der Aufspaltung übrigbleiben. Um durch die Elektrifizierung der Steamcracker einen positiven Klimaeffekt zu erzielen, müssten diese Restfraktionen künftig stofflich genutzt werden. Methan und Wasserstoff aus der leichten Gasfraktion könnten laut SCI4climate.NRW für die Methanolherstellung genutzt, die übrigen kohlenstoffhaltigeren Fraktionen könnten mittels Gasifizierung zu synthetischen Kraftstoffen verarbeitet werden, wobei die Emissionen im letzteren Fall im Grunde nur in die Nutzungsphase verlagert würden.

Von einer strom- und wasserstoffintensiven Elektrifizierung der Steamcracker sollte somit zunächst abgesehen werden – auch weil das CO₂ sehr konzentriert an wenigen Standorten anfällt und damit vergleichsweise leicht aufgefangen werden kann. Die Abscheidung und Speicherung oder Nutzung des entstehenden CO₂ – zum Beispiel

zur Herstellung von synthetischem Naphtha – wären daher nach jetziger Einschätzung einer Elektrifizierung vorzuziehen.



5.1.5 Alternative Erzeugung von Wasserdampf: Die Low Hanging Fruit

In der chemischen Industrie wird sehr viel Dampf erzeugt, sowohl zum Heizen von Prozessen als auch für entsprechende Antriebe. Hier können anstelle von fossilen Energieträgern künftig Wärmepumpen zum Einsatz kommen, in welchen Abwärme, die sich auf einem niedrigen Temperaturniveau befindet, durch Zufuhr von elektrischer Energie auf ein höheres Temperaturniveau – bis hin zur Verdampfung – gebracht werden kann. Auch solche Potenziale gilt es zu heben.

5.2 Carbon Management in der Zementindustrie in Nordrhein-Westfalen

Die Zementindustrie ist mit jährlich 2,8 Milliarden Tonnen CO₂ für circa 8 Prozent der gesamten weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich.¹¹⁹ Der aus Zement, Wasser und Gesteinskörnung zusammengemischte Beton gehört zu den wichtigsten Baustoffen der Welt. Ob in Hoch- und Wohnungsbau (unter anderem Keller, Dächer, Brand- und Schallschutz), Ingenieurbau (unter anderem Brücken, Parkhäuser), Straßenbau (unter anderem Autobahnen, Radwege, Tunnel) oder Wasser-/Abwasserbau (unter anderem Talsperren, Abwasserkanäle) – Beton und der darin enthaltene Zement sind allgegenwärtig.

Die Zementindustrie in Nordrhein-Westfalen beschäftigt mehr als 1.500 Menschen in insgesamt 16 Werken.¹²⁰ Zehn der nordrhein-westfälischen Werke verfügen über eine eigene Klinkererzeugung und sind damit für den Großteil der CO₂-Emissionen der nordrhein-westfälischen Zementindustrie in Höhe von knapp 10 Millionen Tonnen jährlich verantwortlich.

16 Zementwerke
in **Nordrhein-Westfalen** beschäftigen
über **1.500 Menschen**.

Handlungsoptionen und erforderliche Rahmenbedingungen für die Zementindustrie in Nordrhein-Westfalen

Zement wird maßgeblich aus Kalkstein hergestellt, der in Steinbrüchen gewonnen und anschließend zu Zementklinker gebrannt wird. Beim Brennprozess wird das Rohmaterial auf 1.450 Grad Celsius erhitzt. Dabei wird prozess- und brennstoffbedingt CO₂ freigesetzt. Das prozessbedingte CO₂ entsteht bei der Kalzinierung des Kalksteins zu Branntkalk, einer Vorstufe des Zementklinkers.¹²¹ Zement ist als Baustoff kaum substituierbar. Die Zementbranche klimaneutral zu gestalten, stellt daher eine große Herausforderung dar. Dennoch ist es in den

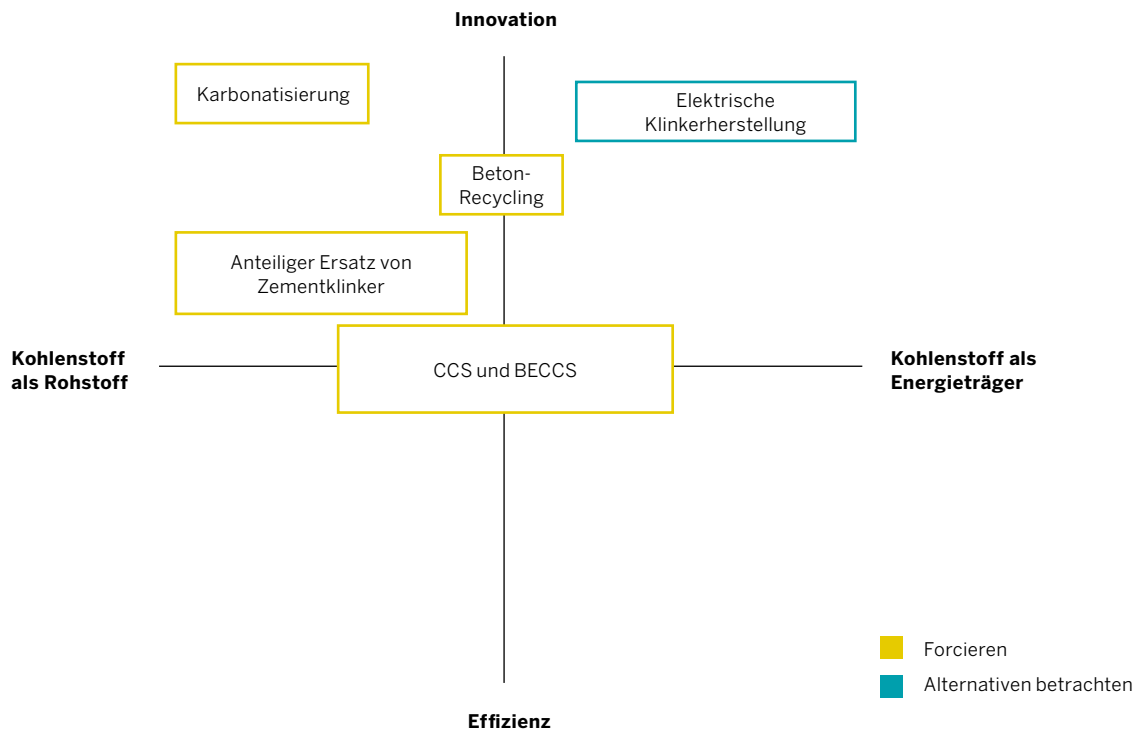
vergangenen 30 Jahren gelungen, die CO₂-Emissionen der deutschen Zementherstellung um etwa 25 Prozent zu reduzieren. Dabei waren zwei Faktoren entscheidend: die Senkung der Klinkergehalte im Zement und der verstärkte Einsatz biomassehaltiger alternativer Brennstoffe. Für die Transformation zur Klimaneutralität ist dies allerdings nicht ausreichend. Dazu bedarf es neben neuen effizienteren Rohstoffen auch neuer Technologien.¹²² Besonders die in Abbildung 14 dargestellten Ansätze stehen zurzeit im Fokus.

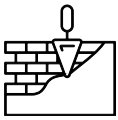
Für deren Umsetzung bedarf es eines geeigneten wirtschaftlichen und politischen Rahmens, der eine wettbewerbsfähige Produktion zunehmend CO₂-ärmerer Zemente und Betone in Deutschland ermöglicht und zusätzlich Märkte für diese Produkte fördert. Hierzu zählt die zügige Produktnormung neuer Zementarten wie auch die Erhöhung der Nachfrage nach Baustoffen aus Recyclingmaterial, beispielsweise durch öffentliche Baumaßnahmen. Zugleich bedarf es aber auch der Mitwirkung der gesamten Wertschöpfungskette (einschließlich Anlagenbau, Betonhersteller, bauausführende Industrie, Planer

und Architekten) sowie der gesellschaftlichen Akzeptanz für infrastrukturelle Maßnahmen, die den Transport von erneuerbarem Strom, Wasserstoff und auch des CO₂ ermöglichen.¹²³

Wesentlich ist aufgrund des nicht vollständig substituierbaren Zementklinkers und begrenzter Recyclingmöglichkeiten jedoch auch, dass die Voraussetzungen für CCU und CCS geschaffen werden, ohne die die Zementindustrie nicht klimaneutral werden können.

Abbildung 14: Ansätze zur klimaneutralen Transformation der Zementindustrie (schematische Darstellung)





5.2.1 Anteiliger Ersatz von Zementklinker: Entwicklung neuer Zemente vorantreiben

Die ökologische Nachhaltigkeit der Zementproduktion lässt sich durch den anteiligen Austausch von CO₂-belastetem Zementklinker durch geeignete Substitute signifikant steigern. Derzeit werden unter anderem Schlacken, die in der Stahlindustrie entstehen, und Steinkohleflugaschen, die bei der Rauchgasreinigung in Steinkohlekraftwerken anfallen, als anteiliger Ersatz für Zementklinker eingesetzt. Im Hinblick auf den Kohleausstieg sowie die Transformation der Stahlherstellung zur wasserstoffbasierten Direktreduktion und die Erweiterung der Sekundärstahlroute (Elektrostahlroute) fallen sowohl Steinkohleflugaschen als auch Hochofenschlacken zukünftig weg. Die Zementindustrie steht somit vor der Herausforderung, neue, nachhaltige Substitutionsmöglichkeiten zu erschließen und den Klinker-Zementfaktor möglichst zu verringern. Zugleich liegt darin die Chance, neuartige, innovative Zemente auf den Markt zu bringen, mit welchen die effiziente Nutzung von Zementklinker und verfügbarer Zuschlagstoffe dauerhaft sichergestellt wird.

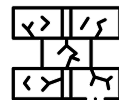
Untersucht wird bereits der Einsatz der neuen Nebenprodukte, wie beispielsweise von in der Sekundärstahlroute anfallenden Elektroofenschlacken.¹²⁴ Daneben kann auch Klärschlamm als Zuschlagstoff bei der Zementherstellung eingesetzt werden.¹²⁵ Eine interessante Alternative bietet darüber hinaus calcinierter Ton. Dieser weist nicht nur einen geringeren CO₂-Footprint auf als Zement, sondern der Marktpreis ist – obwohl es sich um einen Primärrohstoff handelt – aufgrund des großen Vorkommens relativ gering. Die Substitution von einem Viertel Zementklinker durch calcinierten Ton würde Unternehmen der tonverarbeitenden Industrie in Nordrhein-Westfalen zufolge zu einer Reduktion der CO₂-Entstehung um etwa 15 Prozent führen.



5.2.2 Beton-Recycling: Mittels Innovation Recyclingpotenziale erschließen

Um neuen aktiven Zement aus Altbeton zu gewinnen, ist die Trennung des Altbetons in Zementstein, Sand und Gesteinskörnung notwendig. Durch einen teilweisen oder vollständigen Ersatz des Zements durch reaktivierten Zementstein im Beton könnten der Energiebedarf und die damit einhergehende Menge an CO₂-Emissionen Untersuchungen des Instituts für Materialwissenschaften der Universität Duisburg-Essen zufolge um 76 bis 94 Prozent reduziert werden.

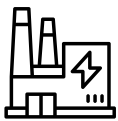
Um geeignete Prognosen für die Reaktivierung und damit die Qualität des späteren Produktes bei verschiedenen Betonzusammensetzungen geben zu können, müsse unter anderem noch untersucht werden, welche unterschiedlichen Prozesse während der Wärmebehandlung jeweils gewinnbringend sind. Daneben gilt es, logistische Hürden, die aus der mengenmäßig begrenzten Transportfähigkeit des Abbruchmaterials resultieren, zu überwinden, um eine Skalierung zu ermöglichen.



5.2.3 Karbonatisierung: Langfristige Bindung von CO₂ als Ergänzung zu CCS

Unter Karbonatisierung mineralischer Rohstoffe wird die exotherme Reaktion von CO₂ mit Metalloxiden unter Bildung von Karbonaten verstanden. Karbonatisierungen sind als natürliche Prozesse in Gesteinsformationen bekannt und finden in geologischen Zeiträumen von mehreren Tausend Jahren statt. Bei der technischen Umsetzung der Karbonatisierung von mineralischen Rohstoffen wird abgeschiedenes CO₂ mit bergmännisch abgebauten Gesteinen oder geeigneten industriellen Rückständen (wie Schlacken, Aschen, Flugaschen oder Baurestmassen) in Reaktion gebracht, wobei Karbonate und zum Teil weitere, die Wirtschaftlichkeit erhöhende Wertstoffe (wie Eisen- oder Siliciumoxid) entstehen. Dabei wird für die Umsetzung von einem Kilogramm CO₂ etwa die zwei- bis dreifache Menge an Gestein oder Rückständen benötigt. Auch wenn die Mengen an natürlichen Gesteinen und industriellen Rückständen begrenzt sind und deren Einsatz zur Karbonatisierung mit alternativen Verwertungsverfahren konkurriert,¹²⁶ wird das weltweite Marktpotenzial für karbonatisierte Baustoffe auf 1 bis 5 Milliarden Tonnen pro Jahr geschätzt.¹²⁷

Vor allem aus Klimaschutzgesichtspunkten ist dieser Verwertungsweg aufgrund der langfristigen mineralischen Bindung des CO₂ äußerst attraktiv. Die Karbonatisierung stellt somit eine Option zur Nutzung und zur dauerhaften Speicherung von CO₂ jenseits von CCS dar. Zudem wird im Gegensatz zur CO₂-basierten Synthese, beispielsweise von Kraftstoffen, für diesen Reaktionspfad keine Energiezufuhr benötigt. Ansätze zur direkten Karbonatisierung ohne vorherige Abscheidung des CO₂ sind energetisch und logistisch betrachtet besonders günstig. Eine Skalierung über den Pilotmaßstab hinaus ist bislang allerdings noch nicht gelungen. Das Potenzial der Karbonatisierung liegt daher nach Schätzungen des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ) aus heutiger Sicht nur im Bereich von circa 5 Prozent Anteil am gesamten CCS-Bedarf der Zementindustrie. Dennoch könne die Karbonatisierung eine sinnvolle Ergänzung zu CCS sein, die perspektivisch mit fortschreitender Entwicklung auch größere Effekte haben könnte.



5.2.4 Elektrische Klinkerherstellung: Mittelfristig nicht erstrebenswert

Eine Umstellung des bislang brennstoffbasierten Klinkerbrennprozesses auf eine rein elektrische Beheizung der Drehöfen könnte die energiebedingten Emissionen, die rund ein Drittel ausmachen, vermeiden. Neben der Herausforderung, die hohe erforderliche Wärmeübertragungsleistung im Ofen darzustellen, ist der Materialtransport in elektrisch direkt beheizten Öfen bei Materialtemperaturen von bis zu 1.450 Grad Celsius bisher technisch nicht gelöst. Stattdessen müssten beispielsweise Plasma-brenner zum Einsatz kommen. In der Zementindustrie beginnen aktuell die ersten Versuche mit dieser Technologie, allerdings wurde bisher noch kein industrieller Ofen mit einem Plasmabrenner ausgerüstet. Dennoch sind Plasmabrenner eine interessante Option für die Zementindustrie, da sie ein breites Temperaturspektrum von 1.500 bis über 7.000 Grad Celsius abdecken und deshalb sowohl im Calcinator als auch im Hauptbrenner eines Drehofens zur Klinkerherstellung zum Einsatz kommen könnten. Dennoch bliebe der hohe Strombedarf für die elektrische Klinkerherstellung von etwa 850 bis 900 Kilowattstunden pro Tonne Klinker ein Hemmnis für die Elektrifizierung. Auf Basis der 2019er Produktionszahlen ergäbe sich für die deutsche Zementindustrie hierdurch zusätzlich zu den bislang erforderlichen rund 3,9 Terrawattstunden ein (erneuerbarer) Strombedarf von mindestens 21 Terrawattstunden.¹²⁸

Der Wirkungsgrad von Plasmabrennern ist derweil aktuell geringer als der der Wasserstoffelektrolyse, sodass aus dieser Perspektive eine Umstellung auf Wasserstoff als Brennstoff zunächst vorzuziehen wäre. Allerdings war auch dies technisch bislang nicht darstellbar, da die spezifische Wärmestrahlung des C-Atoms noch nicht ersetzt werden konnte. Zudem kommen bereits heute weitestgehend alternative Brennstoffe zum Einsatz, sodass das tatsächliche CO₂-Minderungspotenzial einer Elektrifizierung deutlich unterhalb eines Drittels läge.

Die Frage nach dem tatsächlichen Nutzen der Elektrifizierung stellt sich hier somit ebenso wie hinsichtlich einer Elektrifizierung petrochemischer Steamcracker. Von dieser Option sollte daher zunächst eher abgesehen werden. Vorgezogen werden sollte stattdessen der Einsatz eines möglichst hohen Anteils alternativer Brennstoffe.

Bereits seit fast 30 Jahren werden in der deutschen Zementindustrie alternative Brennstoffe verwendet. 2019 wurde der Brennstoffenergiebedarf zu fast 70 Prozent durch alternative Brennstoffe gedeckt und damit konventionelle fossile Brennstoffe, vor allem Braun- und Steinkohle, ersetzt. So können derzeit pro Tonne eingesetzter alternativer Brennstoffe bis zu 0,7 Tonnen fossile CO₂-Emissionen vermieden werden, was zu einer jährlichen Einsparung von 2 Millionen Tonnen CO₂ in Deutschland führt.¹²⁹ Der Fokus sollte hierbei zukünftig noch verstärkt auf die Steigerung des Anteils biogener Reststoffe gelegt werden.



5.2.5 CCS und BECCS: Voraussetzungen für eine klimaneutrale Zementindustrie

Ohne die dauerhafte Abscheidung und Speicherung von CO₂ wird die Zementindustrie aufgrund der unvermeidbaren prozessbedingten Entstehung von Kohlenstoffdioxid im Rahmen des Klinkerbrennprozesses nicht klimaneutral werden können. Die zeitnahe Prüfung und Etablierung von CCS-Lösungen für die Zementindustrie scheint daher aus heutiger Sicht alternativlos. Durch den Einsatz alternativer biogener Brennstoffe könnten in Kombination mit CCS und BECCS zudem negative Emissionen erzeugt werden, sodass sogar eine klimapositive Zementindustrie möglich sein könnte, in welcher unvermeidbare Emissionen aus anderen Sektoren (zum Beispiel aus der Landwirtschaft) kompensiert werden.




06

70–75

Vorreiter beim Carbon Management: Projekte in Nordrhein-Westfalen



Angesichts der langen Innovations- und Investitionszyklen in den Grundstoffindustrien, des aktuell hohen Reinvestitionsbedarfs in den für das Carbon Management besonders relevanten Branchen und nicht zuletzt aufgrund des Zeitdrucks beim Klimaschutz darf in der Erprobung und Umsetzung von klimafreundlichen und klimaneutralen Technologien und Verfahren keine Zeit mehr verloren werden.



Bereits heute arbeitet die nordrhein-westfälische Industrie daran, diese (verfahrens-)technischen Innovationen zur Transformation in eine Low Carbon Industry zu entwickeln und anwendungsreif zu machen.

Gute Beispiele für Projekte in Nordrhein-Westfalen, die die Transformation ermöglichen und aktiv gestalten, finden sich in allen relevanten Industriebranchen. Die Landesregierung unterstützt die Vorhaben unter anderem durch beziehungsweise bei Projektförderungen auf Landes-, Bundes- und/oder europäischer Ebene, durch die Landesinitiative IN4climate.NRW, durch die Gestaltung von und den Einsatz für entsprechende Rahmenbedingungen mithilfe geeigneter Entfesselungsaktivitäten zum Abbau bürokratischer Hürden.



Chemieindustrie

Cardyon®

Covestro aus Leverkusen zeigt mit einem innovativen Verfahren („Dream Production“), bei dem ein neuer Katalysator zum Einsatz kommt, um die Reaktion des CO₂ mit Propylenoxid zu bestimmten Kunststoffbausteinen zu forcieren, wie das klimaschädliche Treibhausgas zum wertvollen Grundstoff für alltägliche Produkte werden kann. Die entstehende neue Art von Polyolen wird unter anderem zur Produktion von Polyurethan-Schaumstoff und zur Herstellung von Bindemitteln für Sportböden eingesetzt. Weitere mögliche Einsatzbereiche sind die Verwendung in elastischen Textilfasern, Autositzen oder Dämmstoffen.

Carbon2Chem®

In einem Forschungslabor in Oberhausen und einem Technikumsbetrieb am Stahlwerkstandort in Duisburg erproben 17 Projektpartner, einschließlich thyssenkrupp, die stoffliche Verwertung von Hüttengasen, welche unter anderem Wasserstoff, Stickstoff und Kohlenstoffdioxid enthalten und bislang thermisch genutzt werden. Ziel ist die Herstellung von Ammoniak und Methanol, wobei die besondere Herausforderung in der Reinigung und Auftrennung der komplex zusammengesetzten Hüttengase liegt. In der zweiten Förderphase werden neben Hüttengasen auch andere Punktquellen (zum Beispiel aus der Kalkindustrie) als mögliche Kohlenstofflieferanten untersucht.

