

CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW

Impuls für eine Infrastrukturgestaltung

Ein Ergebnis des Themenfeldes 0 Koordination, Steuerung, Austausch & Veranstaltungen des Forschungsprojektes SCI4climate.NRW

SCI4climate.NRW ist ein vom Land Nordrhein-Westfalen unterstütztes Forschungsprojekt zur Entwicklung einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Industrie im Jahr 2050. Das Projekt ist innerhalb der Initiative IN4climate.NRW verankert und repräsentiert die Seite der Wissenschaft. Das Projekt erforscht die technologischen, ökologischen, ökonomischen, institutionellen und (infra)-strukturellen Systemherausforderungen für produzierende Unternehmen in Nordrhein-Westfalen. Ein transdisziplinärer Prozess mit den Partnerinnen und Partnern aus der Industrie und Wissenschaft erarbeitet gemeinsam mögliche Pfade und deren Auswirkungen hin zu einer klimaneutralen Industrie.



Bibliographische Angaben

Herausgeber: SCI4climate.NRW
Veröffentlicht: Juni 2021
Autoren: Christoph Zeiss, Dr. Georg Holtz, Ansgar Taubitz und Dario Zander (alle Wuppertal Institut)
Ansprechpartner: christoph.zeiss@wupperinst.org
Bitte zitieren als: SCI4climate.NRW 2021: CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW, Impuls für eine Infrastrukturgestaltung, Wuppertal

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	4
1 Ziele	5
2 Methodische Vorgehensweise	6
2.1 Begriffsverwendung	6
2.2 Systemgrenzen	7
2.3 Arbeitsschritte	7
2.4 Datenbasis	10
3 Zielbilder zur Quantifizierung der CO ₂ -Mengen einer (weitgehend) klimaneutralen Industrie in NRW im Jahr 2045	12
3.1 Drei Zielbilder: <i>Tech_Min</i> , <i>SYS</i> , <i>BECCS</i>	12
3.2 Annahmen im Detail.....	12
3.3 CO ₂ -Entstehung in den drei Zielbildern.....	14
4 Geografische Verteilung der CO ₂ -Quellen im Jahr 2045 in NRW	17
5 Von NRW aus erreichbare Speicherstätten.....	18
5.1 Norwegen (Northern Lights)	18
5.2 Rotterdam (Porthos)	18
6 CO ₂ -Transportmöglichkeiten in NRW.....	19
6.1 Vergleich ausgewählter Transportmedien (Pipeline, Schifffahrt und Zug)	19
6.2 Auswahl eines Transportmediums für das Zielbild <i>SYS</i>	20
7 CO ₂ -Pipeline-Infrastrukturentwurf für das Zielbild <i>SYS</i>	21
7.1 Vorgehensweise zur Auswahl der Punktquellen.....	21
7.2 CO ₂ -Pipelineinfrastrukturentwurf für NRW	23
7.3 Kosten CO ₂ -Pipelineinfrastruktur	24
8 Qualitative Einordnung der Zielbilder <i>Tech_Min</i> und <i>BECCS</i>	26
9 Fazit	28
Literaturverzeichnis.....	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitsschritte im Überblick	8
Abbildung 2: CO ₂ -Entstehung an industriellen Quellen in NRW im Jahr 2045 gemäß Zielbildern	15
Abbildung 3: Geographische Verteilung der Punktquellen inkl. der CO ₂ -Mengen in NRW im Jahr 2045 im Zielbild SYS.....	17
Abbildung 4: CO ₂ -Pipelineinfrastrukturentwurf für das Rhein- und Westfalen-Cluster im Jahr 2045 im Zielbild SYS.....	23
Abbildung 5: Geographische Verteilung inkl. der im Jahr 2045 anfallenden CO ₂ -Mengen der Zielbilder <i>Tech_Min</i> (links), <i>SYS</i> (Mitte) und <i>BECCS</i> (rechts)	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sektorale und geographische Abdeckung der verwendeten Datenbasis.....	10
Tabelle 2: Anzahl der berücksichtigten Standorte und Prozesse in NRW je Sektor.....	11
Tabelle 3: Produktionsmengen	13
Tabelle 4: Annahmen der Prozesse und der eingesetzten Energieträger in den Zielbildern.....	14
Tabelle 5: CO ₂ -Transportmöglichkeiten und ausgewählte Kriterien für das Zielbild SYS in NRW	19