Rhecticus

Die im Projekt von Evonik und Siemens entwickelte Versuchsanlage am Standort Marl zeigt, wie die Umstellung von fossilem Erdöl auf nachhaltige Alternativen gelingen kann, indem CO₂ im Sinne des CCU-Ansatzes zum Ausgangsstoff wird. In einem zweistufigen Prozess (Synthesegasherstellung mit anschließender Fermentation) wandelt die Anlage das Gas mit Wasser und Strom zu Spezialchemikalien um und zeigt innovative Anwendungsmöglichkeiten im Bereich Power-to-X auf.

Bio-FML

In diesem Projekt soll ein vollständig recycelbares und teilweise biologisch abbaubares Faser-Metall-Laminat entwickelt werden, in dem ein Biokunststoff in Sandwichbauweise von metallischen Decklagen ummantelt und mit Naturfasern mechanisch verstärkt wird. Die Entwicklung eines effizienten Produktionssystems soll außerdem sicherstellen, dass der ökologische Hybridwerkstoff in Serie hergestellt werden kann. Das Vorhaben wird bis 2022 von den Projektpartnern Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, RWTH Aachen, DIRKRA Sondermaschinenbau GmbH & Co. KG und Delcotex Delius Techtex GmbH & Co. KG umgesetzt.

Shell Energy and Chemicals Park Rheinland

Weniger fossile Kraftstoffproduktion, mehr Einsatz regenerativer Eingangsstoffe, klarer Fokus auf zukunftsorientierte Energielösungen und Spezialchemieprodukte – mit Bio- und Recycling-Komponenten, Ökostrom und grünem Wasserstoff wird eine substanzielle und richtungsweisende Veränderung des heutigen Produktoutputs angestrebt. Neben der technologischen Transformation richtet Shell einen Transformationsdialog mit der Landesinitiative IN4climate.NRW sowie einen Beirat mit hochrangigen Vertretern aus Politik, Industrie und Wissenschaft ein, um den Prozess ganzheitlich anzugehen und zu beschleunigen.

Chemzero

BP und SABIC planen am Raffineriestandort Gelsenkirchen ein System für zertifizierte zirkuläre Kunststoffe. Hierfür werden gemischte und gebrauchte Kunststoffe zu Pyrolyseöl umgewandelt, das in der Raffinerie zu Propylen und Ethylen weiterverarbeitet wird, welche wiederum als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Kunststoffen dienen. Mit diesem Ansatz des chemischen Recyclings lässt sich der Einsatz fossiler Grundstoffe in den petrochemischen Anlagen am Standort reduzieren. Anders als beim mechanischen Recycling ist das Produkt am Ende qualitativ nicht von konventionell hergestellten Kunststoffen zu unterscheiden.

CCU-Machbarkeitsstudie für Nordrhein-Westfalen

In einer aktuellen Studie – durchgeführt von Uniper und dem DLR – wird das CCU-Potenzial in Nordrhein-Westfalen bewertet. Dabei wird nicht nur betrachtet, inwiefern CO₂ als alternative Kohlenstoffquelle genutzt werden kann, um die Treibhausgasemissionen zu senken, sondern auch, wie die lokale Industrie erhalten und neue Wertschöpfungspotenziale auf der Grundlage nachhaltiger Technologien in Nordrhein-Westfalen geschaffen werden können. Die Bewertung erfolgte anhand technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Kriterien sowie der lokalen Infrastruktur und des Roll-out-Potenzials.

NRW.Zirkulär

Die bisherigen gemeinsamen Arbeiten der Projektpartner (Wuppertal Institut, carbon minds, Fraunhofer UMSICHT) im Rahmen einer AG Circular Economy von IN4climate.NRW haben gezeigt, dass chemisches Recycling von Kunststoffabfällen eine wichtige Rolle in einer Kreislaufwirtschaft einnehmen kann. Als nächster Schritt hin zu einer zirkulären Kunststoffwirtschaft ist eine weitere Untersuchung und Erschließung von Pyrolyseverfahren als Verwertungsrouten für Kunststoffabfälle notwendig. Konkreter Bedarf besteht speziell für eine präzisierende Machbarkeitsstudie zum chemischen Recycling, basierend auf der Pyrolyse von gemischten Kunststoffabfällen. Übergeordnetes Ziel soll dabei die Machbarkeit für eine strategische Umsetzung einer Demonstrationsanlage zum thermochemischen Recycling von gemischten Kunststoffabfällen in Nordrhein-Westfalen als Beitrag zum ökologischen Strukturwandel des Landes sein.

BP und SABIC planen am Raffineriestandort Gelsenkirchen ein System für zertifizierte zirkuläre Kunststoffe.

Zementindustrie

UpZement

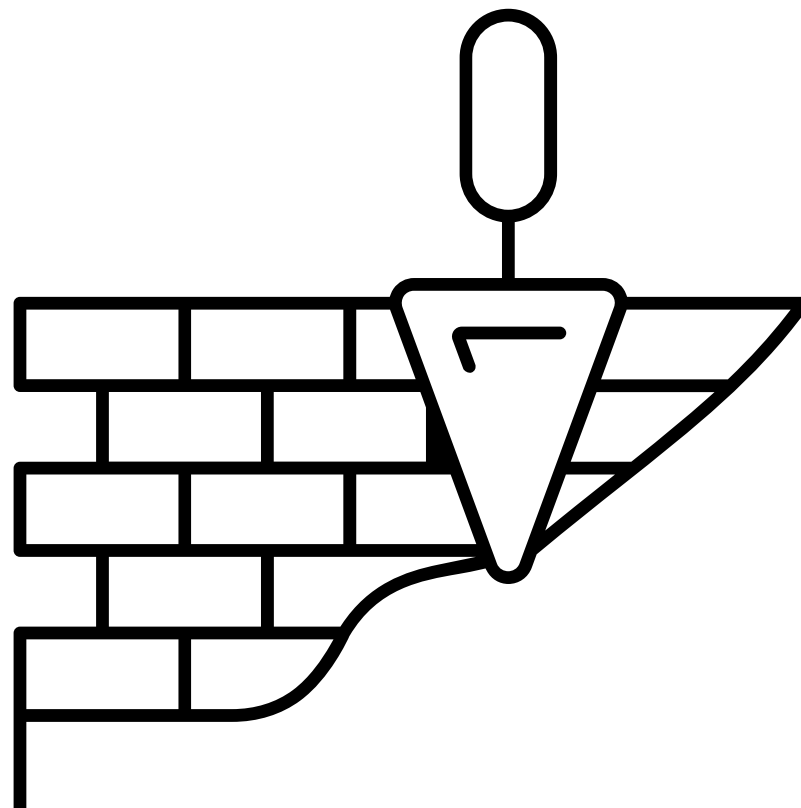
Mineralische Bauabfälle werden heute nur minderwertig wiedergenutzt. Im Vorhaben UpZement wollen die Projektpartner (Institut für Materialwissenschaft der Universität Duisburg-Essen, Dr. Spoo Umwelt-Consulting, TU Bergakademie Freiberg und SmartCrusher bv) daher untersuchen, wie eine hochwertigere Wiederverwendung durch die Trennung und Aufbereitung des hydratisierten Zementsteins von der Gesteinskörnung zur Herstellung von neuem reaktivem Zement realisiert werden kann. Durch den anteiligen oder vollständigen Ersatz des Zements durch diesen reaktivierten Zementstein könnten die CO₂-Emissionen erheblich reduziert werden. Um neben den technischen auch die logistischen Hürden zu adressieren, soll zudem die Entwicklung eines mobilen „Beton-Upcycling-Containers“, welcher auf jeder Baustelle eingesetzt werden kann, erfolgen.

SaveCO₂

In der Stahlproduktion ändert sich durch die Umstellung der kohlebasierten Hochofen-Konverter-Route hin zur klimafreundlicheren Direktreduktion die Zusammensetzung der anfallenden Eisenhüttenschlacken. Diese Schlacken werden bisher in der Zement- und Baustoffindustrie eingesetzt und ersetzen hier einen Teil des benötigten Primärmaterials. Das Fraunhofer UMSICHT arbeitet in diesem Projekt mit vier Partnern beider Industrien daran, die neuen Schlacken weiterzuentwickeln, um auch in Zukunft CO₂-Emissionen zu verringern, Ressourcen zu schonen und Synergien zwischen Stahl- und Zementindustrie zu erhalten.

C²inCO₂

Bei der Betonherstellung entsteht durch den Einsatz von Kalkstein als Rohstoff für die Zementklinker prozessbedingtes CO₂. Während der Nutzungs- und Recyclingphase von Beton werden bis zu 30 Prozent der prozessbedingten CO₂-Mengen auf natürliche Weise gebunden, indem diese mit dem gebrannten Kalk wieder zu Kalkstein reagieren. In dem Projekt wird neben weiteren Projektpartnern unter Beteiligung der thyssenkrupp Industrial Solutions AG und der RWTH Aachen eine Recyclingtechnologie entwickelt, die eine saubere Trennung des Zementsteins von Sand und Kies ermöglicht, womit dieser effizient für eine Karbonatisierung genutzt werden kann. So lässt sich das verbleibende Potenzial zur CO₂-Einbindung im Zement erschließen.



Metallindustrie

Inerte Anode

Bei der Aluminiumherstellung werden Kohlenstoff-Anoden eingesetzt, deren Kohlenstoff während der Elektrolyse mit dem Rohstoff Aluminiumoxid zu CO_2 reagiert. Der Einsatz von Nicht-Kohlenstoff-Anoden, sogenannten inerten Anoden, hat das Potenzial, sowohl die prozessbedingten CO_2 - als auch die FKW-Mengen bei der Aluminiumproduktion zu vermeiden. Dabei können ca. 1,2 Tonnen CO_2 pro Tonne Aluminium eingespart werden. TRIMET Aluminium SE arbeitet im Zuge dieses Projektes daran, die Technologie vom Labormaßstab bis zur Demonstration in einer Betriebsumgebung weiterzuentwickeln.

Wasserstoff im Hochofen

Die Produktion von Stahl beginnt mit der Produktion von Roheisen. Das wird heutzutage in der Regel in Hochöfen unter Einsatz von Koks und Einblaskohle aus Eisenerz hergestellt. Auf Basis dieses Produktionsprozesses ist die Stahlindustrie bislang ein bedeutender Emittent von Treibhausgasen. Um eine Senkung der CO_2 -Emissionen zu erreichen, muss das Verfahren umgestaltet werden – zum Beispiel mithilfe alternativer Reduktionsmittel. So setzt thyssenkrupp Steel auf den Einsatz von Wasserstoff im Hochofen. Dieser reagiert dann anstelle von Koks und Kohlenstaub mit dem Sauerstoff im Eisenerz – statt CO_2 entsteht dabei Wasserdampf. Eine Senkung der CO_2 -Emissionen von bis zu 20 Prozent ist so möglich.

Loop

Für die Produktion von Sekundäraluminium, also recyceltem Aluminium, wird im Vergleich zur primären Herstellung von Aluminium lediglich circa 5 Prozent der Energie benötigt. Durch den Einsatz innovativer Sortier-, Schmelz- und Gießtechnologie wollen die Projektpartner unter der Konsortialführung von Speira die Kapazität der Sekundäraluminiumherstellung deutlich erhöhen und somit die Kreislaufwirtschaft im Rheinischen Revier weiter etablieren.

REDERS

Durch den Einsatz von Recyclingmaterial im Hochofen und Steigerung des Recyclinganteils im Konverterprozess lassen sich der Einsatz von Einblaskohle und der Koksverbrauch und somit die CO_2 -Entstehung reduzieren. Voraussetzung ist, dass das Recyclingmaterial qualitativ hochwertig ist. In diesem Projekt von thyssenkrupp Steel, TSR Recycling GmbH & Co. KG, Hüttenwerke Krupp Mannesmann und dem VDEh-Betriebsforschungsinstitut soll eine neue Aufbereitungstechnik entwickelt werden, mithilfe dieser aus Konsumentenschrotten ein neuartiges, zertifiziertes Produkt hergestellt werden kann. Dieses hochwertige schrottbasierte Recyclingmaterial soll im Hochofen eingesetzt werden und mit einem höheren Anteil als bisher dem Konverterprozess zugeführt werden. Die beiden Prozesse sind dementsprechend anzupassen. Eine Senkung der CO_2 -Emissionen von bis zu 1 Tonne im Hochofen beziehungsweise 1,7 Tonne im Konverter pro Tonne Recyclingmaterial ist möglich.

TRIMET arbeitet an dem Einsatz einer inerten Anode zur **vollständig kohlenstoff-freien Aluminiumherstellung.**

Glasiindustrie

Klimaneutraler Standort Herzogenrath

Konventionell wird Glas hergestellt, indem das Rohstoffgemenge (Quarzsand, Kalkstein, Dolomit, Soda, Additive und Scherben) in der Regel in erdgasbefeuerten Schmelzwannen bei sehr hohen Temperaturen verarbeitet wird. Der Standort Herzogenrath möchte im Jahr 2030 die

CO₂-Neutralität erreichen und so regional und international eine Vorreiterrolle einnehmen. Um die CO₂-Emissionen der Flachglasherstellung im Floatprozess zu senken, soll der Prozesswärmebedarf künftig durch Strom und Wasserstoff gedeckt werden. Neben Saint-Gobain sind Siemens Energy, die RWTH Aachen, das Gas- und Wärme-Institut Essen und weitere Partner an dem Vorhaben beteiligt. Eine smarte Infrastruktur zur Sektorenkopplung soll darüber hinaus eine optimierte Nutzung sämtlicher Energie- und Stoffströme ermöglichen. So könnten zukünftig auch die prozessbedingt anfallenden CO₂-Mengen aus der Zersetzung der im Gemenge befindlichen Karbonate mittels Carbon Capture abgefangen und einer Nutzung in räumlicher Nähe (CCU) zugeführt werden.

Weitere Projekte

CO₂-Abscheidung und -Aufbereitung für die Lebensmittelindustrie

Der Einsatz von CO₂ in der Lebensmittelindustrie erfordert eine hohe Reinheit des Gases und daher, je nach CO₂-Quelle, eine aufwendige Aufbereitung des Gases. Air Liquide plant in Oberhausen die CO₂-Abscheidung, das als Nebenprodukt bei einer partiellen Oxidation (POX) anfällt. Das CO₂ soll in mehreren Stufen aufbereitet und gereinigt werden, um es zertifiziert der Lebensmittelindustrie zur Verfügung zu stellen.

iNEW 2.0

Im Zentrum des Innovation Space iNEW stehen die Erforschung, Weiterentwicklung und Implementierung von fortgeschrittenen Elektrolyse-Technologien für Power-to-X-Anwendungen (P2X). Auf diese Weise kann nicht nur grüner Wasserstoff effizient erzeugt, sondern auch CO₂ im Kreis geführt werden. Das Rheinische Revier soll somit zu einer Innovationsregion mit zukunftsfähigen Arbeitsplätzen und zur Keimzelle für klimaneutrale industrielle Wertschöpfungsketten werden. Das Vorhaben ist Teil des übergeordneten Konzepts ANABEL, einem Accelerator zur nachhaltigen Bereitstellung elektrochemisch erzeugter Kraft- und Wertstoffe, und wird vom Forschungszentrum Jülich (FZJ) und der RWTH Aachen umgesetzt.

Protanz.NRW

Neue Technologien und insbesondere die mit neuen Technologiepfaden verbundenen Infrastrukturbedarfe bedürfen auch gesellschaftlicher Akzeptanz. Zu den innovativen industriellen Defossilisierungsstrategien fehlen Erfahrungswerte und treffen divergierende Wahrnehmungen auf eine hochkomplexe Akteurs- und Diskursarena. Im Projekt Protanz.NRW, das von den Akteuren im Rahmen des Virtuellen Instituts „Transformation – Energiewende NRW“ durchgeführt wird, werden vergangene und potenzielle Protestbewegungen analysiert und für akzeptanzsteigernde und bürgerbeteiligende Formate nutzbar gemacht, um die Industrietransformation in Nordrhein-Westfalen zu befördern.

IN4climate.RR

Das Vorhaben IN4climate.NRW im Rheinischen Revier (IN4climate.RR) bietet in zunächst drei Zukunftslaboren zu den Themen Wasserstoff, CCUS und Circular Economy einen Rahmen zur Erforschung und Umsetzung einer klimaneutralen Industrie im Rheinischen Revier, eingebettet in die Gesamttransformation der Industrie von Nordrhein-Westfalen. Die Entwicklung der Industrie im Rheinischen Revier (Technologien, Infrastruktur, Systeme) wird dadurch strategisch flankiert, die einzelnen industrieorientierten Projekte vernetzt und begleitet sowie weitere Projekte angestoßen und auf die langfristigen Gesamtziele, zum Beispiel des European Green Deal, ausgerichtet.



07

76–85

Erforderliche Rahmenbedingungen und Instrumente, um richtig durchzustarten



So komplex das Thema Carbon Management ist, so vielfältig sind auch die zu gestaltenden rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen. Zentral sind die gesetzlichen Vorgaben zum Klimaschutz, die nur durch einen gut durchdachten und klugen Instrumentenmix – auch hinsichtlich des Carbon Managements – eingehalten werden können.



7.1 Green Deal und Klimaschutzgesetze

Der im Dezember 2019 von der Europäischen Kommission vorgestellte European Green Deal¹³⁰ ist als zentraler Bestandteil der Klimapolitik der Europäischen Union das maßgebliche Konzept zur Erreichung der Treibhausgasneutralität bis 2050 in der EU.

Im Juni 2021 haben sich in diesem Kontext der Europäische Rat und das Europäische Parlament auf ein neues EU-Klimaschutzgesetz geeinigt, mit welchem das Reduktionsziel für 2030 von bis dato 40 Prozent auf 55 Prozent im Vergleich zu 1990 angehoben wurde. Am 14. Juli 2021 hat die Europäische Kommission daraufhin das zentrale Legislativpaket „Fit for 55“ vorgestellt. Damit liegen nun entsprechende Maßnahmenvorschläge vor, die in den Bereichen Energie, Verkehr, Emissionshandel, Besteuerung und dem Landsektor gemäß des EU-Klimagesetzes sicherstellen sollen, dass dieses Ziel erreicht werden kann. Die EU-Mitgliedstaaten sollen bis 2023 ihre Klimapläne entsprechend der verschärften Ziele anpassen.

Deutschland hat dies bereits getan und legt ambitionierte Ziele vor. Der Bundestag hat am 12. Mai 2021, im Nachgang zu dem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts vom 24. März 2021, ein novelliertes Klimaschutzgesetz¹³¹ beschlossen, das am 31. August in Kraft getreten ist.

Unter anderem wurden die Klimaschutzziele angepasst und neue Ziele eingeführt. Das Treibhausgasminderungsziel für das Jahr 2030 wurde von mindestens 55 Prozent auf mindestens 65 Prozent gegenüber 1990 erhöht. Für das Jahr 2040 wird ein neues nationales Klimaschutzziel von mindestens 88 Prozent gegenüber 1990 vorgeschrieben. Bis zum Jahr 2045 sind die Treibhausgasemissionen so weit zu mindern, dass Netto-Treibhausgasneutralität erreicht wird. Die größte Verschärfung fand im Sektor Energiewirtschaft statt, wobei dieser Pfad mit dem Ausstieg aus der Kohleverstromung bereits vorgezeichnet war. Der Industriesektor soll seine Emissionen um 22 Millionen Tonnen beziehungsweise 16 Prozent reduzieren.

Das Klimaschutzgesetz Nordrhein-Westfalen schreibt die Treibhausgasminderungsziele auf Landesebene fest und zeigt den Handlungsrahmen auf, mit welchem diese Ziele erreicht werden sollen. Am 1. Juli 2021 hat der Landtag der Novellierung des Klimaschutzgesetzes aus dem Jahr 2013 zugestimmt. Die Neufassung des Klimaschutzgesetzes¹³² verschärft die bisherigen Ziele des seinerseits ersten Klimaschutzgesetzes in Deutschland deutlich: Wurde im ersten nordrhein-westfälischen Klimaschutzgesetz von 2013 noch eine Minderung für 2050 von mindestens 80 Prozent im Vergleich zum Jahr 1990 festgeschrieben, verpflichtet sich das Land nun, bereits 2045 treibhausgasneutral zu wirtschaften. Zudem wurden im Gesetz Zwischenziele ergänzt: Bis 2030 sollen die Emissionen um mindestens 65 Prozent im Vergleich zu 1990 sinken, bis 2040 um mindestens 88 Prozent. Nordrhein-Westfalen übernimmt damit die Bundes-Treibhausgasminderungsziele und leistet einen ambitionierten Beitrag zur Erreichung der Ziele des Übereinkommens von Paris, wonach der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst auf 1,5 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen ist.

88 Prozent

Minderung bei den Treibhausgasemissionen sind bis 2040 in Deutschland zu erreichen.

Mit der Neufassung des Klimaschutzgesetzes Nordrhein-Westfalen stellt das Land gleichzeitig klar, dass es Klimaschutz als Innovationstreiber versteht. Investitionen in den Klimaschutz unterstützen die Modernisierung des Wirtschaftsstandorts und tragen zu Innovationen, zu mehr Lebensqualität und zur Steigerung von Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung bei. Die Ziele der Carbon Management Strategie NRW – die Senkung der CO₂-Emissionen, die Umstellung der Rohstoffbasis und die Schaffung von Wettbewerbschancen für die nordrhein-westfälische Industrie – fügen sich somit nahtlos in den Kontext der Landes-Klimaschutzgesetzgebung ein.

Hinsichtlich der Umsetzung der Klimaschutzziele hebt die Neufassung des Klimaschutzgesetzes Nordrhein-Westfalen die Bedeutung des forcierten weiteren Ausbaus von erneuerbaren Energien und des Auf- und Ausbaus einer Infrastruktur für perspektivisch ausschließlich aus

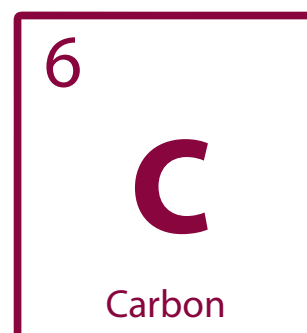
erneuerbaren Energien produzierten Energieträgern und Rohstoffen, wie zum Beispiel Wasserstoff, hervor. Die Regierung verpflichtet sich, entsprechende Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Diese Maßnahmen tragen gleichzeitig direkt zur Umsetzung der Carbon Management Strategie NRW in den Bereichen Dekarbonisierung und Defossilisierung bei. Gleichzeitig wird betont, dass bei der Verringerung und Bindung der Treibhausgasemissionen in allen klimarelevanten Sektoren der Steigerung des Ressourcenschutzes, der Ressourcen- und Energieeffizienz, der Energieeinsparung sowie der Nutzung von Flexibilisierungsoptionen und der Sektorenkopplung besondere Bedeutung zukommt. Hier können die strategischen Säulen Sekundärrohstoffnutzung und CO₂-Nutzung einen Beitrag leisten. Nicht zuletzt wird unterstrichen, dass die Landesregierung die Transformation des Industriesektors begleitet.

7.2 Rechtlicher Rahmen für die Verwendung alternativer Kohlenstoffe

Die Marktentwicklung für die Nutzung alternativer Rohstoffe beziehungsweise Kohlenstoffe steht noch am Anfang. Um die Transformation in eine Low Carbon Industry zu ermöglichen, müssen an einigen Stellen rechtliche Rahmenbedingungen angepasst werden.

Für die Nutzung von alternativen Kohlenstoffquellen sind verschiedene, miteinander verknüpfte, rechtliche Regime relevant. Besonders deutlich wird dies bei CO₂: Wird CO₂ emittiert, gilt das Immissionsschutzrecht sowie für einige Sektoren, wie die Industrie, ergänzend das Emissionshandelsrecht. Wird CO₂ abgeschieden und entsorgt beziehungsweise gespeichert, gilt das CCS-Regime als besonderes Abfallrecht. Im Falle einer CO₂-Nutzung (CCU) hingegen kommt das Produktrecht zur Anwendung, mit dem auch Informationspflichten in der Lieferkette verbunden sind.^{133,134}

Die geologische Speicherung von CO₂ innerhalb von Deutschland ist derzeit rechtlich ausgeschlossen.¹³⁵ Um CCS im Ausland zu betreiben, muss seitens der Bundesregierung das Amendment zum Artikel 6 des London-Protokolls ratifiziert werden. Dies setzt zugleich eine Anpassung des nationalen Rechts voraus. Außerdem besteht in puncto CO₂ Handlungsbedarf, insbesondere in Hinblick auf die Regelung der Beschaffenheit des CO₂ für den Transport in einem öffentlichen Netz sowie die Anrechnung im European Union Emissions Trading System (EU ETS).^{136,137}



In Bezug auf den Einsatz von Sekundärrohstoffen hat die Europäische Kommission im März 2020 im Rahmen des Green Deal einen Aktionsplan für die Circular Economy, in dem wesentliche Ziele und Maßnahmen zur Erreichung einer zirkulären Wirtschaft konkretisiert sind, veröffentlicht. Darin werden hauptsächlich das Produktdesign sowie die Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse mit dem Ziel betrachtet, die eingesetzten Ressourcen so lange wie möglich in der europäischen Wirtschaft zu halten.

Auch auf nationaler Ebene hat die Politik mit Gesetzen wie dem Kreislaufwirtschaftsgesetz oder dem Abfallvermeidungsprogramm damit begonnen, die Rahmenbedingungen für eine Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Insgesamt fehlen in der bundesdeutschen Kreislaufwirtschaft, der Ressourcenpolitik und der Abfallvermeidung jedoch auch nach der Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes im Jahre 2020 noch messbare, spezifizierte und terminierte Ziele, die einen Orientierungsrahmen für die Akteure einer Kreislaufwirtschaft bilden würden. Dieser Umstand hemmt die Umsetzung von Maßnahmen und somit die umfassende Transformation des Systems. So fehlen beispielsweise spezifizierte Vorgaben bezüglich eines Zieljahres oder einer Zielperiode oder es werden Subventionen für die Rohstoff- und Verarbeitungssektoren bereitgestellt, die den Einsatz von Primärrohstoffen begünstigen. Anreize zur Abfallvermeidung, Wiederverwendung und zu zusätzlichen Kreislaufstrategien werden hingegen nur in geringem Maße gesetzt.¹³⁸

In Bezug auf Biomasse steht derzeit vor allem die Anrechenbarkeit der Mitverarbeitung biogener Stoffe beziehungsweise Öle, das sogenannte Co-Processing, auf die Treibhausgasminderungsquote in Rede, die vor allem Raffinerien die Möglichkeit für die Erschließung neuer Produktsegmente gibt und eine wirtschaftliche Zukunft in Nordrhein-Westfalen schaffen könnte. Hierfür müsste die 37. BImSchV (Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) beziehungsweise das BImSchG (Bundes-Immissionsschutzgesetz) angepasst werden. Aus Sicht der Landesregierung kann Co-Processing allerdings nur mitgetragen werden, wenn eindeutig der Einsatz von Palmölen und ungewollte Landnutzungsänderungen vermieden werden. Eine entsprechende Umsetzung auf Bundesebene wird zeitnah erwartet.



Die Europäische Kommission hat im März 2020 im Rahmen des Green Deal einen Aktionsplan für die Circular Economy veröffentlicht, der das Produktdesign sowie die Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse mit dem Ziel betrachtet, die eingesetzten Ressourcen so lange wie möglich in der europäischen Wirtschaft zu halten.



7.3 Rahmenbedingungen im Kontext des EU ETS

Das EU ETS als zentrales Instrument für Klimaschutz auf europäischer Ebene erzeugt ein Preissignal für CO₂-Emissionen in Stromwirtschaft und Industrie. Höhere Preise für CO₂-Emissionen tragen dazu bei, Maßnahmen zur CO₂-Vermeidung anzureizen, und stützen so grundsätzlich die Bemühungen zum Kohlenstoffmanagement.

7.3.1 Grenzausgleichsmechanismus

Das EU ETS stellt für europäische Produktionsstandorte gegenüber Mitbewerbern aus anderen Regionen einen Wettbewerbsnachteil dar, der in Zeiten globaler offener Märkte zunehmend an Gewicht gewinnt. Das gilt zumindest so lange, wie es kein die wichtigsten weltweiten Industriestaaten umfassendes gleichwertiges Bepreisungssystem gibt. Dies haben die europäischen Entscheidungsträger erkannt und emissionsintensive Industrien, die im globalen Wettbewerb stehen, mit dem Instrument einer kostenlosen freien Zuteilung von Emissionszertifikaten vor diesen negativen Auswirkungen geschützt. Ein zu der freien Zuteilung analoges Element bei stromintensiven, im internationalen Wettbewerb stehenden Produktionen ist die Strompreiskompensation. Mit der schrittweisen Verringerung der zur Verfügung stehenden Zertifikatenumenge wird auch der für die freie Zuteilung zur Verfügung stehende Spielraum enger. Dieser Effekt wird mit der Verschärfung des EU-Reduktionsziels für 2030 auf 55 Prozent und der entsprechenden Anpassung des Reduktionsziels für das EU ETS deutlich verstärkt werden. Das „Fit for 55“-Paket der Kommission sieht die signifikante Senkung der Obergrenzen für Emissionen im EU ETS vor. Die jährliche Kürzung soll auf 4,2 Prozent erhöht werden, um bis 2030 schließlich Emissionseinsparungen von 61 Prozent im Vergleich zu 2005 erzielen zu können.

Kostenlose Zuteilungen, die finanzielle Spielräume für Innovationen bei der Umstellung auf klimaneutrale Produktion ermöglichen, sollen durch einen Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment, CBAM) ersetzt werden. Gleiches gilt für die Strompreiskompensation. Damit soll die Gleichheit der Wettbewerbschancen durch eine Belastung von Importen in den EU-Raum gesichert werden. Der Preisaufschlag für die importierten Güter würde dabei prinzipiell dem bei der Herstellung angefallenen Treibhausgasabdruck, multipliziert mit dem EU-ETS-Zertifikatspreis, entsprechen. Ein Vorschlag der EU-Kommission liegt vor. Der beabsichtigte Systemwechsel ist in Kreisen der betroffenen Industrien auf deutliche Kritik gestoßen. Seitens der nordrhein-westfälischen Energieunternehmen und Industrieverbände wird vor allem die Reduzierung kostenloser Zuteilungen mit dem Verweis auf schwindende finanzielle Spielräume für Innovationen bei der Umstellung auf klimaneutrale Produktion kritisiert. Probleme werden zudem bei der Berechnung des impliziten Treibhausgasgehalts der Importwaren gesehen, die angesichts global vernetzter Handelsströme schwierig ist. Importeure könnten zudem der Versuchung eines Greenwashings ihrer Güter unterliegen.

Des Weiteren steht die Befürchtung im Raum, die Etablierung eines Grenzausgleichsmechanismus könnte als unfreundlicher Wettbewerbsakt empfunden werden. Auch wenn die Kommission die WTO-Kompatibilität des CBAM mit umfassenden Reduzierungen in der kostenlosen Zuteilung von EU-ETS-Zertifikaten sicherstellen will und letztlich davon ausgeht, dass der europäische Vorstoß Drittstaaten hinreichend motiviert, ebenfalls nationale CO₂-Bepreisungen einzuführen, um die Grenzabgabe zu vermeiden, zeigen sich auf internationaler Ebene Staaten wie Russland und China, aber auch die USA, nach wie vor skeptisch und drängen auf handelspolitische Einigungen außerhalb von CBAM.

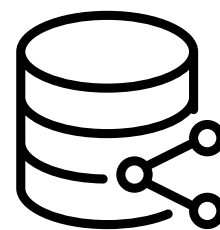
Gegenmaßnahmen wären damit nicht ausgeschlossen und würden besonders die im europäischen Vergleich stärker exportorientierten deutschen Branchen treffen.

Schließlich kann die Belastung von Importen in den europäischen Wirtschaftsraum bei gleichzeitigem Wegfall der freien Zuteilung nicht die Belastung der europäischen Industrien auf den globalen Exportmärkten kompensieren. Eine Freistellung vom EU ETS nur für Exporte dürfte bei den internationalen Wettbewerbern als Subventionierung verstanden werden und eventuell negative Gegenreaktionen auslösen.

Die Bundesregierung hat sich zwischenzeitlich vor dem Hintergrund der dargestellten industriepolitischen Probleme ausdrücklich zur Fortsetzung der freien Zuteilung bekannt. Das MWIDE begrüßt diese auch vom Hause vertretene Forderung. Sie wird sich gegen Lösungen wenden, die zu ungleichen Wettbewerbschancen nordrhein-westfälischer, deutscher (und europäischer) Unternehmen führen und letztlich in einen Verlust industrieller Produktionen an Standorten mit schlechteren Umwelt- und Sozialbedingungen resultieren.

7.3.2 Negative Emissionen

Negative Emissionen, also die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre zur dauerhaften Speicherung, spielen eine wichtige Rolle für das Erreichen der Klimaneutralität und sind notwendig, wenn das 1,5-Grad-Ziel erreicht werden soll.^{139,140} Der Vorschlag für ein EU-Klimagesetz vom 5. Mai 2021 sieht die Entwicklung von natürlichen und technologischen CO₂-Senken vor. Nach 2050 sollen die Gesamtemissionen der EU netto-negativ sein. Es besteht also die Notwendigkeit, einen regulatorischen Rahmen zu entwickeln und negative Emissionen zu vergüten, um entsprechende Anreize zu setzen.^{141,142} Das EU ETS setzt bislang keine Anreize für die Erzeugung von negativen Emissionen durch technologische Maßnahmen wie BECCS oder DACCS, da die ETS-Richtlinie sich nur auf Anlagen mit Emissionen aus fossilen Rohstoffen bezieht. Entsprechende Reformen werden aber bereits diskutiert.



CCS in Verbindung mit fossilem Kohlenstoff kann bereits im ETS angerechnet werden. Für Emissionen, die aufgrund einer Prüfung als abgeschieden und zur ständigen Speicherung verbraucht angesehen werden (gemäß Richtlinie 2009/31/EG), sind keine Zertifikate vorzulegen (Richtlinie 2003/87/EG Art. 12 3a). Dies kann die Kosten für CO₂-Abscheidung gegenfinanzieren und damit CCS-Projekte wie beispielsweise das am Rotterdamer Hafen geplante Porthos-Projekt¹⁴³ unterstützen.

Langfristig ist eine Integration von Vergütungssystemen für negative Emissionen mit dem EU ETS und auch mit nationalen Emissionshandelssystemen anzustreben, um die Kosten für den Klimaschutz insgesamt möglichst niedrig zu halten.¹⁴⁴ Für eine mögliche Einbeziehung von negativen Emissionszertifikaten in das EU ETS existieren bereits erste Vorschläge.^{145,146} Kurz- und mittelfristig sind jedoch separate Ziele für CO₂-Entnahme und Emissionsvermeidung sinnvoll, um die Priorität der Emissionsvermeidung sicherzustellen.^{147,148}

Voraussetzung für ein funktionierendes Vergütungssystem ist die Entwicklung eines belastbaren Systems für die Zertifizierung negativer Emissionen. Dieses muss unter anderem sicherstellen, dass die Emissionen dauerhaft gespeichert werden und dass keine negativen indirekten Effekte (Leakage) auftreten. Mit der Entwicklung eines solchen Systems wurde auf EU-Ebene bereits begonnen, ein Vorschlag der Kommission wird für 2023 erwartet. Diese Bemühungen müssen mit Priorität vorangetrieben werden.

Die Entnahme-Technologien müssen aber bereits heute entwickelt werden, damit sie rechtzeitig für den großskaligen Einsatz zur Verfügung stehen. Deshalb ist es nötig, sie über Fördermaßnahmen zu unterstützen, solange keine auskömmliche Vergütung über einen CO₂-Preis besteht.

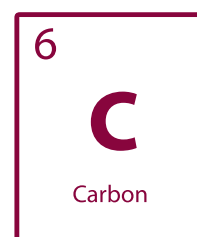
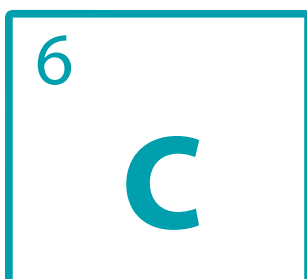
7.3.3 Carbon Capture and Usage

Bis dato ist die Anrechnung von im industriellen Kontext abgeschiedenen und in Produkten gebundenen CO₂-Mengen im Europäischen Emissionshandel nach der „Schaefer Kalk“-Rechtsprechung des EuGHs nur dann möglich, wenn die stabile und dauerhafte Bindung des CO₂ gesichert und nachgewiesen ist. Die 2020 geänderte Monitoringverordnung greift dies allerdings ausschließlich für den Fall der Weiterleitung von CO₂ zum Zweck der Herstellung von gefälltem Kalziumkarbonat auf.

Für die Anpassung des EU ETS ist nun vorgesehen, dass keine Verpflichtungen zur Abgabe von CO₂-Zertifikaten entstehen, die dauerhaft chemisch in einem Produkt gebunden sind, sodass sie bei normalem Gebrauch nicht in die Atmosphäre gelangen. Hier ist im Rahmen der Implementierung noch zu definieren, was als „dauerhaft chemisch gebunden“ betrachtet werden kann.

Bei einer weniger langfristigen Bindung (zum Beispiel im Falle von synthetischen Kraftstoffen) des CO₂ werden die Emissionen aus der abscheidenden Anlage zwar nicht dauerhaft vermieden, aber durch die Doppelnutzung werden die summierten Emissionen der abscheidenden Anlage und der nutzenden Anwendung insgesamt reduziert. Eine Anrechnung des abgeschiedenen und der Nutzung zugeführten CO₂ im EU ETS wäre grundsätzlich denkbar. Die Emissionen müssten dann am Ende der Lebensdauer des Produktes dem entsprechenden Sektor zugerechnet werden.¹⁴⁹ Es ist jedoch fraglich, wie dies regulatorisch umgesetzt werden könnte, sowohl aufgrund der vielfältigen Wertschöpfungspfade von Produkten als auch, weil die Sektoren, in denen die Emissionen anfallen würden (zum Beispiel Abfallverbrennung) nicht notwendigerweise vom EU ETS und nicht in allen EU-Mitgliedstaaten von einem nationalen CO₂-Bepreisungssystem erfasst sind.

Alternative Fördermöglichkeiten für weniger langlebige CCU-Anwendungen mit fossilem Kohlenstoff sollten deshalb geprüft werden. Denn Klimaschutz ist hier nicht die einzige Begründung, warum dies sinnvoll ist. Durch CCU mit fossilem CO₂ ergeben sich andere positive Effekte, etwa durch verbessertes Rohstoffmanagement, Erweiterung der Rohstoffbasis¹⁵⁰ und die Entwicklung von Technologien für geschlossene Kohlenstoffkreisläufe auf Basis von DACCS und BECCS¹⁵¹. Andere Förderinstrumente oder die Anrechnung im Rahmen von Instrumenten, die jene Sektoren betreffen, die das CO₂ nutzen, sind hier möglicherweise zu bevorzugen. Auch die Möglichkeiten zur Schaffung grü-



ner Märkte sind zu berücksichtigen. CCU-Produkte können als klimafreundliche Produkte vermarktet werden, wenn die abscheidende Anlage zertifizierungspflichtig bleibt und die fossile Eigenschaft des Kohlenstoffs somit nicht an die nutzende Anlage „weitergegeben“ wird. In jedem Fall müssen sowohl Doppelanrechnungen als auch Doppelzertifizierung vermieden werden.

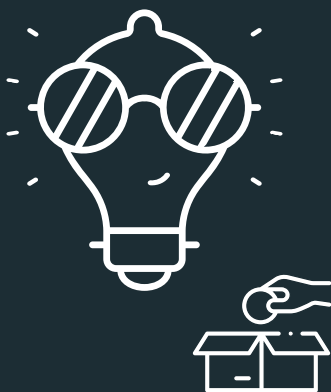
Als Voraussetzung für wirksame und rechtssichere Regelungen muss eine Methodik entwickelt werden, die sowohl das Klimaschutzpotenzial von CCU-Technologien als auch weitere positive Nebeneffekte berücksichtigt. Diese Methodik sollte sowohl Entscheidungen über die Anrechnung von CCU im ETS erlauben als auch eine Grundlage für die Zertifizierung von im Rahmen von CCU hergestellten Produkten bilden. Die entsprechenden Bemühungen auf europäischer und nationaler Ebene^{152,153,154} sollten mit Priorität weiterverfolgt werden. Zudem sollten weitere Möglichkeiten der Förderung von CCU, insbesondere über entsprechende Förderprogramme und über Zertifizierung und Produktkennzeichnung, entwickelt werden.

7.3.4 Carbon Contracts for Difference

Neue klimaneutrale Herstellungsverfahren sind aktuell nicht oder nur sehr eingeschränkt mit tragfähigen Geschäftsmodellen verbunden. Die höheren Kosten sogenannter Low Carbon Breakthrough Technologies (LCBT) resultieren zum einen aus höheren Investitionskosten in innovative Technologien und zum anderen aus höheren Betriebskosten durch den höheren oder veränderten Energiebedarf sowie den Einsatz alternativer Rohstoffe.

Zwar ist 2021 der Preis für den Ausstoß einer Tonne CO₂ im EU ETS erstmals über die 60-Euro-Marke gestiegen und hat sich damit binnen eines Jahres mehr als verdoppelt, allerdings werden die Vermeidungskosten der meisten klimaneutralen Technologien in Deutschland, deren Entwicklung stark an die des Strompreises gekoppelt ist, Studien zufolge selbst im Jahre 2030 noch deutlich darüber liegen.¹⁵⁵

Der frühzeitige Umstieg auf klimaneutrale Alternativen muss unterstützt werden



Hohe Investitionen in **innovative Technologien**



Höhere Betriebskosten durch **höheren/veränderten Energiebedarf**



Aufwendigere Erschließung **alternativer Rohstoffe**

Infolge von Lerneffekten in den Folgejahren sind zwar kostensenkende Effekte zu erwarten, in der nordrhein-westfälischen Grundstoffindustrie stehen jedoch bereits in den kommenden Jahren Reinvestitionen in großem Umfang (Stahl und Chemie > 50 Prozent, Zement 30 Prozent der Produktionskapazitäten bis 2030) an, die aufgrund der langen Investitionszyklen in die richtigen Bahnen gelenkt werden müssen, um Lock-in-Effekte, die das Klimaschutzziel gefährden, ebenso zu vermeiden wie Stranded Assets, die einen erheblichen wirtschaftlichen Schaden bedeuten würden.¹⁵⁶

Carbon Contracts for Difference können die nötigen Investitionen deutlich vorziehen und so das aktuell gegebene Gelegenheitsfenster nutzen, indem sie die hohen Vermeidungskosten dieser Technologien ausgleichen und Risiken langfristig absichern.