1 Ziele

Die Landesregierung von Nordrhein-Westfalen ist aktuell dabei, das Ziel der Klimaneutralität in einem novellierten Klimaschutzgesetz zu verankern¹. Dadurch wird die Diskussion über ein Zielbild für die industrielle Produktion in einem klimaneutralen Gesamtsystem in NRW notwendig. Produktionsprozesse und -produkte müssen sich in einer klimaneutralen Welt so verändert haben, dass sie weiter Wertschöpfung generieren und Arbeitsplätze bereitstellen, aber keinen Beitrag zur anthropogenen Erwärmung der Erdatmosphäre mehr leisten. Es existieren allerdings Prozesse der Grundstoffindustrie, die aus heutiger Sicht auch in einer klimaneutralen Welt weiterhin CO₂-Mengen erzeugen. Dieses Papier zeigt auf, welche Prozesse welche Mengen aus Sicht des Wuppertal Instituts in NRW erzeugen und wie der Umgang damit sein könnte. Dabei handelt es sich um einen Diskussionsbeitrag für die Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft der Initiative IN4climate.NRW, in der WissenschaftlerInnen und UnternehmensvertreterInnen gemeinsam Optionen einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft in NRW diskutieren.

In dem Papier wird anhand von Zielbildern 2045 dargestellt, in welchen Prozessen einer klimaneutralen Grundstoffindustrie weiterhin CO₂ anfallen könnten, um welche Mengen es sich handeln könnte und an welchen Punktquellen sie in NRW anfallen würden. Auf Basis der Standorte der Punktquellen werden Cluster gebildet und mögliche Pipelineinfrastrukturen für CO₂ abgeleitet, die zu einer Seehafenanbindung führen. Andere Optionen wie zum Beispiel eine inländische Speicherung oder ein Einsatz von CCU in NRW werden nicht betrachtet.

Das Papier soll dazu anregen, die Diskussion über den Umgang mit unvermeidbar anfallenden CO₂-Mengen in einer klimaneutralen Industrie zu führen. Dazu reicht es aus Sicht der Autoren an dieser Stelle zunächst aus, eine mögliche Zukunft darzustellen. Im Laufe der Diskussion werden aber sowohl weitere alternative Zielbilder für eine klimaneutrale Industrie als auch Überlegungen zum Übergang von den heutigen Technologien und Infrastrukturen betrachtet werden müssen.

¹ "Bis zum Jahr 2050 soll ein Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen in Nordrhein-Westfalen und dem Abbau solcher Gase durch Senken (Treibhausgasneutralität) technologiefördernd, innovationsorientiert und effizient erreicht werden." Entwurf eines Gesetzes zur Neufassung des Klimaschutzgesetzes von Nordrhein-Westfalen, Vorlage 17/4418 des Landtags von Nordrhein-Westfalen vom 21.12.2020

2 Methodische Vorgehensweise

2.1 Begriffsverwendung

CO₂ wird in der Literatur und in der fachlichen Diskussion je nach Herkunft verschiedenen Kategorien zugeordnet. Das in diesem Papier zugrunde gelegte Begriffsverständnis sowie der Umgang mit den verschiedenen Kategorien werden im Folgenden kurz dargelegt:

- “Prozessbedingtes CO₂”: entsteht bei chemischen Reaktionen bei der Umwandlung von Stoffen (z.B. Entsäuerung von Kalkstein: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$).
- “Brennstoffbedingtes CO₂”: entsteht bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe.
- “Biogenes CO₂”: der Kohlenstoff entstammt (ursprünglich) der nicht-fossilen Biomasse. Auch bei der thermischen Nutzung mancher abfallbasierter Brennstoffe wie Altholz, Altreifen (Naturkautschuk) und Klärschlamm entsteht biogenes CO₂.
- “Fossiles CO₂”: der Kohlenstoff entstammt einer fossilen Quelle. Neben Rohöl-basierten Grundstoffen und Brennstoffen sowie Erdgas umfasst dies z.B. auch in Kalkstein gebundenen Kohlenstoff.
- “Unvermeidbares CO₂”: CO₂-Menge, deren Entstehung aus heutiger Sicht und im Rahmen der zugrunde gelegten Grundannahmen (z.B. bzgl. Produktionsmengen) nicht vermieden werden kann.

Mit Blick auf die angestrebte Treibhausgasneutralität soll in NRW ein Gleichgewicht zwischen verbleibenden CO₂-Restemissionen und negativen Emissionen erreicht werden. Industrielle Punktquellen bieten sich aufgrund der hohen CO₂-Konzentration in den Abgasströmen sowie der Größe der Punktquellen für die Installation von CO₂-Abscheideanlagen an, und stellen zusätzlich aus systemischer Sicht einen vielversprechenden Ansatzpunkt für “negative Emissionen” (dauerhafte CO₂-Bindung) dar – durch Kombination des Einsatzes biogener Stoffe bzw. Brennstoffe mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung. Der Einbezug industrieller Punktquellen in eine CO₂-Infrastruktur ist daher aus systemischer Sicht auch dann sinnvoll, falls dort nur biogenes CO₂ entstehen würde.