Solche Klimaschutzverträge werden projektbezogen zwischen dem Staat (oder einer staatlichen Institution) und einem Unternehmen geschlossen und legen für einen vorgegebenen Zeitraum eine feste oder auch dynamisierte Prämie pro Tonne vermiedener CO₂-Emissionen fest. Die Prämie wird so gestaltet, dass im Zusammenspiel mit anderen Instrumenten die CO₂-Vermeidungskosten, also die Mehrkosten (Opex und Capex) der LCBT gegenüber einer wirtschaftlichen Referenztechnologie, kompensiert werden. Falls sich die Mehrkosten bereits teilweise durch den CO₂-Preis im EU ETS rechtfertigen, wird dies bei der Berechnung der Prämie berücksichtigt. In Hinblick auf steigende CO₂-Preise und sinkende Kosten für erneuerbare Energien und klimaneutralen Wasserstoff sollten CCfD grundsätzlich symmetrisch angelegt werden: Steigt der CO₂-Preis über den im Vertrag (projekt-)individuell festgelegten CO₂-Grenzpreis, sodass sich die über CCfD ermöglichten Investitionen langfristig rentieren, sollte diese Differenz (anteilig) an den Staat rückerstattet werden.

Dadurch wird sichergestellt, dass CCfD beihilferechtskonform ausgestaltet werden können und nicht zur Schmälerung der Anreize für weitere Innovationen und Optimierungen führen.

Nicht selten übersteigen die Betriebskosten über die gesamte Laufzeit die Investitionskosten um ein Vielfaches, sind angesichts der langen Laufzeiten auch mit großen Unsicherheiten bezüglich der Preisentwicklung verbunden und hemmen damit die Investition. Zudem gibt es zahlreiche Instrumente, die Investitionen fördern. Betriebskosten sollten daher im Fokus von CCfD stehen. Einen entsprechenden Schwerpunkt hat auch das BMU in dem im April 2021 veröffentlichten Eckpunktepapier für eine Förderrichtlinie Klimaschutzverträge zur Umsetzung des Pilotprogramms „Carbon Contracts for Difference“ gesetzt. Antragsgegenstand sind innovative, technologisch ausgereifte Verfahren im industriellen Maßstab, die zu einer erheblichen Minderung (> 50 Prozent) nicht-energiebedingter und energiebedingter Emissionen an einem Industriestandort in Deutschland führen und technisch perspektivisch zur Erzielung der Treibhausgasneutralität geeignet sind.¹⁵⁷ Das Eckpunktepapier des BMU sieht dabei vor, über Klimaschutzverträge die erhöhten Betriebskosten zu kompensieren. Angesichts der Langfristigkeit und Komplexität der vorzuziehenden Investitionen erscheint zunächst eine nachsteuernde dynamische Ausgestaltung sinnvoll.¹⁵⁸

Das MWIDE sieht – unterstützt durch einen Beschluss der Wirtschaftsministerkonferenz vom Juni 2021 – zudem eine Notwendigkeit von CCfD für Brückentechnologien, zum Beispiel die Einspritzung von grünem Wasserstoff in den Hochofen, um die Transformation so zeitnah wie möglich anzustoßen und die dringend benötigten positiven Effekte für das Klima herbeizuführen. Allerdings sollten die Laufzeiten der CCfD für Brückentechnologien begrenzt werden, um Lock-in-Effekte zu vermeiden und keine Anreize zu setzen, Investitionszyklen künstlich zu verlängern. Außerdem sollte klimaneutraler Wasserstoff grundsätzlich förderfähig sein. Dies schließt zwar in erster Linie grünen Wasserstoff ein – neben grünem Wasserstoff sollten für einen begrenzten Zeitraum zudem aber auch nachweislich klimaneutrale respektive klimapositive Wasserstoffarten anerkannt werden.

Im Pilotprogramm werden zunächst die Stahl-, Zement-, Kalk- und Ammoniakindustrie abgedeckt. Aber auch für weitere Branchen werden CCfD benötigt. Dabei geht es in einigen Branchen (wie zum Beispiel der Stahlindustrie) um Prozessveränderungen, welche die CO₂-Entstehung vermeiden. Gerade im Kontext des Carbon Managements müssen künftig aber zudem Technologien zur Abscheidung von CO₂ sowie innovative Prozesstechnologien zur Nutzung von Biomasse, Sekundärrohstoffen und CO₂ im Fokus stehen. Mit Blick auf die ganz konkret nötigen Investitionen für eine weitgehend geschlossene Kohlenstoffkreislaufwirtschaft erscheint dabei nicht nur die Fokussierung auf Betriebskosten, sondern vielmehr eine Gesamtkostenbetrachtung nötig.

Bei nationalen Förderungen über CCfD handelt es sich europarechtlich um Beihilfen, die bei der EU-Kommission notifiziert werden müssen. Die EU-Kommission hat Klimaschutzverträge grundsätzlich als angemessenes Instrument bezeichnet, um kohlenstoffarme Technologien in die Umsetzung zu bringen. Auf der anderen Seite kann ein nationales Programm für Klimaschutzverträge zu Wettbewerbsverzerrung im EU-Binnenmarkt führen, die von der EU-Kommission zu prüfen ist. Konkrete Vorgaben zu CCfD werden mit der Überarbeitung der Beihilfeleitlinien 2022 erwartet.

Eine umfassende Abstimmung des Instruments Klimaschutzverträge mit dem EU ETS steht noch aus. Auch ist ein EU-Programm für Klimaschutzverträge zu erwarten, was auch mit Blick auf das EU ETS und mögliche gegenläufige Wirkungen zu den Klimaschutzeffekten nationaler Programme zielführend wäre.

CCfD auf europäischer Ebene sollten vor allem die Lücken in Bezug auf eine Anrechnung von CCU-Anwendungen, in denen Kohlenstoff nicht permanent chemisch gebunden wird, und negative Emissionen schließen, sowie die aus dem CBAM resultierenden Risiken geschmälerter finanzieller Innovationsspielräume bei Einschränkung der freien Zuteilungen adressieren.



08

86–93

Unser Weg in eine Low Carbon Industry: Der Carbon Management Plan für Nordrhein-Westfalen



Das Ziel haben wir fest vor Augen. Unsere zentralen Maßnahmen und Forderungen ermöglichen die gemeinschaftliche, planvolle und stringente Ausgestaltung und Weiterentwicklung unserer klimaneutralen, wettbewerbsfähigen Low Carbon Industry in Nordrhein-Westfalen.

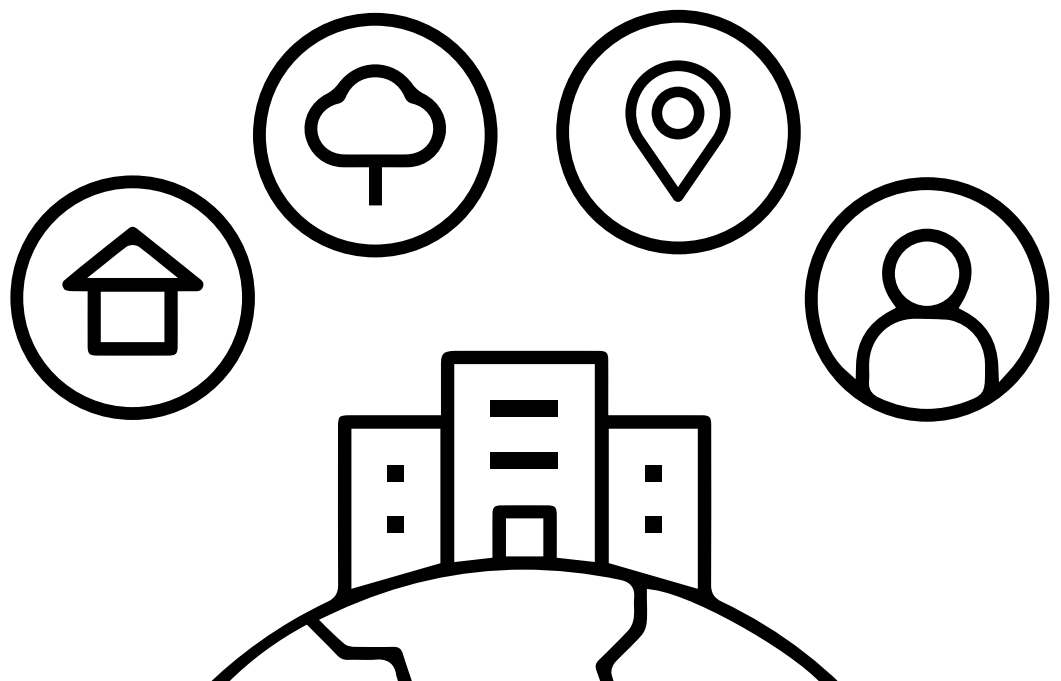


Im Carbon Management Plan für Nordrhein-Westfalen sind die aus Sicht des MWIDE zentralen Maßnahmen und Forderungen abgebildet, die zur Realisierung der Ziele erforderlich sind, nämlich der

- Senkung der CO₂-Emissionen in Nordrhein-Westfalen,
- langfristigen Sicherstellung einer nachhaltigen rohstofflichen Versorgung der nordrhein-westfälischen Industrie und
- Erhaltung und Stärkung des Industriestandorts Nordrhein-Westfalen.

Hier sind nicht nur Maßnahmen zur Umsetzung durch das MWIDE und die Landesregierung selbst festgelegt, sondern auch Forderungen formuliert, die an die Bundes- und die europäische Ebene sowie die hiesige Industrie gerichtet sind. Die Maßnahmen und Forderungen richten sich auf vier zentrale Handlungsfelder. Neben einer gezielten Dekarbonisierung wird es in den kaum oder nicht dekarbonisierungsfähigen Bereichen darum gehen, die Defossilisierung anzustreben und einen nachhaltigen Umgang mit Kohlenstoff und CO₂ in der Praxis umzusetzen. Nicht zuletzt ist die gesellschaftliche Einbindung ein Schlüsselement zur ganzheitlichen Transformation der nordrhein-westfälischen Industrie in eine nachhaltige, kohlenstoffreduzierte, klimaneutrale Zukunft.

Auf **4** zentrale Handlungsfelder richten sich die **Maßnahmen und Forderungen**.



Handlungsfeld I: Reduzierung der Kohlenstoffintensität

Wir möchten die Verringerung der Kohlenstoffintensität in der Industrie ermöglichen und die Umwandlung von einer High Carbon Industry in eine Low Carbon Industry beschleunigen. Der vollständige Verzicht auf Kohlenstoff ist längerfristig in solchen Bereichen erforderlich, die einer Dekarbonisierung grundsätzlich zugänglich sind. Seitens der Landesregierung unterstützte Entwicklungen, wie der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft, der Ausbau von Wind- und Solarenergie, der Ausbau von Energieinfrastrukturen wie Netzen und Speichern sowie die Förderung kohlenstofffreier Prozesse und Technologien, begleiten die Dekarbonisierungsanstrengungen der Industrie.

Maßnahme I.1: Gezielte Entwicklung kohlenstofffreier Technologien und Prozesse in Nordrhein-Westfalen

Einige industrielle Prozesse können mithilfe (verfahrens-) technischer Innovationen vollständig dekarbonisiert werden. Diese Prozesse haben das Potenzial, Gamechanger zu sein und die verbleibenden CO₂-Mengen deutlich zu senken. Das MWIDE wird die nordrhein-westfälische Industrie durch entsprechende Fördermöglichkeiten dabei unterstützen, Fortschritte bei der [Entwicklung kohlenstofffreier Prozesse](#) und Technologien zu erzielen. Die Chancen der damit verbundenen zukünftigen Wettbewerbsvorteile sind enorm und sollten unbedingt genutzt werden. Das Wirtschaftsministerium fördert hierzu bereits einige Projekte, so beispielsweise eines, das die Entwicklung der weltweit ersten CO₂-freien Aluminiumherstellung in Nordrhein-Westfalen zum Ziel hat.

Maßnahme I.2: Beschleunigter Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Nordrhein-Westfalen

Wasserstoff kann in der Industrie stofflich und energetisch genutzt werden und trägt somit in erheblichem Maße zur Dekarbonisierung der Industrie bei. Nordrhein-Westfalen hat mit der [Wasserstoff-Roadmap NRW](#)¹⁵⁹ im November 2020 eine klare Strategie zur Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft vorgelegt und die Arbeiten an konkreten Handlungsfeldern gestartet, nämlich am Ausbau und der Intensivierung internationaler Partnerschaften, an der Stärkung von Forschung und Innovation und daran, Potenziale im Maschinen- und Anlagenbau zu heben. Die Landesregierung unterstützt den Aufbau der Infrastruktur sowie der Erzeugungskapazitäten und sorgt mit Importstrategien und Technologieoffenheit gegenüber blauem Wasserstoff dafür, den Markthochlauf zu beschleunigen und den im Zuge der Transformation wachsenden Bedarf der Industrie zu decken.

Maßnahme I.3: Ausbau der Versorgung Nordrhein-Westfalens mit erneuerbaren Energien

Die Dekarbonisierung der industriellen Stromversorgung und -erzeugung in Nordrhein-Westfalen ist erforderlich, um die Klimaschutzziele sowie die langfristige Versorgungssicherheit bei zunehmender Knappheit fossiler Ressourcen zu gewährleisten und einem drohenden Renewables Pull¹⁶⁰ entgegenzuwirken, sodass Nordrhein-Westfalen als Industriestandort erhalten bleiben kann. Ausschlaggebend für die Umsetzung ist insbesondere die [gesicherte Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom in ausreichender Menge](#). Um den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis 2030 auf 50 Prozent zu erhöhen, werden Rahmenbedingungen verbessert, um mehr Photovoltaikanlagen auf Dächern von Gewerbe- und kommunalen Gebäuden, auf Äckern oder schwimmend auf Gewässern entstehen zu lassen und bestehende Windenergieanlagen durch neue, leistungsfähigere Anlagen zu ersetzen. Die Landesregierung wird zudem den Bau von bereits geplanten Stromleitungen aus Küstenregionen vorantreiben, um die nordrhein-westfälische Industrie mit Windstrom zu versorgen.

Handlungsfeld II: Nachhaltige Kohlenstoffnutzung

Wir wollen einen nachhaltigen Umgang mit Kohlenstoff in Nordrhein-Westfalen etablieren. Dazu zählt der adäquate Umgang mit Biomasse ebenso wie der gezielte Ausbau der sekundären Rohstoffbasis und die (Weiter-)Entwicklung von Carbon-Capture-and-Usage-Anwendungen. Die Voraussetzung für ein nachhaltiges Wirtschaften mit Kohlenstoff ist eine technologieoffene Abwägung der verschiedenen alternativen Wertschöpfungspfade – sowohl im Vergleich zu dem jeweiligen konventionellen Prozess als auch untereinander. Ökonomische, regulatorische und organisatorische Gegebenheiten, die die nachhaltige Kohlenstoffnutzung derzeit ebenso hemmen wie bilanzielle, werden wir kurzfristig angehen, um die schnelle Transformation in eine zukunftsfähige, zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft in Nordrhein-Westfalen zu ermöglichen.

Maßnahme II.1: Nachhaltige Nutzung biologischer Ressourcen in Nordrhein-Westfalen

Um die Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme zur Bereitstellung von Produkten, Verfahren und Dienstleistungen im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen, sollen 2022 Maßnahmen erarbeitet und Rahmenbedingungen definiert werden, die es ermöglichen, [neue Produkte und Dienstleistungen unter nachhaltiger Nutzung von biologischen Ressourcen](#) zu entwickeln. Dies ist insbesondere für Nordrhein-Westfalen als einer der in Europa führenden Chemie-, Pharma- und Energiestandorte von Bedeutung.

Maßnahme II.2: Carbon Monitoring in Nordrhein-Westfalen

Die Datenlage zum Kohlenstoffinventar Nordrhein-Westfalens ist derzeit ebenso unvollständig wie die Datenlage zu industriellen Kohlenstoffsenken. Insbesondere trifft dies auf die alternativen Kohlenstoffquellen Biomasse, Sekundärrohstoffe und CO₂ zu. Transparenz über die verfügbaren Mengen an zukunftsfähigen Kohlenstoffen in Nordrhein-Westfalen, deren Entwicklung und deren Nutzung

ist jedoch zentral, um die Transformation der nordrhein-westfälischen Industrie in eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Low Carbon Industry zu bewerkstelligen. Das MWIDE wird daher in Zusammenarbeit mit dem LANUV ein kontinuierliches und öffentlich zugängliches [Carbon Monitoring für Nordrhein-Westfalen](#) aufbauen. Im Kern steht das Monitoring alternativer Kohlenstoffquellen und industrieller Kohlenstoffsenken. Das Carbon Monitoring soll dazu beitragen, [Vernetzungen](#), die in der High Carbon Industry über Jahrzehnte historisch gewachsen sind (insbesondere auch, was die branchenfremde Nutzung von Nebenprodukten betrifft), in einer zukünftigen Low Carbon Industry schneller zu identifizieren und herzustellen, um die Wirtschaftlichkeit dieser Ökonomie zu erhöhen.

Maßnahme II.3: Benchmark nachhaltiger Wertschöpfungspfade mit Fokus Nordrhein-Westfalen

Die Grundvoraussetzung für eine nachhaltige Kohlenstoffnutzung ist, dass die CO₂-Bilanz des alternativen Kohlenstoff-Wertschöpfungspfade mindestens so vorteilhaft ist wie die des konventionellen Pfades. Darüber hinaus ist aber zusätzlich den Kriterien Energieeffizienz, Wasserstoffbedarf, Produktqualität, Produktschädlichkeit und Marktpotenzial Rechnung zu tragen – insbesondere, wenn es um die Auswahl der Alternative geht. Der Vergleich zwischen verschiedenen alternativen Wertschöpfungspfaden ist überaus komplex und fallspezifisch. Welcher alternative Wertschöpfungspfad für welches Produkt ideal ist, muss somit zunächst ausgelotet werden. Aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Aspekte, Technologien, Verfahrenswege und Randbedingungen soll daher als Orientierungshilfe ein [Benchmark alternativer Wertschöpfungspfade](#) in Abhängigkeit des jeweiligen (End-)Produktes durchgeführt werden. Besonderheiten der nordrhein-westfälischen Industrie sollen hier berücksichtigt werden, weshalb diese Untersuchung in enger Zusammenarbeit mit den ansässigen Unternehmen erfolgen wird. IN4climate.NRW wird die Aktivitäten zur Erstellung des Benchmarks aussteuern.

Forderung II.1: Level Playing Field und Carbon-Leakage-Schutz

a) CCU im EU ETS

Im „Fit for 55“-Paket der Europäischen Kommission wurde festgelegt, dass die **Nutzung von CO₂ im EU ETS** anrechenbar ist, sofern es im Produkt permanent chemisch gebunden wird. Eine Definition, ab wann beziehungsweise unter welchen Voraussetzungen das CO₂ als „permanent chemisch gebunden“ gilt, steht noch aus. Hier muss die Europäische Kommission zeitnah eindeutige Kriterien beziehungsweise eine Liste anrechenbarer CCU-Produkte vorlegen. Um diesen Prozess zu beschleunigen, sollte die Industrie Modellprojekte und Reallabore starten, um Blaupausen und Randbedingungen für die **Definition „permanent chemisch gebundenes CO₂“** zu erarbeiten.

b) CCfD auf europäischer Ebene

Um bis 2030 Emissionseinsparungen von 61 Prozent im Vergleich zu 2005 erzielen zu können, ist die Anhebung der jährlichen Kürzung der Emissionen im EU ETS auf 4,2 Prozent vorgesehen. Zudem sollen die bisherigen kostenlosen Zuteilungen gemäß den Plänen der EU-Kommission durch das mit Unsicherheiten und methodischen Schwierigkeiten behaftete System des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) ersetzt werden. Durch diese Umstellung steigt das Carbon-Leakage-Risiko für Industrieunternehmen in NRW signifikant. Um die schnellere Reduzierung abzufedern, werden **Carbon Contracts for Difference auf europäischer Ebene** benötigt. Das MWIDE wird sich auf europäischer Ebene dafür einsetzen, dass Carbon-Capture-and-Usage-Anwendungen, die nicht in die Kategorie „permanent chemisch gebundenes CO₂“ fallen, hier berücksichtigt werden, da eine Abbildung im EU ETS (zum jetzigen Zeitpunkt) nicht praktikabel scheint. Dasselbe gilt für die Technologieentwicklung zur Erzeugung von **negativen Emissionen**, die kurzfristig nicht im EU ETS berücksichtigt werden sollten, um keine falschen Anreize (Kompensation statt Vermeidung) zu setzen.

c) CBAM konsensfähig machen

Grundsätzliche Unsicherheiten und Risiken des CBAM hinsichtlich Bilanzierung, Greenwashing oder Gegen schlägen anderer Staaten können auch durch die dringend benötigten CCfD nicht geschmälert werden. Diesen Risiken muss daher mit einer robusten und **konsensfähigen Ausgestaltung des CBAM** oder anderen geeigneten Instrumenten entgegengewirkt werden.