Die prozessbedingten Emissionen stellen eine besondere Herausforderung für die Klimaneutralität der Industrie dar, da sich diese absehbar nicht vermeiden lassen, insofern die entsprechenden Grundstoffe auch zukünftig hergestellt werden. Jedoch sind auch manche brennstoffbedingte Emissionen aus heutiger Sicht nicht vermeidbar, da für einige Prozesse (z.B. Herstellung von Zementklinker) aus heutiger Sicht auch zukünftig kohlenstoffbasierte Brennstoffe benötigt werden.

Daher sollte aus Sicht der Autoren bei der Auslegung einer CO₂-Infrastruktur eine möglichst weitgehende Berücksichtigung sämtlicher in einem klimaneutralen Zielsystem verbleibender industrieller CO₂-Mengen – sowohl prozessbedingter als auch aus technischen oder systemischen Gründen auftretender brennstoffbedingter CO₂-Mengen, inklusiver biogener CO₂-Mengen – erfolgen. Für die in diesem Papier betrachtete Auslegung von Infrastrukturen wird die Herkunft des CO₂ deshalb als sekundär eingestuft, und es wird aus diesem Grund im Folgenden keine Unterscheidung nach der Kategorie des CO₂ getroffen.

Das hier vorgelegte Papier ist als Unterstützung einer Diskussion in der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft angelegt, in der insbesondere der Umgang mit “unvermeidbaren” CO₂-Mengen thematisiert wird (IN4climate.NRW 2020). Der Grundgedanke der Fokussierung auf “unvermeidbare” Mengen ist, die CO₂-Entstehung möglichst weitgehend zu minimieren, und insbesondere die Verwendung fossiler

Primärbrennstoffe auszuschließen. Die als “unvermeidbar” angesehene CO₂-Menge ist jedoch immer abhängig von Grundannahmen und Präferenzen, daher ist eine eindeutige, objektive quantitative Mengenangabe entsprechend nicht möglich. Im Extremfall wäre jegliche CO₂-Entstehung aus industriellen Quellen “vermeidbar”, falls auf eine Produktion von Grundstoffen oder gänzlich auf eine industrielle Produktion verzichtet würde. Ein solch radikales Verständnis von “Vermeidbarkeit” vertreten die Autoren nicht. Wir gehen davon aus, dass auch zukünftig in NRW industrielle Grundstoffe hergestellt werden (s. Abschnitt 3.2). Dennoch bleibt eine Subjektivität der Perspektive, welcher Aufwand (z.B. benötigte Menge erneuerbarer Energien, Infrastrukturanforderungen) und welche Einschränkungen (z.B. Verwendung weniger geeigneter Grundstoffe) für die Vermeidung einer CO₂-Entstehung an einer bestimmten Art von Punktquelle als vertretbar erscheinen. Eine Festlegung auf eine exakte Definition von “unvermeidbar” erfolgt im Rahmen dieses Papiers daher nicht. Stattdessen deckt das hier vorliegende Papier den Raum, innerhalb dessen eine “unvermeidbare” CO₂-Entstehung in der Industrie mit großer Sicherheit liegt, durch drei Zielbilder ab (s. Abschnitt 3.2).

2.2 Systemgrenzen

Als Systemgrenze wählen wir die industrielle Produktion in NRW, wobei – unter Annahme, dass eine CO₂-Entstehung in anderen Branchen vermeidbar sein wird – der Fokus auf den Grundstoffindustrien liegt. Eine genauere Darstellung der einbezogenen Sektoren und Produktionsprozesse erfolgt unten (Abschnitt 2.3). Entsprechend der gewählten Systemgrenze werden CO₂-Quellen außerhalb des Industriesektors (z.B. Müllverbrennungsanlagen) hier (zunächst) nicht in die Betrachtung einbezogen. Die Rolle der Industrie in einem zukünftigen Gesamt(energie-)system wird jedoch bei den Zielbildern zur zukünftigen CO₂-Entstehung in der Industrie mitgedacht (s. Abschnitt 3.1). Ebenfalls nicht berücksichtigt werden CO₂-Mengen, die außerhalb NRWs entstehen, jedoch ggf. zukünftig durch NRW transportiert würden (z.B. von Süddeutschland nach Rotterdam). Auch der Verbleib von abgeschiedenem CO₂ wird nur bis zur Landesgrenze NRW genauer betrachtet.² Eine Festlegung auf den Verbleib des abtransportierten CO₂ – z.B. Speicherung in Lagerstätten unter der Nordsee oder Nutzung für die Herstellung von Feedstocks außerhalb NRWs – erfolgt nicht.

2.3 Arbeitsschritte

Das Vorgehen zur Identifikation von Infrastrukturanforderungen unvermeidbarer CO₂-Mengen einer klimaneutralen Industrie in NRW umfasst die in Abbildung 1 dargestellten Schritte, die im Folgenden kurz erläutert werden.

² Jedoch unter Berücksichtigung möglicher zukünftiger CO₂-Hubs wie z.B. Rotterdam (s. Abschnitt 5).

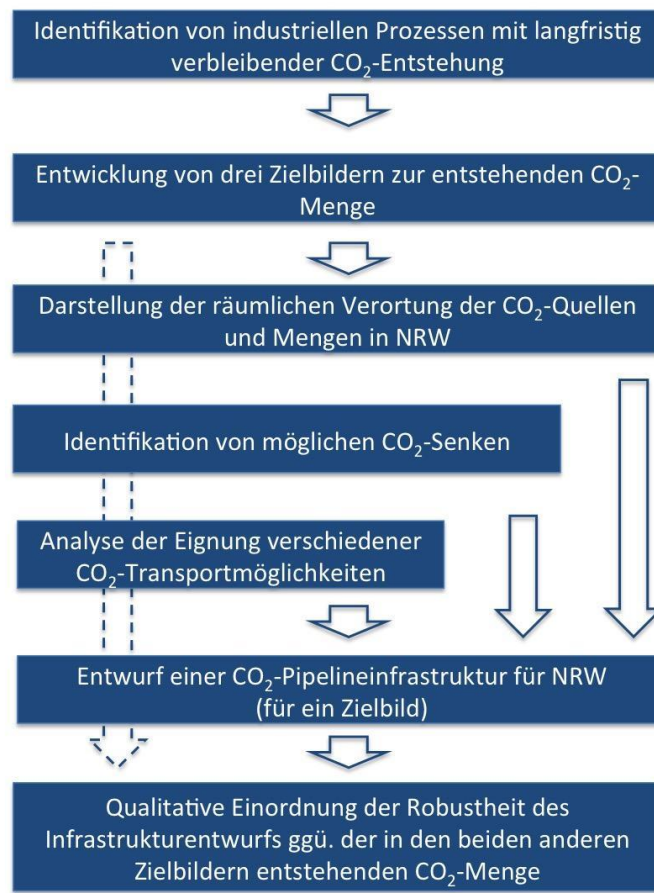


Abbildung 1: Arbeitsschritte im Überblick

Quelle: Eigene Darstellung

Identifikation von industriellen Prozessen mit langfristig verbleibender CO₂-Entstehung

Zunächst werden anhand der Datenbasis (s.u.) diejenigen Prozesse identifiziert, bei denen prozessbedingt CO₂-Mengen entstehen. Dies umfasst insbesondere die Herstellung von Zementklinker und Branntkalk, bei denen prozessbedingt bei der Entsäuerung des Kalksteins CO₂ entsteht. Bei der Herstellung von Glas entsteht CO₂ durch die Zersetzung von Karbonaten im Gemenge. Des Weiteren entsteht in einigen Prozessen der chemischen Industrie (Herstellung von Acrylsäure, Ethylenoxid, Formaldehyd, Maleinsäureanhydrid, Acrylnitril und Soda) prozessbedingt CO₂, sowie ebenfalls bei der Herstellung von Stahl im Elektrolichtbogenofen (Anodenabbrand und Einsatz von C-basierten Schaum-schlackbildnern). Die Primärstahlherstellung über die Hochofenroute, bei der heute große CO₂-Mengen entstehen, wurde nicht in die Betrachtung einbezogen, da mittelfristig von einem Ausstieg aus der Hochofenroute ausgegangen wird. Für die Primäraluminium-Elektrolyse wurde (für alle Zielbilder) unterstellt, dass die heute beim Anodenabbrand auftretenden prozessbedingten Emissionen durch innovative Technologie (inerte Anode) langfristig vermieden werden können. Die Aluminiumindustrie wird daher ebenfalls nicht weiter in die Betrachtungen einbezogen. Ergänzt wurde die Liste industrieller Prozesse mit langfristig (nahezu) unvermeidbarer CO₂-Entstehung jedoch um die Steamcracker der chemischen Industrie. Für diese besteht zwar durch Elektrifizierung und stoffliche Nutzung von Restchemikalien des Verfahrens aus heutiger Sicht zukünftig voraussichtlich eine CO₂-freie Alternative; diese wird jedoch hinsichtlich des hohen Bedarfs an erneuerbaren Energien als besonders kritisch eingestuft. Daher wird nicht in allen Zielbildern (s. u.) von einer vollständigen CO₂-Vermeidung an den Steamcrackern ausgegangen. Des Weiteren werden die Bereitstellung von Prozessdampf in der