Forderung II.2: Adäquate Förderlandschaft für eine Low Carbon Industry

Low-Carbon-Breakthrough-Technologien werden in Deutschland auf absehbare Zeit nicht wettbewerbsfähig sein können. Damit die Transformation der Industrie in eine kreislauforientierte Wirtschaftsweise mit reduzierter Kohlenstoffintensität gelingen kann, wird eine adäquate Förderlandschaft benötigt.

a) Anpassung von Bundesförderrichtlinien

Das 2021 vom BMWi aufgelegte, zweiphasige Förderprogramm **„CO₂-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien“**, mit dem zunächst F&E-Projekte im Bereich CCU und später große CCU/CCS-Demonstrationsprojekte gefördert werden sollen,¹⁶¹ ist allein nicht ausreichend. Die Circular Economy ist in vielen Bereichen ein wichtiger Baustein zur Erreichung der Klimaschutzziele und muss daher in die entsprechenden Strategien und Förderprogramme integriert werden. Daher muss zudem die Richtlinie **„Dekarbonisierung der Industrie“** des BMU angepasst werden, da der Anwendungsfokus derzeit noch zu eng ist und viele Projekte, insbesondere solche, die einen sekundärrohstoffbasierten Ansatz wählen oder auf neue, klimafreundliche Produkte setzen, nicht förderfähig sind.

b) Aufstockung und Ausweitung des CCfD-Pilotprogramms auf Bundesebene

Neben reinen Investitionsförderungen muss das **CCfD-Pilotprogramm** zeitnah einsetzen und möglichst aufgestockt beziehungsweise ausgeweitet werden. Insgesamt werden auf Bundesebene deutlich mehr Mittel benötigt als aktuell in den Fördertöpfen vorhanden sind.

c) Bundesmittel und Kofinanzierung für ein IPCEI LCI

Mittel für das angekündigte **IPCEI Low Carbon Emissions Industry (LCI)** müssen sowohl auf Bundes- als auch auf Landesebene in ausreichendem Maße bereitgestellt werden. Zudem wird sich Nordrhein-Westfalen dafür einsetzen, dass für die Kofinanzierung durch die Länder eine Quote festgelegt wird, die insbesondere auch von industriintensiven Bundesländern wie Nordrhein-Westfalen bewältigt werden kann. Ähnlich wie beim IPCEI H₂ wird das MWIDE über die Landesinitiative IN4climate.NRW Unternehmen bei der Vernetzung mit Projektkonsortien unterstützen.

Forderung II.3: Ausbau der sekundären Rohstoffbasis

Sekundäre Rohstoffe müssen zukünftig die neuen, bevorzugt genutzten Rohstoffe der Industrie werden.

a) Standards, Grenzwerte und Prüfvorschriften auf europäischer Ebene

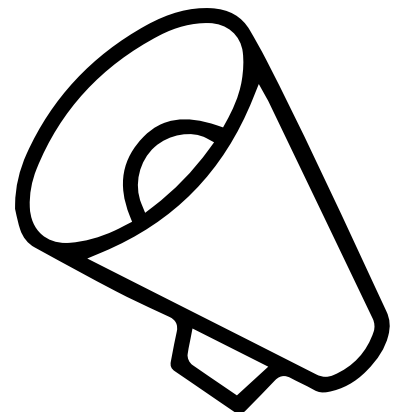
Um den Einsatz von Sekundärrohstoffen anzureizen, sind anwendungsfallspezifische Prüfvorschriften und grenzwertbasierte Einstufungskriterien vonnöten, die Akteuren aus der Wirtschaft einen Handlungsrahmen aufzeigen und **Leitplanken sowie Zielmarken für die Entwicklung von neuen Produkten auf Basis von sekundären Rohstoffen** setzen. MWIDE wird sich dafür einsetzen, dass in der bundesdeutschen Kreislaufwirtschaft, der Ressourcenpolitik und der Abfallvermeidung ein entsprechender Orientierungsrahmen gesetzt wird.

b) Anrechenbarkeit von chemischem Recycling

Speziell für die Kunststoffindustrie ist es notwendig, die anrechenbaren Recyclingverfahren bei den Recyclingquoten im Verpackungsgesetz laufend zu hinterfragen und den aktuellen Erkenntnissen aus Forschung und Entwicklung zum chemischen/rohstofflichen Kunststoffrecycling anzupassen. **Chemisches Recycling sollte zukünftig auf Recyclingquoten angerechnet werden können.** MWIDE wird der Bundesregierung einen entsprechenden Vorschlag vorlegen.

c) Optimierte Management von Sekundärrohstoffen

Um die Verfügbarkeit und die Ausnutzung potenzieller Sekundärrohstoffe zu erhöhen, werden neben industriellen Synergien zudem **verbesserte Recycling-Modelle** benötigt. Dies schließt Konzepte für effizientes Abfallmanagement (Exportstopp) und logistische Aspekte (zentrale/dezentrale Verwertung) ebenso ein wie Anreizsysteme und zukunftsfähige Geschäftsmodelle, bei denen die Frage nach dem Eigentum neu gestellt wird. Hier ist die Bundesregierung (zum Beispiel Abwrackprämie bei Renovierung, Quoten für Scherben) ebenso gefragt wie die Industrie (Rücknahmesysteme/Vermieten statt Verkaufen) selbst.



Handlungsfeld III: CO₂-Management und Infrastruktur

Wir werden uns dafür einsetzen, dass geeignete Optionen zur Abscheidung, zum Transport, zur Nutzung und zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid nutzbar werden. Diese müssen ergebnisoffen und zügig geprüft werden, um deren zeitnahe und langfristige Beiträge zur Emissionsreduktion zu ermöglichen, ohne die unsere Klimaschutzziele nicht zu erreichen sind. Dafür, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden, werden wir uns auf Bundesebene einsetzen. Zeitgleich werden wir die CO₂-Infrastrukturplanung in Nordrhein-Westfalen vorantreiben.

Maßnahme III.1: CO₂-Transportinfrastruktur für Nordrhein-Westfalen

a) Planung eines CO₂-Transportnetzes

Erste Überlegungen in Bezug auf eine mögliche CO₂-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen bestehen bereits. Diese berücksichtigen jedoch weder die Nutzung von abgeschiedenem CO₂ noch wurde die Möglichkeit einer Umwidmung vorhandener Gasleistungen mitbetrachtet. Da eine Transportinfrastruktur unerlässlich sein wird, um die Klimaschutzziele zu erreichen, wird die Landesregierung die konkrete Planung und Vorbereitung einer [CO₂-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen](#) auf Basis von CO₂-Quellen und -Senken in Nordrhein-Westfalen unterstützen. Dabei soll auch die Möglichkeit der Umnutzung bestehender und verfügbarer Leitungssysteme geprüft werden unter Berücksichtigung der Überlegungen hinsichtlich einer H₂-Infrastruktur und des [Anschlusses an benachbarte Regionen](#) (Niederlande, Flandern beziehungsweise Norddeutschland).

b) Technische Erprobung des CO₂-Transportes

MWIDE wird den [Aufbau eines Reallabors](#) unterstützen, in dem die relevanten Aspekte beim CO₂-Transport demonstriert werden (CO₂-Aufreinigung, Transport unterschiedlicher Aggregatzustände des CO₂). Industrieunternehmen sollten hierzu möglichst konkrete Analysen und Prognosen in Bezug auf die Entwicklung der CO₂-Bedarfe (Senken) bis 2045 durchführen und darstellen, um bei der Auslegung und Planung einer Infrastruktur berücksichtigt werden zu können. Das Handlungskonzept Synthetische

Kraftstoffe, das im Dezember 2021 veröffentlicht wird, liefert weitere wichtige Erkenntnisse zu möglichen CO₂-Senken in Nordrhein-Westfalen.

Maßnahme III.2: Nationale und internationale CCX-Kooperationen mit Nordrhein-Westfalen

Ein nachhaltiges Carbon Management und eine funktionierende Low Carbon Industry können in Nordrhein-Westfalen nur entstehen, wenn [Kooperationen](#) hinsichtlich Carbon Capture and Usage / Storage / Transport (CCX) mit angrenzenden beziehungsweise CCU- und CCS-fördernden Bundesländern und Ländern etabliert, ausgebaut und/oder gefestigt werden. Eine frühzeitige und übergreifende Abstimmung von geplanten/möglichen Strukturen, Mengen und Preisen kann Fehlinvestitionen reduzieren. Das MWIDE, auch über die Initiative IN4climate.NRW, nutzt dazu etablierten internationalen Austausch, zum Beispiel im Rahmen der Industry Transition Platform, mit anderen Industrieregionen. Insbesondere mit den europäischen CCS-Vorreiterländern wie Norwegen, Schottland oder den Niederlanden erfolgt bilateraler Austausch mit Projekten, Unternehmen und staatlichen Institutionen. Die Carbon Management Strategie wird als Anlass genommen, den nationalen und internationalen Austausch weiter zu intensivieren und [gemeinsam Umsetzungsschritte](#) festzulegen.

Maßnahme III.3: Förderwettbewerb „CCU-Modellregionen in Nordrhein-Westfalen“

Um den [Markthochlauf der CO₂-Abscheidung und -Nutzung](#) im Vorfeld einer flächendeckenden CO₂-Infrastruktur zu ermöglichen, wird das MWIDE im Rahmen eines Wettbewerbs drei bis fünf Modellregionen in Nordrhein-Westfalen inklusive der dortigen Akteure identifizieren, in denen die Abscheidung und Nutzung von CO₂ gefördert werden soll. Ausschlaggebend für die Auswahl wird dabei neben der räumlichen Nähe von CO₂-Quellen und -Senken das Klimaschutz- und Skalierungspotenzial der Konzepte sein. Der Aufruf zum Förderwettbewerb wird im ersten Quartal 2022 starten.

Forderung III.1: Ambitioniertere Anpassung des rechtlichen Rahmens zum CO₂-Handling in Deutschland

Derzeit bestehen noch rechtliche Hürden, die direkt dem Transport und der Speicherung und somit indirekt auch der Nutzung von CO₂ entgegenstehen. Dieses Handlungsfeld sollte seitens der Bundesregierung schnellstmöglich angegangen werden. Insbesondere die [Ratifizierung des Amendments zum Artikel 6 des London-Protokolls](#) zum Meeresschutz, welches den grenzüberschreitenden Transport von CO₂ zum Zweck der unterirdischen CO₂-Speicherung erlaubt und CCS im Ausland erst möglich

macht, ist jetzt erforderlich, um Bewegung in diesen Bereich zu bringen. Zudem setzt die Ratifizierung auch eine [Anpassung des innerstaatlichen Rechtsrahmens](#) sowie bilaterale oder multilaterale Vereinbarungen, in denen die Zuständigkeit der beteiligten Länder für Genehmigungen, Monitoring und Umgang mit Leckagen geregelt wird, voraus. In diesem Zusammenhang sollten auch [Vorgaben zur CO₂-Beschaffenheit](#) im jeweiligen Anwendungskontext (Abscheidung, Transport, Nutzung, Speicherung) gemacht werden. Außerdem sollte eine Aufnahme der CO₂-Transportinfrastruktur im Netzentwicklungsplan geprüft werden. Das MWIDE wird sich dafür einsetzen, dass die Bundesregierung deutlich ambitionierter an der Umsetzung dieser Rahmenbedingungen arbeitet und die damit verbundenen Aktivitäten priorisiert, um die Klimaschutzziele nicht zu gefährden.

Handlungsfeld IV: Gesellschaftlicher Diskurs

Wir wollen die Einbindung der Gesellschaft in Nordrhein-Westfalen durch frühzeitige Einbindung, transparente Informationen und nachvollziehbare, einvernehmlich gestaltbare Prozesse auf eine neue Ebene heben. Die skizzierte Transformation der Industrie geht sicherlich mit umfassenden Veränderungen einher, die auch der Akzeptanz in der Gesellschaft bedürfen. Gerade deshalb wollen wir die Zukunft unseres Bundeslandes mit den Bürgerinnen und Bürgern gemeinsam und auf Augenhöhe gestalten.

und Wissen. Das MWIDE wird daher in Zusammenarbeit mit IN4climate.NRW und weiteren Akteuren und Multiplikatoren in Nordrhein-Westfalen entsprechende Formate zum Wissenstransfer sowie Informations- und Diskussionsangebote schaffen. Um die Reichweite zu erhöhen, wird MWIDE auch einen Schwerpunkt auf leicht zugängliche digitale Angebote setzen.

Maßnahme IV.1: Carbon Education in Nordrhein-Westfalen

Wie schnell der Übergang in eine Low Carbon Industry gelingen und wirtschaftlich werden kann, ist insbesondere auch von der Nachfrage nach nachhaltigen, kohlenstoffarmen Produkten abhängig. Die gesamtgesellschaftliche Veränderungsbereitschaft ist aufgrund eines stärkeren Problembewusstseins in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen. Die Voraussetzung für eine erhöhte Zahlungsbereitschaft ist insbesondere das [Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge](#) auf Basis von Transparenz

Forderung IV.1: Sustainable Carbon Label

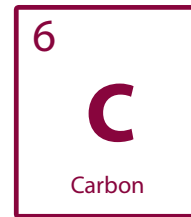
Es wird ein [bundesweites Label für Produkte](#), welche aus nachhaltigen Wertschöpfungspfaden entstanden sind, benötigt. Dieses darf weder von der Regierung noch von der Industrie (oder den Verbänden) vergeben werden, sondern muss von einer unabhängigen Institution gemäß fester und nachvollziehbarer Kriterien ausgehen. Nordrhein-Westfalen wird sich dafür einsetzen, dass ein solches Label in den bundesländerübergreifenden Diskussionsprozess eingebracht und mit der Bundesebene diskutiert wird.

Der Carbon Management Plan für Nordrhein-Westfalen (Abbildung 2, Seite 12–13) stellt die Maßnahmen und Forderungen samt ihren Abhängigkeiten im zeitlichen Verlauf dar.

09

94-95
Ausblick

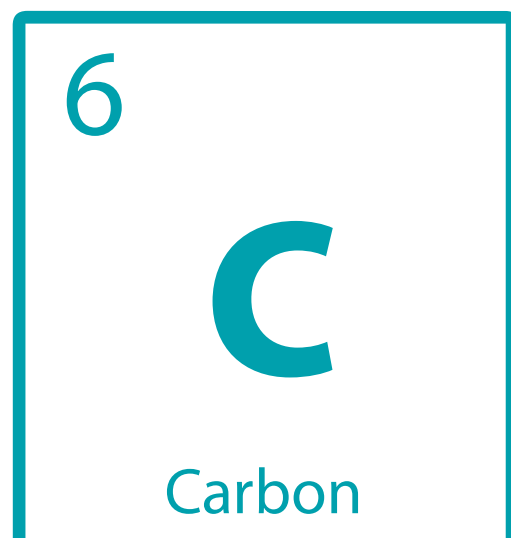
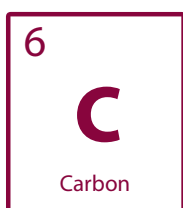




Wichtige Weichen, die für die Transformation in eine Low Carbon Industry notwendig sind, können und sollten noch in diesem Jahr gestellt werden. Vor allem die Schaffung der rechtlichen Rahmenbedingungen für das CO₂-Handling in Deutschland und die Verbringung über die Landesgrenzen hinaus haben hier zentrale Bedeutung. Nur so können Planungsaktivitäten für einen CO₂-Transport vertieft und eine Infrastruktur, deren Aufbau zeitintensiv sein wird, rechtzeitig angegangen werden. Zudem muss oberste Priorität haben, Investitionssicherheiten zu schaffen, um die in allen Branchen innerhalb der nächsten Jahre anstehenden Reinvestitionen klimaschutzadäquat zu nutzen. Dafür müssen Carbon Contracts for Difference endlich an den Start gebracht und die zersplitterte Förderlandschaft in Deutschland harmonisiert werden. Darauf werden wir hinwirken.

Die im Carbon Management Plan verorteten Maßnahmen werden wir wiederum im intensiven Austausch und in Zusammenarbeit mit allen relevanten Akteuren angehen.

Unsere Carbon Management Strategie soll hierbei nicht als abschließende Abhandlung verstanden werden, sondern vielmehr als eine Zielvision und ein Impuls für gemeinschaftliche Weiterentwicklung und Gestaltung unserer Low Carbon Industry.

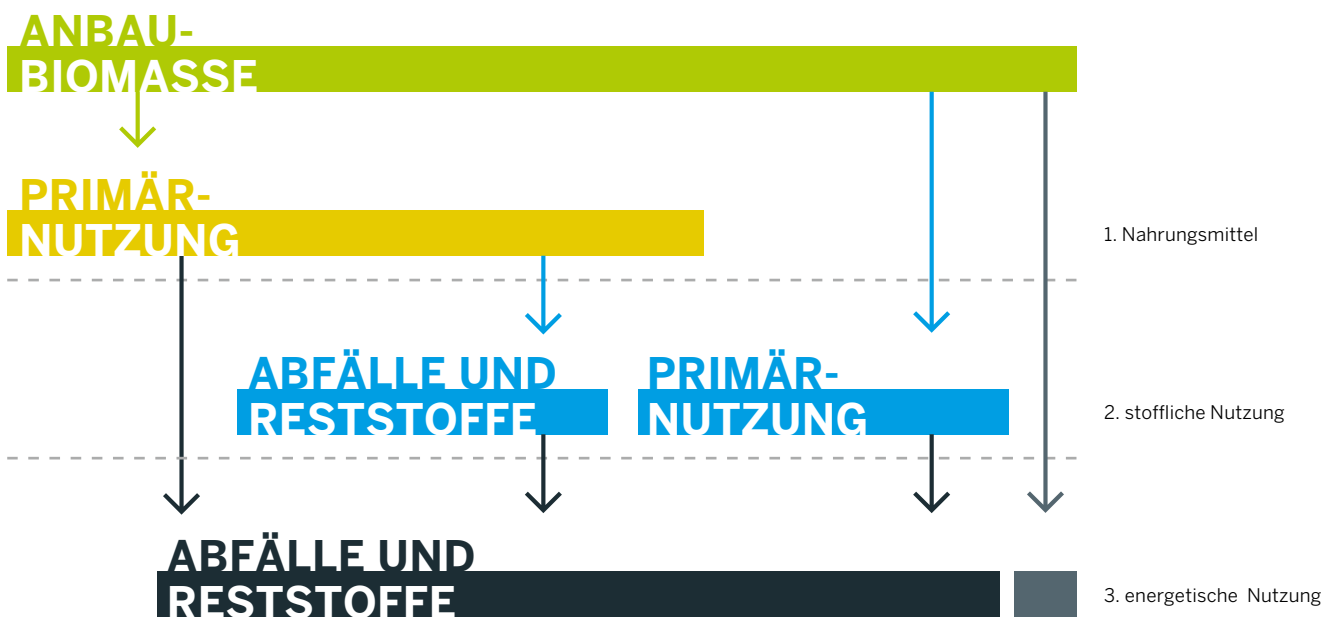


Anhang

Deep Dive zu Abschnitt 4.2: Kaskadennutzung zur Steigerung der Nachhaltigkeit des Biomasseinsatzes

Abgesehen von der Quelle wird die Nachhaltigkeit bio-basierter Wertschöpfungsketten häufig auch insbesondere durch deren Kaskadennutzung determiniert (vgl. Abbildung 16). Die eingesetzte Biomasse sollte möglichst gut (aus-)genutzt werden statt ausschließlich zur direkten Umwandlung in Bioenergie für Strom, Wärme und Kraftstoffe verwendet zu werden. Hier ist die Abfallwirtschaft gefragt: Verfahren müssen dahingehend angepasst werden, dass Erfassung und Logistik für biogene Abfälle und Reststoffe deren Nachnutzung gewährleisten.¹⁶²

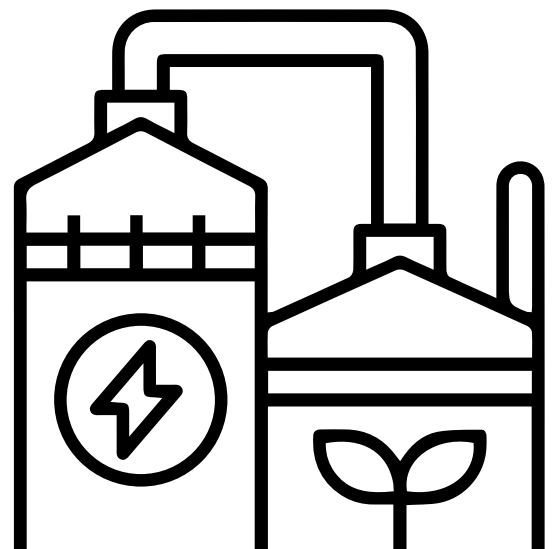
Abbildung 15: Kaskadennutzung zum nachhaltigen Umgang mit Biomasse¹⁶³



Ein weiteres Beispiel dafür, wie die kaskadierte Nutzung von Biomasse zum Klimaschutz beitragen kann, ist die Überdüngung mit Gülle, einem Problemthema in der Landwirtschaft. Hierbei vergasen die Methanmengen, die der Boden nicht mehr aufnehmen kann, in die Luft. Da Methan ein vielfach klimaschädlicheres Gas als CO_2 ist, entwickelt sich ein positiver Effekt, wenn die Gülle nicht einfach auf die Felder gebracht wird, sondern in Biogasanlagen zu Methan vergärt und anschließend in einem Blockheizkraftwerk verbrannt wird. Dieser Verwertungspfad hat gleich mehrere positive Effekte:

- Die Biogasverstromung bietet wegen der Speicherfähigkeit des Einsatzbrennstoffs und der daraus resultierenden hohen Verfügbarkeit einen Beitrag zur Stromversorgungssicherheit, die mit Blick auf den Kernenergie- und Kohleausstieg anderweitig erhalten werden muss.
- Der Dünger enthält nach der Nutzung in der Biogasanlage kein Methan mehr. Zugleich ist das im Blockheizkraftwerk entstehende CO_2 etwa 30 Mal klimafreundlicher als das ansonsten auf den Feldern vergasende Methan.¹⁶⁴ Es entsteht also im Vergleich eine positive Klimabilanz.
- Würde das an den Blockheizkraftwerken entstehende CO_2 abgeschieden und wiederum in stoffliche Produkte integriert, könnte der Emissionszeitpunkt noch weiter hinausgezögert werden.
- Würde das CO_2 abgeschieden und dauerhaft gespeichert, bestünde sogar die Möglichkeit zur Erzeugung von negativen Emissionen durch Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS).

Das in Biogasanlagen entstehende Methan, das bisher weitgehend verstromt wird, könnte alternativ auch zu Wasserstoff weiterverarbeitet werden. Eine vielversprechende Alternative, die das möglich macht, ist die thermische Spaltung von Methan. Dieses sogenannte „Methan-Cracking“ macht das Energiepotenzial von Erdgas ohne CO_2 -Emissionen nutzbar. Zugleich entsteht dabei elementarer Kohlenstoff, der der Industrie als Rohstoff dienen kann. Die Technologie bedarf jedoch noch weiterer Forschung und Entwicklung.¹⁶⁵ Zudem können die daraus generierbaren Mengen an Wasserstoff nicht ansatzweise die bestehenden Bedarfe decken.¹⁶⁶



Deep Dive zu Abschnitt 4.3: Gewinnung und Nutzung von Sekundärrohstoffen

Aus Sekundärrohstoffen hergestellte Produkte sind nicht notwendigerweise schlechter als Primärprodukte. Dennoch kann es gerade in gewissen Bereichen zu Qualitätseinschränkungen, wie beispielsweise zu geringfügigen farblichen Abweichungen, kommen. Hier stellt sich vor allem auch die Frage nach der Toleranz der Konsumenten. Vordergründig ist jedoch beim Einsatz von Sekundärrohstoffen insbesondere die Frage nach enthaltenen Schadstoffen.

Bei Schadstoffen ist zwischen zwei Gefahrenpotenzialen zu unterscheiden:

- Gefahrenpotenzial für den Menschen
- Gefahrenpotenzial für die Umwelt

Des Weiteren stellen Störstoffe ein Gefahrenpotenzial für das Produkt selbst (im Sinne von Qualitätsmängeln) dar.

Ob der Stoff letztlich ein Risiko für Mensch, Umwelt oder Produktqualität darstellt, hängt sehr vom jeweiligen Anwendungsfall und der ergriffenen Schutzmaßnahmen ab. Auch Stoffe mit einem Gefahrenpotenzial, können so wiederverwendet werden, dass sie kein Risiko für Mensch und Umwelt darstellen – indem sie zum Beispiel von schadstofffreien Stoffen umschlossen werden. Die Nachhaltigkeit der Kohlenstoffquelle „Sekundärrohstoff“ ist somit stark vom spezifischen Anwendungsfall und -zeitpunkt abhängig.

Die Qualität von Sekundärrohstoffen unterscheidet sich je nach Anfall und Sammlung. Post-Consumer-Abfälle fallen nach der beziehungsweise durch die Nutzung von Produkten bei den Verbrauchern, das heißt bei Einzelpersonen, in Haushalten und Büros, an. Post-Industrial-Abfälle (auch Post-Production- oder Pre-Consumer-Abfälle genannt) entstehen dagegen bereits während der Herstellung oder Produktion im Industrieunternehmen. Die direkte Weiterbeziehungsweise Wiederverwertung von Post-Industrial-Abfällen ist in der Regel durch Qualitätsanforderungen in der Produktion begrenzt. Bei Post-Consumer-Abfällen sind insbesondere logistische Fragen der Rücknahme und Verschmutzung/Aufreinigung zu klären.

Hinsichtlich der Sekundärrohstoffnutzung kann, abgesehen von der Nutzung von Nebenerzeugnissen (vgl. Kapitel 3), zwischen stofflichem Recycling und der energetischen Verwertung von Reststoffen unterschieden werden. Bei der energetischen Reststoffnutzung handelt es sich im Gegensatz zur stofflichen Verwertung immer um ein Downcycling, das möglichst vermieden werden sollte. Die stoffliche Wiederverwertung, also das Re- oder Upcycling, ist der energetischen Verwertung somit vorzuziehen.

Um Sekundärrohstoffe im Sinne der erneuten Nutzung für die Produktherstellung aufzubereiten, sind Verfahren zur Zerkleinerung, Trennung und Sortierung erforderlich. Hierbei spricht man von mechanischem (oder auch von physikalischem beziehungsweise von werkstofflichem) Recycling, das zur Vorbereitung von Metallschrotten, Kunststoffabfällen, Altpapier, Altglas und Betonabbruch zwecks ihrer Wiederverwendung eingesetzt werden kann. Der mechanischen Vorbereitung folgen Verfahren, die aus dem Rezyklat neue Werkstoffe entstehen lassen (vgl. Abbildung 17).

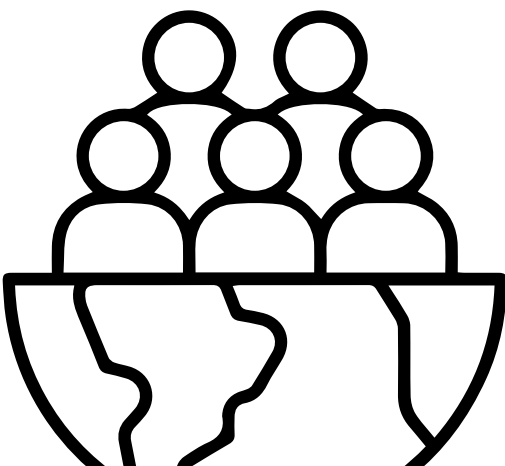
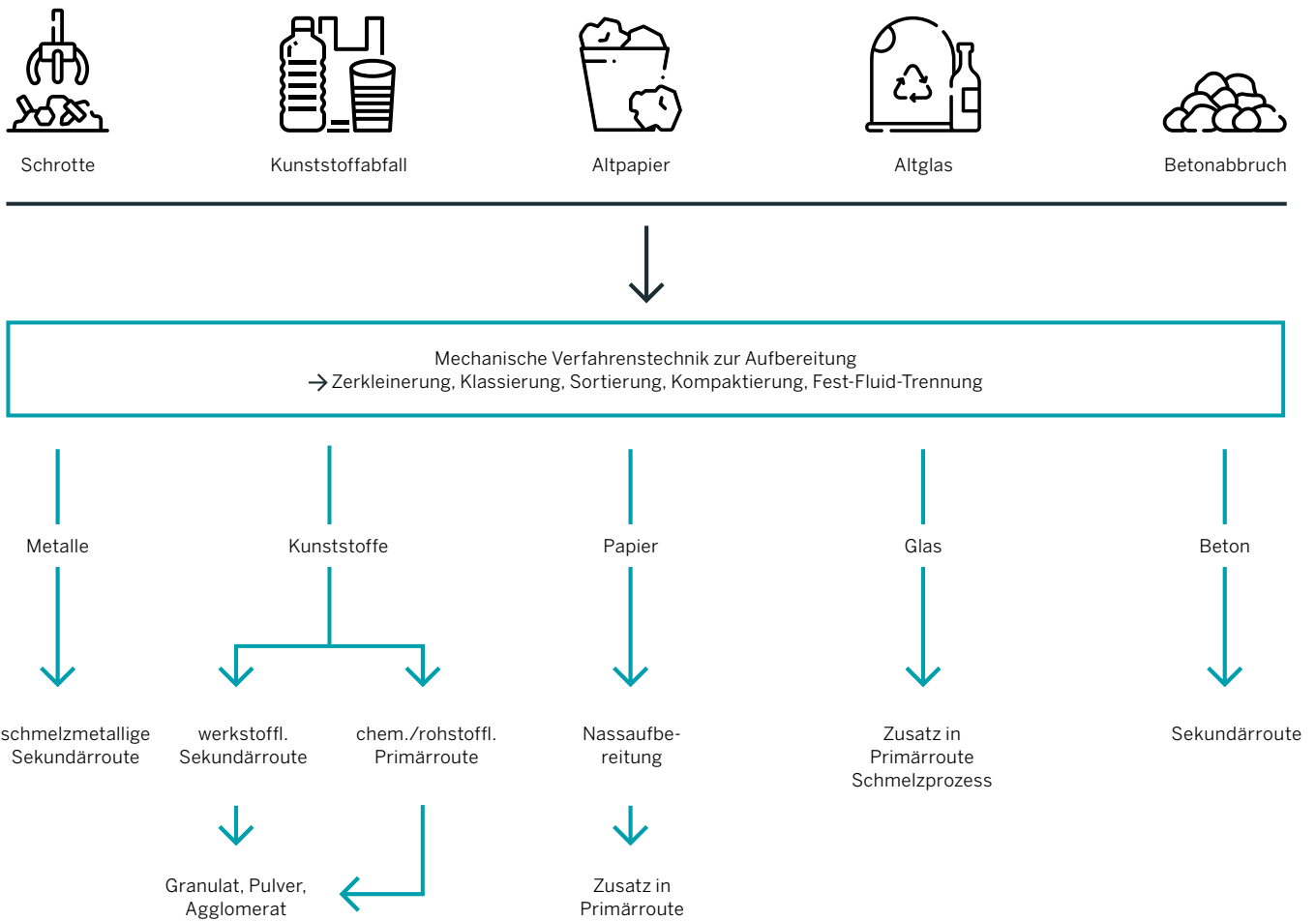


Abbildung 16: Mechanisches Recycling



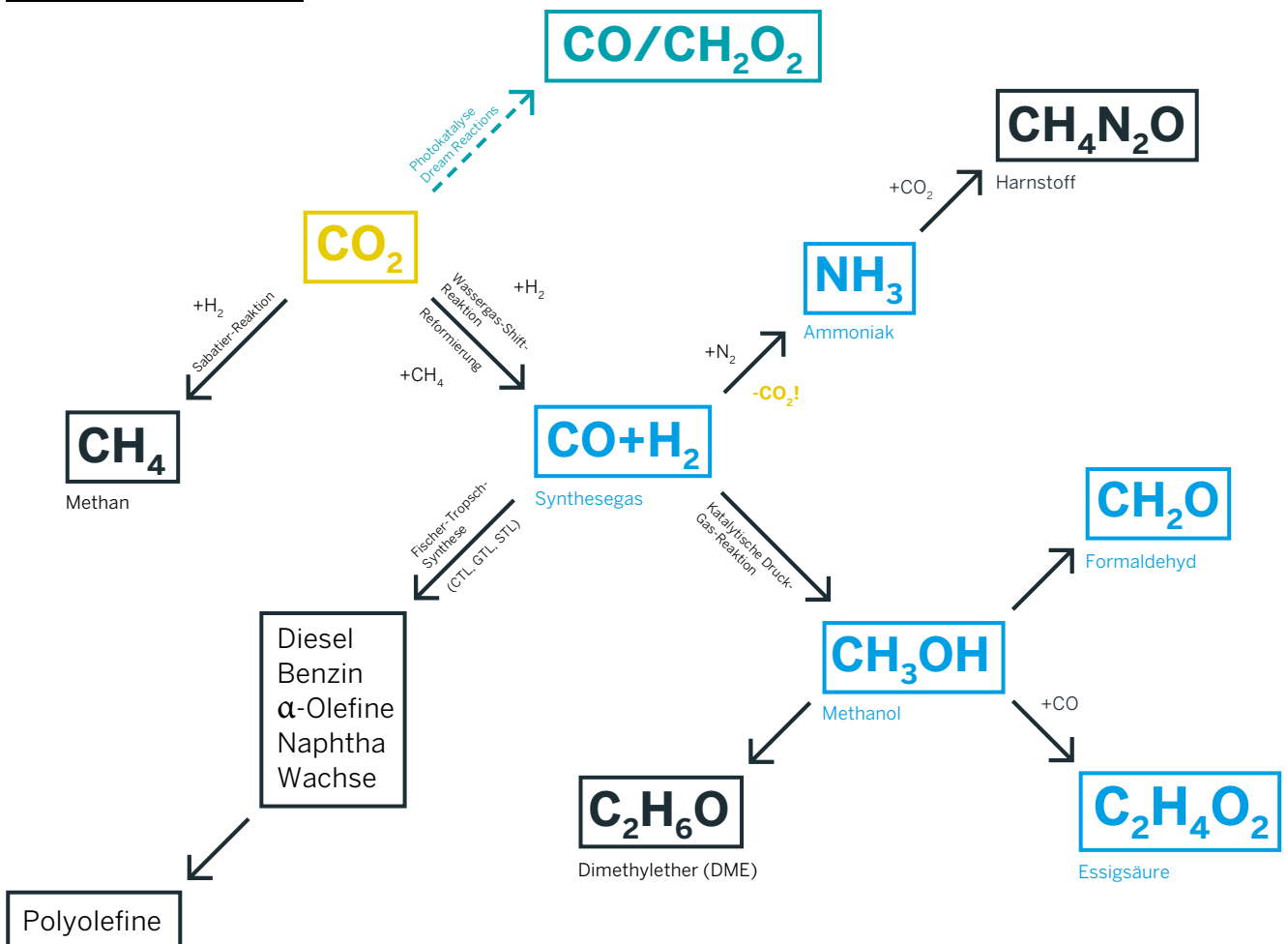
Stoßen werkstoffliche Verfahren aufgrund der Heterogenität des Rezyklates an ihre Grenzen, gibt es für die Verwertung von Kunststoffabfällen die Möglichkeit des chemischen Recyclings. Chemisches oder rohstoffliches Recycling bezeichnet dabei die (thermo-)chemische Umwandlung der Kunststoffpolymere in ihre chemischen Grundbausteine.¹⁶⁷

Deep Dive zu Abschnitt 5.1.3: CCU-Prozesse in der chemischen Industrie

Folgende CO₂-Verwertungswege können zur Herstellung chemischer Erzeugnisse genutzt werden (vgl. Abbildung 18)^{168,169}:

- Umkehrung der Wassergas-Shift-Reaktion zur Erzeugung von Synthesegas
- Direkte Umsetzung (Dream Reactions), beispielsweise mittels Photokatalyse
- Heterogen-gaskatalytische Umsetzung des CO₂ mit Wasserstoff zu Methan (Methanisierung)
- Biologische Verwertung durch autotrophe Mikroorganismen

Abbildung 17: CCU-Prozesse in der chemischen Industrie¹⁷⁰



Synthesegas und Folgeprodukte

Die Herstellung von Synthesegas, einer Mischung aus CO und H₂, erfolgt über katalytische Prozesse, in denen die Reinheit eine entscheidende Rolle spielt. Je nach Quelle kann abgetrenntes CO₂ Spuren von Schwefel und Schwermetallen enthalten, die als Katalysatorgifte wirken.¹⁷¹ Da sich die entsprechend erforderliche aufwändige Reinigung der Abgase negativ auf die Energie- beziehungsweise CO₂-Bilanz dieser chemischen Verwertungswege auswirkt,¹⁷² empfiehlt sich die Abscheidung aus Quellen mit geringer Verunreinigung, zum Beispiel aus unternehmenseigenen chemischen Prozessen¹⁷³, zur Herstellung von Synthesegas. Dies erspart zudem Transportwege.

Die Umsetzung von CO₂ zu Synthesegas kann entweder über die Umkehrung der Wassergas-Shift-Reaktion ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$) oder mittels trockener Reformierung mit Methan ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \leftrightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$) in einem katalytischen Hochtemperaturverfahren erfolgen.¹⁷⁴ Hier ist der für die umgekehrte Wassergas-Shift-Reaktion große Bedarf an grünem Wasserstoff gegen die Verfügbarkeit von nicht-fossilem CH₄ projektspezifisch abzuwägen.

Synthesegas kann in der Herstellung von Chemierohstoffen wie Harnstoff verwendet werden. Über das Synthesegas-Folgeprodukt Methanol können Chemikalien oder chemische Zwischenprodukte, wie beispielsweise Formaldehyd und Essigsäure, aber auch synthetische Kraftstoffe hergestellt werden. Alternativ können synthetische Kraftstoffe über die sogenannte Fischer-Tropsch-Synthese direkt aus Synthesegas erzeugt werden. Dieser Prozess ist jedoch wenig selektiv, sodass aufwändige Aufbereitungsschritte (Raffinierung) zur Erzeugung marktfähiger Kraftstoffe notwendig sind.¹⁷⁵

Methan

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien werden zunehmend großtechnische Speicher benötigt. Eine langfristige Speicheroption für Strom stellt die Überführung in Wasserstoff oder Methan in chemischen Energiespeichern dar. Die Synthese von Methan ist jedoch an Wasserstoff gebunden. Der energetische Gesamtwirkungsgrad des wiederverstromten synthetischen Methans beträgt dabei jedoch nur ca. 30 bis 38 Prozent, weshalb es als energetisch sinnvoller erachtet wird, entweder das Methan direkt als Kraftstoff im Verkehr zu nutzen oder den Wasserstoff direkt zu verwenden.¹⁷⁶ Vorteilhaft an der Wiederverstromung von Methan statt des Einsatzes als Kraftstoff wäre allenfalls die an Punktquellen anfallenden

CO₂-Mengen, die energieeffizienter wieder abgeschieden werden könnten als diffuse Emissionen aus dem Verkehr. Methan hat gegenüber Wasserstoff jedoch die Vorteile einer höheren Energiedichte sowie der Nutzungsmöglichkeit vorhandener Infrastruktur für Verteilung und Speicherung ohne erhebliche Umrüstmaßnahmen. Weiterhin ist Ammoniak als Energiespeicher in der Diskussion. Die Einführung entsprechender Technologien sollte zeitnah erfolgen, um mit Blick auf den absehbar starken Ausbau erneuerbarer Energien eine spätere geeignete Großskalierung zu ermöglichen.

Direkte Umsetzung (Dream Reactions)

Unter „Dream Reactions“ werden atomeffiziente Synthesen unter Beteiligung von CO₂ verstanden, zum Beispiel die direkte Hydrogenierung mit Wasserstoff zu höheren Alkoholen oder die Copolymerisation mit Olefinen.¹⁷⁷ In der „Dream Production“¹⁷⁸, einer Produktionsstraße auf dem Werksgelände in Dormagen, nutzt Covestro CO₂ als Rohstoff. Dort werden mit einem innovativen Verfahren CO₂-basierte Vorprodukte, sogenannte Polyole, hergestellt. Zu den Einsatzgebieten zählen Polyurethan-Weichschaum für Matratzen und Polstermöbel sowie Bindemittel für Sportböden. In den Polyolen stecken bis zu 20 Prozent CO₂. In entsprechender Menge wird Erdöl ersetzt, der bislang übliche Rohstoff in der Kunststoffproduktion.

Biologische Verwertung

Neben chemischen gibt es eine Reihe von biologischen Verwertungswegen für CO₂, in denen natürliche Prozesse (zum Beispiel Photosynthese) als Vorbild dienen. Diese, auf autotrophen Mikroorganismen basierenden Prozesse, die Wasserstoff oder Methan produzieren können, befinden sich noch überwiegend im Pilotmaßstab und stellen daher kurz- bis mittelfristig keine in der Breite nutzbare Option dar. Dennoch bergen die Erschließung und Adaption dieser natürlichen Prozesse zukünftig große Potenziale.

Quellenverzeichnis

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung waren alle Internetquellen in der hier zitierten Form abrufbar.

- ¹ LANUV (2021a) Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2019/2020, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, 2021. URL: <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaschutz/treibhausgas-emissionsinventar/>
- ² BVG (2021) Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich, Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021, Bundesverfassungsgericht, Karlsruhe, 2021. URL: <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>
- ³ Deutscher Bundestag (2021a) Bundestag verschärft das Klimaschutzgesetz, Deutscher Bundestag, Berlin, 2021. URL: <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2021/kw25-de-klimaschutzgesetz-846922>
- ⁴ Im Rahmen der Carbon Management Strategie NRW steht Kohlenstoff (C) sowohl in seiner Funktion als wichtiger industrieller Rohstoff als auch in Hinblick auf seine klimaschädlichen Eigenschaften infolge seiner in vielen, heute gängigen Prozessen stattfindenden Reaktion mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) im Vordergrund. CO₂ ist jedoch nicht das einzige klimaschädliche Treibhausgas. Analysen und Auswertungen, die das Ziel der Treibhausgasneutralität in den Blick nehmen, müssen somit alle klimaschädlichen Gase berücksichtigen. Gängig ist, diese auf Basis ihres Treibhauspotenzials in sogenannte CO₂-Äquivalente (CO₂e) umzurechnen. Die im Rahmen der Carbon Management Strategie genannten Emissionswerte und Reduktionsziele beziehen sich in der Regel auf alle Treibhausgase. Dennoch ist und bleibt CO₂ durch seine hohe atmosphärische Konzentration nach Wasserdampf das bedeutendste anthropogen verursachte Treibhausgas (UBA (2021a)). In besonderem Maße trifft dies auf den hier im Vordergrund stehenden industriellen Bereich zu, in welchem die Entstehung anderer Treibhausgase, z. B. Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O), die im landwirtschaftlichen Sektor sowie in der Abfallwirtschaft von größerer Bedeutung sind und häufig diffus auftreten, eine untergeordnete Rolle spielt. Daher wird vereinfacht und um den Fokus nicht von dem zentralen Punkt der Strategie abzulenken, immer von CO₂ gesprochen, auch wenn zum Teil auch geringe Mengen anderer Treibhausgase enthalten sind und somit in diesen Fällen wissenschaftlich korrekt von CO₂e gesprochen werden müsste. Bezifferte Emissionsmengen und mögliche Kohlenstoff(dioxid)-Nutzungspotenziale sind somit nicht unmittelbar aufeinander zu beziehen. Dies wird im Rahmen der vorliegenden Strategie auch nicht beabsichtigt.
- Wann immer möglich, werden für Nordrhein-Westfalen spezifische Daten herangezogen. Repräsentative aktuelle Daten sind, sowohl aufgrund der Tatsache, dass eine integrierte und umfassende Betrachtung des komplexen Themas Carbon Management in Nordrhein-Westfalen erstmalig erfolgt, als auch vor dem Hintergrund grenzübergreifender (Kohlen-)Stoffströme, die eine Bilanzierung erschweren, allerdings vielfach nicht auf Bundeslandebene verfügbar. In diesen Fällen werden bundesdeutsche Daten herangezogen, sofern diese die nordrhein-westfälische Situation verhältnismäßig wiedergeben. Trifft dies nicht zu, wird hier auf eine Quantifizierung verzichtet. Um die Datenlücken in Nordrhein-Westfalen zu schließen und Transparenz über das Kohlenstoffinventar beziehungsweise kohlenstoffhaltige und -substituierende Stoffströme zu schaffen, wird das MWIDE gemeinsam mit dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) ein Carbon Monitoring aufbauen (vgl. Kapitel 8).
- UBA (2021a) Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen, Daten, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid->
- ⁵ MWIDE (2019a) Industrie ist Zukunft: Industriepolitiches Leitbild des Landes Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2019. URL: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/190925_industriepolitiches_leitbild_finale_fassung.pdf
- ⁶ MWIDE (2019b) Energieversorgungsstrategie Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2019. URL: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/evs_nrw_version_veroeffentlichung_final.pdf
- ⁷ MWIDE (2020) Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2020. URL: https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf
- ⁸ BGR (2020) Deutschland – Rohstoffsituation 2019, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2020. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=4

- ⁹ BGR (2020) Deutschland – Rohstoffsituation 2019, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2020. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- ¹⁰ Deutscher Bundestag (2020a) Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 37, ausgegeben zu Bonn am 13. August 2020. URL: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*\[@attr_id=%27bgbl120s1818.pdf%27\]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1818.pdf%27%5D__1628676974385](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*[@attr_id=%27bgbl120s1818.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1818.pdf%27%5D__1628676974385)
- ¹¹ BGR (2020) Deutschland – Rohstoffsituation 2019, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2020. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- ¹² VCI (2020) Rohstoffbasis der Chemieindustrie, Daten und Fakten, Stand: 25. Februar 2020, Verband der chemischen Industrie e. V., Frankfurt am Main, 2020. URL: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/daten-fakten-rohstoffbasis-chemieindustrie.pdf>
- ¹³ UBA (2021b) Recycling Baustoffe, Daten, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#recycling-baustoffe>
- ¹⁴ Conversio (2020) Kurzfassung der Conversio-Studie: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff, 2020. URL: https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf
- ¹⁵ IN4climate.NRW (2021a) Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy. Gelsenkirchen.
- ¹⁶ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁷ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁸ IEA (2019) Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions, International Energy Agency, Paris, 2019. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf
- ¹⁹ Nature (2015) Tough targets, In: Nature, 522, 128, 2015. URL: <https://www.nature.com/news/tough-targets-1.17717>
- ²⁰ so auch definiert im Duden
- ²¹ Europäische Kommission (2020) Im Blickpunkt – Erneuerbare Energien in Europa, Nachrichten vom 18. März 2020, Europäische Kommission, Brüssel, 2021. URL: https://ec.europa.eu/info/news/focus-renewable-energy-europe-2020-mar-18_de#::::text=Im%20Blickpunkt%20%E2%80%93%20Erneuerbare%20Energien%20in%20Europa%201,3%20Markteinf%C3%BChrung%20%E2%80%93%20zum%20Nutzen%20der%20B%C3%BCrger%20Finnen.%20
- ²² Kyrberg, Lars (2019) PPA: Alles Wichtige über die Trend-Lieferverträge, Erneuerbare Energien. URL: <https://www.erneuerbareenergien.de/politik/gesetze/power-purchase-agreement-ppa-alles-wichtige-ueber-die-trend-liefervertraege>
- ²³ dena (2019) Einsatzgebiete für Power Fuels – Stahlproduktion, Deutsche Energie-Agentur, Berlin, 2019. URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Factsheet_PowerFuels_Stahlproduktion_Industrielle_Prozesswaerme.pdf
- ²⁴ Solheim, Asbjørn (2018) Inert Anodes – the Blind Alley to Environmental Friendliness?, In: Martin O. (Hrsg.) Light Metals 2018, TMS 2018, The Minerals, Metals & Materials Series, Springer, Heidelberg, 2018, S. 1253-1260. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_164
- ²⁵ Yasinskiy, Andrey et al. (2020) An update on inert anodes for aluminium electrolysis, In: Non-ferrous Metals, 48(1), S. 15–23.
- ²⁶ Stiftung Unternehmen Wald (2021) Wie viel Kohlendioxid (CO₂) speichert der Baum bzw. der Wald, Stiftung Unternehmen Wald, Hamburg, 2021. URL: <https://www.wald.de/waldwissen/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-ein-baum/>
- ²⁷ Dies trifft zu, sofern auch der Verwertungsprozess klimaneutral gestaltet wird, also beispielsweise keine fossile Energie zur Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt wird.

- ²⁸ UBA (2021c) RESCUE – Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, Themen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-konzepte-fuer-die-klimaschutz/rescue-wege-in-eine-ressourcenschonende#hintergrund>
- ²⁹ Bringezu, Stefan et al. (2020) Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie, Center for Environmental Systems Research (CESR) (Hrsg.), Universität Kassel, Kassel, 2020. URL: <https://kobra.uni-kassel.de/themes/Mirage2/scripts/mozilla-pdf.js/web/viewer.html?file=/bitstream/handle/123456789/11591/PilotberichtMonitoringBiooekonomie2020.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- ³⁰ UBA (2010) Entwicklung von Strategien und Nachhaltigkeitsstandards zur Zertifizierung von Biomasse für den internationalen Handel, Texte 48/2010, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2010. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3960.pdf>
- ³¹ Vertiefte Ausführungen zur Kaskadennutzung zur Steigerung der Nachhaltigkeit des Biomasseeinsatzes sind in Anhang A zu finden.
- ³² Europäische Kommission (2021a) Europäischer grüner Deal – Erster klimaneutraler Kontinent werden, Europäische Kommission, Brüssel, 2021. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
- ³³ Europäische Kommission (2021b) First circular economy action plan, Europäische Kommission, Brüssel, 2021. URL: https://ec.europa.eu/environment/topics/circular-economy/first-circular-economy-action-plan_de
- ³⁴ Deutscher Bundestag (2020b) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG), Deutscher Bundestag, Berlin, 20120. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Gesetze/novelle_krwg_bf.pdf
- ³⁵ Vertiefte Ausführungen hierzu sind in Abschnitt 5.1.1 sowie in Anhang C zu finden.
- ³⁶ KIT (2020) Nutzung von CO₂ aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien, Studie im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2020. URL: <https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/29-01-2021-DAC-Studie.pdf>
- ³⁷ Gleichwohl bietet DAC in Kombination mit der langfristigen Speicherung des CO₂ die Möglichkeit zur Erzeugung negativer Emissionen durch Direct Air Capture with Carbon Storage (DACCS) und ist somit grundsätzlich eine hochrelevante Technologie.
- ³⁸ LANUV (2021a) Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2019/2020, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, 2021. URL: <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaschutz/treibhausgas-emissionsinventar/>
- ³⁹ Deutscher Bundestag (2020a) Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 37, ausgegeben zu Bonn am 13. August 2020. URL: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*\[@attr_id=%27bgbl120s1818.pdf%27\]#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1818.pdf%27%5D__1628676974385](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*[@attr_id=%27bgbl120s1818.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1818.pdf%27%5D__1628676974385)
- ⁴⁰ Prognos et al. (2021) Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Prognos, Berlin, 2021. URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf
- ⁴¹ Deutscher Bundestag (2020a) Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 37, ausgegeben zu Bonn am 13. August 2020. URL: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*\[@attr_id=%27bgbl120s1818.pdf%27\]#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1818.pdf%27%5D__1628676974385](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*[@attr_id=%27bgbl120s1818.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1818.pdf%27%5D__1628676974385)

⁴² Treibhausgasemissionsdaten für die Bezugsjahre 2019 und 2020 (vorläufig) nach LANUV, unveröffentlicht; Angaben zu CO₂-Konzentrationen und Abscheidungskosten nach Wuppertal Institut (2015), Ramirez Ramirez, Andrea et al. (2020), ifeu (2019), KIT (2020), FZJ (2017a)

Wuppertal Institut (2015) CO₂ ReUse NRW – Evaluating gas sources, demand and utilization for CO₂ and H₂ within the North Rhine-Westphalia area with respect to gas qualities, Wuppertal Institut, Wuppertal, 2015. URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6010/file/6010_CO2_ReUse.pdf

Ramirez Ramirez, Andrea et al. (2020) LCA4CCU: Guidelines for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilisation. URL: <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/LCA4CCU-March-2020-Release-v1-0.pdf>

ifeu (2019) CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland – Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit, ifeu paper 03/2019, Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, 2019. URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_paper_03_2019_CO2-Quellen-f%c3%bcr-PtX.pdf

KIT (2020) Nutzung von CO₂ aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien, Studie im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2020. URL: <https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/29-01-2021-DAC-Studie.pdf>

FZJ (2017a) Technologiebericht 2.3 CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energie-wende, Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2017. URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7051/file/7051_CCS.pdf

⁴³ Im Fall von Methan oder anderen kohlenstoffhaltigen synthetischen Brennstoffen, die auf Basis von grauem CO₂ erzeugt worden sind, wäre eine Abscheidung oder die Kompensation freiwerdender CO₂-Mengen durch negative Emissionen in entsprechender Höhe langfristig dennoch zwingend erforderlich, um Klimaneutralität zu gewährleisten.

⁴⁴ Eine Ausnahme stellen Müllverbrennungsanlagen dar, die dem Sektor Energiewirtschaft zugeordnet sind und dauerhaft benötigt werden. Wenngleich strategisch darauf hingewirkt werden muss, dass diese zukünftig möglichst nur noch zum Ausschleusen von Schadstoffen eingesetzt werden, muss eine CO₂-Abscheidung für diesen energiewirtschaftlichen Anwendungsfall in Betracht gezogen werden.

⁴⁵ IN4climate.NRW (2020a) Unvermeidbare CO₂-Entstehung in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie NRW: Definition und Kriterien, IN4climate.NRW, Gelsenkirchen, 2020. URL: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2020/Diskussionspapier_Unvermeidbare_CO2_Entstehung/in4climatenrw-diskussionspapier-unvermeidbare-co2-entstehung-web.pdf

⁴⁶ SCI4climate.NRW ist ein vom Land Nordrhein-Westfalen gefördertes Forschungsprojekt, das die Arbeiten der Initiative IN4climate.NRW mittels der Betrachtung technologischer, ökologischer, ökonomischer, institutioneller und (infra-)struktureller Systemherausforderungen für Nordrhein-Westfalen und die ansässigen Industrieunternehmen wissenschaftlich begleitet.

⁴⁷ SCI4climate.NRW (2021a) CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW, Impuls für eine Infrastrukturgestaltung, SCI4climate.NRW, Wuppertal, 2021. URL: <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/co2-entstehung-der-industrie-in-einem-klimaneutralen-nrw-impuls-fu%CC%88r-eine-infrastrukturgestaltung-cr-sci4climatenrw.pdf>

⁴⁸ LANUV (2021a) Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2019/2020, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, 2021. URL: <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaschutz/treibhausgas-emissionsinventar/>

⁴⁹ SCI4climate.NRW (2021a) CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW, Impuls für eine Infrastrukturgestaltung, SCI4climate.NRW, Wuppertal, 2021. URL: <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/co2-entstehung-der-industrie-in-einem-klimaneutralen-nrw-impuls-fu%CC%88r-eine-infrastrukturgestaltung-cr-sci4climatenrw.pdf>

⁵⁰ IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.

- ⁵¹ IEA (2019) Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions, International Energy Agency, Paris, 2019.
URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf
- ⁵² Ramirez Ramirez, Andrea et al. (2020) LCA4CCU: Guidelines for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilisation.
URL: <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/LCA4CCU-March-2020-Release-v1-0.pdf>
- ⁵³ BMBF (2021) Carbon2Chem, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn, 2021. URL: <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/carbon2chem.php>
- ⁵⁴ Wuppertal Institut (2015) CO₂ ReUse NRW – Evaluating gas sources, demand and utilization for CO₂ and H₂ within the North Rhine-Westphalia area with respect to gas qualities, Wuppertal Institut, Wuppertal, 2015. URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6010/file/6010_CO2_ReUse.pdf
- ⁵⁵ BMBF (2021) Carbon2Chem, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn, 2021. URL: <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/carbon2chem.php>
- ⁵⁶ IEA (2019) Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions, International Energy Agency, Paris, 2019.
URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf
- ⁵⁷ IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.
- ⁵⁸ IEA (2019) Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions, International Energy Agency, Paris, 2019.
URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf
- ⁵⁹ IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.
- ⁶⁰ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ⁶¹ acatech (2018) CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie (acatech POSITION), Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, Herbert Utz Verlag, 2018. URL: https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/09/acatech_POSITION_CCU_CCS_WEB-002_final.pdf
- ⁶² FZJ (2017b) Technologiebericht 2.4 CO₂-Nutzung innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende, Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2017. URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7052/file/7052_CO2-Nutzung.pdf
- ⁶³ IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.
- ⁶⁴ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ⁶⁵ IEA (2019) Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions, International Energy Agency, Paris, 2019.
URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf
- ⁶⁶ IEA (2019) Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions, International Energy Agency, Paris, 2019.
URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf
- ⁶⁷ Piria, Raffaele et al. (2016) Carbon Capture and Utilization (CCU): Klimapolitische Einordnung und innovationspolitische Bewertung, adelphi (Hrsg.), Berlin, 2016. URL: <https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/Carbon%20Capture%20and%20Utilization%20%28CCU%29%20-%20Klimapolitische%20Einordnung%20und%20innovationspolitische%20Bewertung%20-%20adelphi-IASS.pdf>
- ⁶⁸ Aresta, Michele et al. (2013) The changing paradigm in CO₂ utilization, In: Journal of CO₂ Utilization, 3–4, S. 65–73.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2013.08.001>

- ⁶⁹ Styring, Peter et al. (2011) Carbon Capture and Utilisation in the green economy: Using CO₂ to manufacture fuel, chemicals and materials, Centre for Low Carbon Futures, York, 2011. URL: <http://co2chem.co.uk/wp-content/uploads/2012/06/CCU%20in%20the%20green%20economy%20report.pdf>
- ⁷⁰ Wären DAC-Lösungen wirtschaftlich verfügbar oder könnten negative Emissionen in entsprechender Höhe erzeugt werden, könnte auch die Verwendung von grauem CO₂ in Anwendungen, mit welchen eine kurzfristige Freisetzung des Kohlenstoffdioxids verbundenen ist, klimaneutral gestaltet werden. Beides sind jedoch mindestens kurz- bis mittelfristig keine geeigneten Optionen.
- ⁷¹ Prognos et al. (2021) Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Prognos, Berlin, 2021. URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf
- ⁷² Prognos et al. (2021) Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Prognos, Berlin, 2021. URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf
- ⁷³ einschließlich negativer Emissionen (BECCS, DACCS)
- ⁷⁴ Fraunhofer ISI (2021) Langfristszenarien 3. Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2021. URL: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>
- ⁷⁵ VDZ (2020) Die deutsche Zementindustrie auf dem Weg in eine CO₂-freie Zukunft, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, 2020. URL: <https://www.vdz-online.de/aktuelles/deutsche-zementindustrie-auf-dem-weg-in-eine-co2-freie-zukunft>
- ⁷⁶ Fraunhofer ISI (2021) Langfristszenarien 3. Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2021. URL: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>
- ⁷⁷ Benrath, Daniel (2021) Rechtliche Rahmenbedingungen einer Kohlendioxidwirtschaft – Gutachten zu Fragestellungen aus der IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft, IN4climate.NRW, https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2021/Gutachten_KdW/in4climate.nrw-gutachten-ag-kdw-rechtliche-rahmenbedingungen-kohlendioxidwirtschaft.pdf
- ⁷⁸ Global CCS Institute (2020) The Global Status of CCS: 2020, Global CCS Institute, Australia, 2020. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/11/Global-Status-of-CCS-Report-2020_FINAL.pdf
- ⁷⁹ Global CCS Institute (2020) The Global Status of CCS: 2020, Global CCS Institute, Australia, 2020. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/11/Global-Status-of-CCS-Report-2020_FINAL.pdf
- ⁸⁰ Treibhausgasemissionsdaten zum Bezugsjahr 2019 nach LANUV (2021a), UBA (2021d), UBA (2021g), UNFCC (2021), BEIS (2019); Daten zu den CO₂-Speicherkapazitäten nach Global CCS Institute (2020)
- LANUV (2021a) Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2019/2020, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, 2021. URL: <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaschutz/treibhausgas-emissionsinventar/>
- UBA (2021d) Treibhausgasemissionen in Deutschland, Daten, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>
- UBA (2021g) Treibhausgasemissionen der Europäischen Union, Daten, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#grosste-emittenten>
- UNFCC (2021) Summary of GHG Emissions for Norway, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2021. URL: https://di.unfccc.int/ghg_profile_annex1
- BEIS (2019) 2019 UK Greenhouse Gas Emissions, Department for Business, Energy & Industrial Strategy, London, 2019. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/957687/2019_Final_emissions_statistics_one_page_summary.pdf
- Global CCS Institute (2020) The Global Status of CCS: 2020, Global CCS Institute, Australia, 2020. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/11/Global-Status-of-CCS-Report-2020_FINAL.pdf

- ⁸¹ Global CCS Institute (2020) The Global Status of CCS: 2020, Global CCS Institute, Australia, 2020.
URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/11/Global-Status-of-CCS-Report-2020_FINAL.pdf
- ⁸² Details sind auf der Projektwebseite <https://www.co2ketzin.de/> zu finden.
- ⁸³ Breidenbach, Stephan et al. (2021) Maßnahmen für ein 1,5-Grad-Gesetzespaket, Arbeitsstand: Juni 2021, German Zero, Berlin, 2021.
URL: https://germanzero.de/media/pages/assets/32045b6d7e-1628691677/GermanZero_Massnahmenkatalog_210608.pdf
- ⁸⁴ Fraunhofer ISI (2021) Langfristszenarien 3. Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2021. URL: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>
- ⁸⁵ IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.
- ⁸⁶ IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.
- ⁸⁷ IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.
- ⁸⁸ SCI4climate.NRW (2021a) CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW, Impuls für eine Infrastrukturgestaltung, SCI4climate.NRW, Wuppertal, 2021. URL: <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/co2-entstehung-der-industrie-in-einem-klimaneutralen-nrw-impuls-fu%CC%88r-eine-infrastrukturgestaltung-cr-sci4climatenrw.pdf>
- ⁸⁹ IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.
- ⁹⁰ Ein gemeinsamer Transport, d. h. die Mischung von zwecks Entsorgung (CCS) abgedientem CO₂ (= Abfall) und zwecks weiterer Nutzung (CCU) abgedientem CO₂ (= Produkt) in einem gemeinsamen Netz, stellt laut Benrath (2021) rechtlich kein Problem dar.
- ⁹¹ IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.
- ⁹² MWIDE (2020) Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2020. URL: https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf
- ⁹³ In dem Infrastrukturentwurf von IN4climate.NRW sind mögliche CO₂-Mengen aus angrenzenden Regionen, die Nordrhein-Westfalen auf dem Weg zu einer Lagerstätte passieren müssen, nicht mitberechnet worden. Vor allem die Anbindung des Rhein-Main-Gebietes über den Anschluss im Chemiewerk in Wesseling wird als sinnvolle Option mit Auswirkungen auf die in NRW zu errichtende Infrastruktur eingeschätzt (IN4climate.NRW (2021b)).
- IN4climate.NRW (2021b) CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.
- ⁹⁴ Fraunhofer ISI (2021) Langfristszenarien 3. Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2021. URL: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>
- ⁹⁵ UBA (2021f) Methan-Emissionen, Daten, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/methan-emissionen>
- ⁹⁶ Eine Ausnahme muss allerdings für solche Projekte und Initiativen erwogen werden, die der Technologieentwicklung und dem Markthochlauf dienen und so zur Beschleunigung der Transformation beitragen.
- ⁹⁷ NRW.Global Business (2021) Chemische Industrie in NRW, NRW.Global Business, Düsseldorf, 2021. URL: <https://www.nrwinvest.com/de/branchen-in-nrw/chemische-industrie/>

- ⁹⁸ Geres, Roland et al. (2019) Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V., Frankfurt, FutureCamp Climate GmbH, München, 2019. URL: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>
- ⁹⁹ Geres, Roland et al. (2019) Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V., Frankfurt, FutureCamp Climate GmbH, München, 2019. URL: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>
- ¹⁰⁰ UBA (2021h) Stromverbrauch, Daten, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>
- ¹⁰¹ Bezugsjahr 2019
- ¹⁰² Conversio (2020) Kurzfassung der Conversio-Studie: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff, 2020. URL: https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf
- ¹⁰³ UBA (2021e) Aufkommen an Kunststoffabfällen, Daten, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#hohe-verwertungsquoten>
- ¹⁰⁴ Conversio (2020) Kurzfassung der Conversio-Studie: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff, 2020. URL: https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf
- ¹⁰⁵ IN4climate.NRW (2020b) Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy, IN4climate.NRW, Gelsenkirchen, 2020. URL: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2020/Diskussionspapier_Chemisches_Kunststoffrecycling/in4climatenrw-diskussionspapier-chemisches-kunststoffrecycling-web.pdf
- ¹⁰⁶ IN4climate.NRW (2020b) Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy, IN4climate.NRW, Gelsenkirchen, 2020. URL: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2020/Diskussionspapier_Chemisches_Kunststoffrecycling/in4climatenrw-diskussionspapier-chemisches-kunststoffrecycling-web.pdf
- ¹⁰⁷ Conversio (2020) Kurzfassung der Conversio-Studie: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff, 2020. URL: https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf
- ¹⁰⁸ Conversio (2020) Kurzfassung der Conversio-Studie: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff, 2020. URL: https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf
- ¹⁰⁹ Bundesregierung (2014) Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Bundesregierung, Berlin, 2014. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/pdf/roadmap-bioraffinerien.pdf?__blob=publicationFile&%3Bv=2
- ¹¹⁰ Bundesregierung (2014) Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Bundesregierung, Berlin, 2014. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/pdf/roadmap-bioraffinerien.pdf?__blob=publicationFile&%3Bv=2
- ¹¹¹ Detzel, Andreas et al. (2018) Biobasierte Kunststoffe als Verpackung von Lebensmitteln, ifeu, Fraunhofer IVV, narocon, Heidelberg, Freising, Berlin, 2018. URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Endbericht-Bio-LVp_20180612.pdf
- ¹¹² SCI4climate.NRW (2020) Einsatz von CCU-Technologien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalens Chemieindustrie, Modellentwurf und Technologiealternativen, SCI4climate.NRW, Aachen, 2020. URL: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Produkte_und_Wertsch%C3%B6pfungsketten/sci4climate-webmodellentwurf-und-technologiealternativen.pdf

- ¹¹³ LANUV (2021a) Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2019/2020, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, 2021. URL: <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaschutz/treibhausgas-emissionsinventar/>
- ¹¹⁴ SCI4climate.NRW (2020) Einsatz von CCU-Technologien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalens Chemieindustrie, Modellentwurf und Technologiealternativen, SCI4climate.NRW, Aachen, 2020. URL: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Produkte_und_Wertsch%C3%B6pfungsketten/sci4climate-web-modellentwurf-und-technologiealternativen.pdf
- ¹¹⁵ Vertiefte Ausführungen zur Darstellung und Einordnung der CCU-Prozesse in der chemischen Industrie sind in Anhang C zu finden.
- ¹¹⁶ MWIDE (2020) Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2020. URL: https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf
- ¹¹⁷ SCI4climate.NRW (2021a) CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW, Impuls für eine Infrastrukturgestaltung, SCI4climate.NRW, Wuppertal, 2021. URL: <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/co2-entstehung-der-industrie-in-einem-klimaneutralen-nrw-impuls-fu%CC%88r-eine-infrastrukturgestaltung-cr-sci4climatenrw.pdf>
- ¹¹⁸ LANUV (2021b) Energieatlas NRW, Energiedaten Nordrhein-Westfalen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, 2021. URL: <https://www.energieatlas.nrw.de/site/werkzeuge/energiestatistik>
- ¹¹⁹ Witsch (2020) Klimakiller Beton: So will die deutsche Zementindustrie CO₂-neutral werden, Kathrin Witsch, Handelsblatt, 2020. URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/klimaschutz-klimakiller-beton-so-will-die-deutsche-zementindustrie-co2-neutral-werden-/26652040.html?ticket=ST-1339551-K1RDMOFDg0xaVxBXZwLj-ap5>
- ¹²⁰ Stand 2020
- ¹²¹ VDZ (2020) Die deutsche Zementindustrie auf dem Weg in eine CO₂-freie Zukunft, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, 2020. URL: <https://www.vdz-online.de/aktuelles/deutsche-zementindustrie-auf-dem-weg-in-eine-co2-freie-zukunft>
- ¹²² VDZ (2020) Die deutsche Zementindustrie auf dem Weg in eine CO₂-freie Zukunft, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, 2020. URL: <https://www.vdz-online.de/aktuelles/deutsche-zementindustrie-auf-dem-weg-in-eine-co2-freie-zukunft>
- ¹²³ VDZ (2020) Die deutsche Zementindustrie auf dem Weg in eine CO₂-freie Zukunft, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, 2020. URL: <https://www.vdz-online.de/aktuelles/deutsche-zementindustrie-auf-dem-weg-in-eine-co2-freie-zukunft>
- ¹²⁴ FEhS (2021) Wir forschen, Institut für Baustoff-Forschung e.V., Duisburg, 2021. URL: <https://www.fehs.de/unsere-experten/wir-forschen/>
- ¹²⁵ UBA (2018) BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor), Texte 115/2019, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2018. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-24_texte_115-2019_biorest.pdf
- ¹²⁶ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹²⁷ IEA (2019) Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions, International Energy Agency, Paris, 2019. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf
- ¹²⁸ VDZ (2020) Die deutsche Zementindustrie auf dem Weg in eine CO₂-freie Zukunft, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, 2020. URL: <https://www.vdz-online.de/aktuelles/deutsche-zementindustrie-auf-dem-weg-in-eine-co2-freie-zukunft>
- ¹²⁹ VDZ (2020) Die deutsche Zementindustrie auf dem Weg in eine CO₂-freie Zukunft, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, 2020. URL: <https://www.vdz-online.de/aktuelles/deutsche-zementindustrie-auf-dem-weg-in-eine-co2-freie-zukunft>
- ¹³⁰ Europäische Kommission (2021a) Europäischer grüner Deal – Erster klimaneutraler Kontinent werden, Europäische Kommission, Brüssel, 2021. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de

- ¹³¹ Deutscher Bundestag (2021b) Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes, Drucksache 19/30230, Deutscher Bundestag, Berlin, 2021. URL: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/302/1930230.pdf>
- ¹³² Landesregierung NRW (2021) Gesetz zur Neufassung des Klimaschutzgesetzes Nordrhein-Westfalen, Landesregierung Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2021. URL: https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_text?anw_nr=2&gld_nr=7&ugl_nr=7129&bes_id=46232&aufgehoben=N&menu=1&sg=0
- ¹³³ Benrath, Daniel (2021) Rechtliche Rahmenbedingungen einer Kohlendioxidwirtschaft – Gutachten zu Fragestellungen aus der IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft, IN4climate.NRW, https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2021/Gutachten_KdW/in4climate.nrw-gutachten-ag-kdw-rechtliche-rahmenbedingungen-kohlendioxidwirtschaft.pdf
- ¹³⁴ Es sei denn, das CO₂ wird direkt als Medizinprodukt beziehungsweise als Lebensmittel(-zusatz) in den Verkehr gebracht. Dann gilt im Besonderen das Produktrecht für Medizinprodukte und für Lebensmittel, nach welchem Vorgaben erfüllt werden müssen, die mit einer direkten Belieferung durch ein offenes CO₂-Netz laut Benrath (2021) nicht zu vereinbaren sind.
- ¹³⁵ Benrath, Daniel (2021) Rechtliche Rahmenbedingungen einer Kohlendioxidwirtschaft – Gutachten zu Fragestellungen aus der IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft, IN4climate.NRW, https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2021/Gutachten_KdW/in4climate.nrw-gutachten-ag-kdw-rechtliche-rahmenbedingungen-kohlendioxidwirtschaft.pdf
- ¹³⁶ Benrath, Daniel (2021) Rechtliche Rahmenbedingungen einer Kohlendioxidwirtschaft – Gutachten zu Fragestellungen aus der IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft, IN4climate.NRW, https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2021/Gutachten_KdW/in4climate.nrw-gutachten-ag-kdw-rechtliche-rahmenbedingungen-kohlendioxidwirtschaft.pdf
- ¹³⁷ Siehe auch Abschnitte 4.4.3 und 4.4.4
- ¹³⁸ Eine detaillierte Auseinandersetzung seitens Wissenschaft und Industrie mit den aktuellen Rahmenbedingungen zur Sekundärrohstoffnutzung ist in IN4climate.NRW (2021 a) einzusehen:
- IN4climate.NRW (2021a) Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy. Gelsenkirchen.
- ¹³⁹ IPCC (2018) Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf
- ¹⁴⁰ Edenhofer, Ottmar et al. (2021) Wissensstand zu CO₂-Entnahmen. Bedarf & Potenziale, Technologie & Politikinstrumente, Weltweit & in Deutschland, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC), Berlin, 2021. URL: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/2021_MCC_Wissensstand_zu_CO2-Emissionen.pdf
- ¹⁴¹ Edenhofer, Ottmar et al. (2021) Wissensstand zu CO₂-Entnahmen. Bedarf & Potenziale, Technologie & Politikinstrumente, Weltweit & in Deutschland, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC), Berlin, 2021. URL: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/2021_MCC_Wissensstand_zu_CO2-Emissionen.pdf
- ¹⁴² Hier liegt der Fokus auf den technologischen Senken; ökosystem-basierte Senken (LULUCF) werden nicht betrachtet.
- ¹⁴³ Port of Rotterdam (2020) Porthos CO₂-Speicherungsprojekt hat Aussicht auf EU-Fördermittel in Höhe von € 102 Millionen, Nachrichten, Port of Rotterdam, 2020. URL: [Rotterdam https://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemitteilungen/porthos-speicherungsprojekt-eu-foerdermittel-102-millionen](https://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemitteilungen/porthos-speicherungsprojekt-eu-foerdermittel-102-millionen)
- ¹⁴⁴ Edenhofer, Ottmar et al. (2021) Wissensstand zu CO₂-Entnahmen. Bedarf & Potenziale, Technologie & Politikinstrumente, Weltweit & in Deutschland, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC), Berlin, 2021. URL: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/2021_MCC_Wissensstand_zu_CO2-Emissionen.pdf
- ¹⁴⁵ Rickels, Wilfried et al. (2020) The Future of (Negative) Emissions Trading in the European Union, Kiel Working Paper No. 2164, Kiel Institute for the World Economy, Kiel, 2020. URL: https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/Wilfried_Rickels/The_Future_of__Negative__Emissions_Trading_in_the_European_Union/KWP_2164.pdf

- ¹⁴⁶ Markus, Till et al. (2020) Zum regulatorischen Rahmen direkter Abscheidung von Kohlendioxid aus der Luft (Direct Air Capture – DAC), Helmholtz-Klima-Initiative, 2020. URL: https://www.netto-null.org/imperia/md/assets/net_zero/dokumente/2020_netto-null-2050_deliverable_m-p2.1_web.pdf
- ¹⁴⁷ Edenhofer, Ottmar et al. (2021) Wissensstand zu CO₂-Entnahmen. Bedarf & Potenziale, Technologie & Politikinstrumente, Weltweit & in Deutschland, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC), Berlin, 2021. URL: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/2021_MCC_Wissensstand_zu_CO2-Emissionen.pdf
- ¹⁴⁸ Geden, Oliver et al. (2020) Unconventional Mitigation. Carbon Dioxide Removal as a New Approach in EU Climate Policy. SWP Research Paper 8, Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin, 2020. URL: https://www.swp-berlin.org/publications/products/research_papers/2020RPO8_ClimateMitigation.pdf
- ¹⁴⁹ Castillo Castillo, A. et al. (2019) Analysis and recommendations for European carbon dioxide utilization policies, In: Journal of Environmental Management, 247, S. 439-448. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.092>
- ¹⁵⁰ Olfe-Kräutlein, Barbara et al. (2016) CO₂ als Wertstoff. Herausforderungen und Potenziale für die Gesellschaft, Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam, 2016. URL: https://publications.iass-potsdam.de/rest/items/item_1962394_8/component/file_2793987/content
- ¹⁵¹ SAPEA (2018) Novel carbon capture and utilisation technologies. Research and climate aspects, SAPEA Evidence Review Report No. 2, Informs the European Commission Group of Chief Scientific Advisors Scientific Opinion No. 4/2018, Science Advice for Policy by European Academies, Berlin, 2018. URL: <https://www.sapea.info/wp-content/uploads/CCU-report-web-version.pdf>
- ¹⁵² SAM (2018) Novel carbon capture and utilisation technologies, Scientific Opinion 4/2018, Scientific Advice Mechanism, European Commission, Brussels, 2018. URL: <https://doi.org/10.2777/01532>
- ¹⁵³ SAPEA (2018) Novel carbon capture and utilisation technologies. Research and climate aspects, SAPEA Evidence Review Report No. 2, Informs the European Commission Group of Chief Scientific Advisors Scientific Opinion No. 4/2018, Science Advice for Policy by European Academies, Berlin, 2018. URL: <https://www.sapea.info/wp-content/uploads/CCU-report-web-version.pdf>
- ¹⁵⁴ UBA (2019a) Support for the revision of the Monitoring and Reporting Regulation for the 4th trading period (focus: Carbon Capture and Utilisation (CCU)), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2019. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-27_texte_36-2019_ccu.pdf
- ¹⁵⁵ Agora (2019) Klimaneutrale Industrie – Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement, Agora Energiewende und Wuppertal Institut, Berlin, 2019. URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf
- ¹⁵⁶ Agora (2019) Klimaneutrale Industrie – Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement, Agora Energiewende und Wuppertal Institut, Berlin, 2019. URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf
- ¹⁵⁷ BMU (2021) Eckpunkte für eine Förderrichtlinie Klimaschutzverträge zur Umsetzung des Pilotprogramms „Carbon Contracts for Difference“, Entwurf Stand 21.04.2021, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin, 2021. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/eckpunktepapier_klimaschutzvertraege_ccfd_bf.pdf
- ¹⁵⁸ IREES et al. (2021) Projektbasierte Klimaschutzverträge für eine treibhausgasneutrale Industrieproduktion, IREES GmbH, Fraunhofer ISI, Öko-Institut e.V., Karlsruhe, Berlin, 2021. URL: https://irees.de/wp-content/uploads/2021/04/Konzeptstudie-Klimaschutzvertraege-fuer-die-Industrie_IREES_ISI_OeKO.pdf
- ¹⁵⁹ MWIDE (2020) Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2020. URL: https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf
- ¹⁶⁰ SCI4climate.NRW (2021b) Konzeptualisierung des möglichen Renewable-Pull-Phänomens – Definition, Wirkmechanismen und Abgrenzung zu Carbon Leakage, SCI4climate.NRW, Wuppertal, 2021. URL: <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/konzeptualisierung-des-m%C3%B6glichen-renewables-pull-ph%C3%A4nomens-cr-sci4climatenrw.pdf>

- ¹⁶¹ BMWi (2021) Förderaufruf „CO₂-Abscheidung und -Nutzung in der Grundstoffindustrie“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, 2021. URL: https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/B66E13121AB36575E0537E695E8660F3/current/document/F%C3%B6rderaufruf_CO2-Abscheidung_und_Nutzung.pdf
- ¹⁶² UBA (2017) Biomassekaskaden – Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis, Texte 53/2017, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2017. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-06-13_texte_53-2017_biokaskaden_kurzfassung.pdf
- ¹⁶³ UBA (2018) BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor), Texte 115/2019, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2018. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-24_texte_115-2019_biorest.pdf
- ¹⁶⁴ 1 Tonne CO₂ hat über 100 Jahre ein Global Warming Potenzial (GWP100) von 1. Eine Tonne Methan hingegen ein GWP100 von 28–34.
- ¹⁶⁵ IASS (2021) Methan-Dekarbonisierung, Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam, 2021. URL: <https://www.iass-potsdam.de/de/forschung/methan-dekarbonisierung>
- ¹⁶⁶ Die Mengen an klimaneutralem Wasserstoff, die dadurch aus Biogasanlagen in Nordrhein-Westfalen erzeugt werden könnten, belaufen sich auf 130.000 t Wasserstoff, entsprechend ca. 4,3 Terrawattstunden. Zum Vergleich: Allein der Stahlkonzern thyssenkrupp rechnet für 2050 mit einem Bedarf von 24 Terrawattstunden (720.000 t) Wasserstoff zur vollständig nachhaltigen Umstellung seiner Stahlproduktion. Der gesamte NRW-Bedarf 2050 beträgt der Begleitstudie zur Wasserstoff Roadmap NRW zufolge 172 Terrawattstunden.
- ¹⁶⁷ UBA (2020) Chemisches Recycling, Hintergrund, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf
- ¹⁶⁸ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁶⁹ acatech (2018) CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie (acatech POSITION), Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, Herbert Utz Verlag, 2018. URL: https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/09/acatech_POSITION_CCU_CCS_WEB-002_final.pdf
- ¹⁷⁰ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁷¹ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁷² Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁷³ In der chemischen Industrie fällt sehr reines Abgas mit hochkonzentriertem CO₂ an. Die Rauchgaskonzentration kann hier bis zu 100 Prozent betragen.
- ¹⁷⁴ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁷⁵ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁷⁶ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁷⁷ Lehner, Markus et al. (2012) Carbon Capture and Utilization (CCU) – Verfahrenswege und deren Bewertung, In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, S. 63–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s00501-012-0056-1>
- ¹⁷⁸ Details sind auf der Unternehmenswebseite <https://www.covestro.de/en/covestro-in-germany/sites/dormagen> zu finden.

Impressum

Herausgeber:

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen

Berger Allee 25
40213 Düsseldorf

Tel. +49 (0) 211/61772-0
Fax: +49 (0) 211/61772-777
Internet: www.wirtschaft.nrw

Referat VII.5
Energiesystem der Zukunft,
Wasserstoff, Klimaschutz in der Industrie

Bildnachweise:

© MWIDE NRW/F. Wiedemeier (3),
© stock.adobe.com/PRILL Mediendesign (4),
© stock.adobe.com/VERSUSstudio (8),
© stock.adobe.com/ON-Photography (16),
© stock.adobe.com/tum2282 (20),
© stock.adobe.com/gearstd (28),
© stock.adobe.com/Thaut Images (56),
© stock.adobe.com/Mint Images (70),
© stock.adobe.com/heike114 (76),
© [unsplash/Vek](https://unsplash.com/Vek) Labs (86),
© stock.adobe.com/Science RF (94),
© Csaba_Mester.

Gestaltung:

www.heimrich-hannot.de

Die Broschüre ist auf der Homepage des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen als PDF-Dokument abrufbar.

Hinweis

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Landesregierung Nordrhein-Westfalen herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerberinnen und -bewerbern oder Wahlhelferinnen und -helfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden.

Dies gilt auch für Landtags-, Bundestags- und Kommunalwahlen sowie für die Wahl der Mitglieder des Europäischen Parlaments.

Missbräuchlich sind insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Eine Verwendung dieser Druckschrift durch Parteien oder sie unterstützende Organisationen ausschließlich zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder bleibt hiervon unberührt. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin oder dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

© Oktober 2021 / **MWIDE21-020**

**Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen**
Berger Allee 25, 40213 Düsseldorf
www.wirtschaft.nrw