chemischen Industrie und von Hochtemperaturwärme für die Walzwerke der Stahlindustrie mit in die Betrachtung einbezogen. Für beide Fälle bestehen zwar über strombasierte Verfahren und die thermische Nutzung von Wasserstoff CO₂-freie Alternativen. Im Zielbild *BECCS* (s. u.) spielen diese Anwendungen jedoch eine spezielle Rolle mit Blick auf mögliche negative Emissionen des Industriesektors.

Entwicklung von drei Zielbildern zur entstehenden CO₂-Menge

Bzgl. der zukünftig zu erwartenden CO₂-Menge aus den identifizierten Prozessen können verschiedene Abschätzungen getroffen werden. Um eine Bandbreite an möglichen Entwicklungen abzubilden wurden drei Zielbilder entwickelt, die unten genauer ausgeführt werden. Die Zielbilder umfassen jeweils standortscharfe Abschätzung zukünftiger CO₂-Mengen für das Jahr 2045 in NRW.

Darstellung der räumlichen Verortung der CO₂-Quellen und Mengen in NRW

Die in den Zielbildern jeweils entstehenden CO₂-Mengen wurden mittels GIS in Karten abgebildet, wobei jeweils die Größenordnung der an einem Standort anfallenden CO₂-Menge und sowie der Sektor, dem ein Standort zugeordnet ist, dargestellt werden. Die Karten ermöglichen eine visuelle Orientierung und dienen als Grundlage für die Identifikation von räumlichen Clustern.

Identifikation von CO₂-Senken

Als Senken werden in dieser Betrachtung der Export des CO₂ zu möglichen Speicherprojekten außerhalb Deutschlands angenommen. Die Identifikation und Quantifizierung möglicher CO₂-Senken wie die Nutzung des Kohlenstoffes in chemischen Prozessen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, da es sich dabei um ein eigenes komplexes Thema handelt mit dem sich das Projekt SCI4climate.NRW und die Arbeitsgruppe Kohlenstoffwirtschaft noch beschäftigen werden. Sollte eine maßgebliche Menge des abzuscheidenden CO₂ in eine Weiternutzung in der industriellen Produktion überführt werden, so würden sich die Darstellung möglicher Infrastrukturen von dieser Arbeit sicher unterscheiden.

Analyse der Eignung verschiedener CO₂-Transportmöglichkeiten

Bezugnehmend auf die CO₂-Mengen der Punktquellen des Zielbilds *SYS* wurden verschiedene CO₂-Transportoptionen anhand ausgewählter Kriterien miteinander verglichen. Die räumliche Anordnung der Punktquellen in NRW wird bei der Einschätzung möglicher Transportoptionen berücksichtigt und dient als Grundlage für die Auswahl der benötigten Infrastrukturen.

Entwurf einer CO₂-Pipelineinfrastruktur für NRW (für ein Zielbild)

Ausgehend von den Ergebnissen der Analyse der Eignung der CO₂-Transportmöglichkeiten wird für die CO₂-Mengen des Zielbilds *SYS* ein CO₂-Infrastrukturentwurf entwickelt. Ziel des Infrastrukturentwurfs ist es einen möglichst hohen Anteil der Gesamt-CO₂-Menge unter Berücksichtigung der spezifischen Infrastrukturkosten einzubinden. Die Auswahl und Clusterung der einzubindenden Industriestandorte ist daher elementarer Bestandteil des Infrastrukturentwurfs.

Qualitative Einordnung der Robustheit des Infrastrukturentwurfs ggü. der entstehenden CO₂-Menge in anderen Zielbildern

Neben dem Zielbild *SYS* werden die Zielbilder "*BECCS*" und "*Tech-Min*" erstellt. Für diese beiden Zielbilder wird im Rahmen dieser Arbeit kein eigener Infrastrukturentwurf entwickelt. Um die Unterschiede ggü. dem Zielbild *SYS* und dem zugehörigen CO₂-Infrastrukturentwurf herauszustellen werden aber die signifikanten Änderungen benannt und qualitativ eingeordnet.

2.4 Datenbasis

Als Basis für die Identifikation von industriellen Prozessen mit langfristig (nahezu) unvermeidbarer CO₂-Entstehung sowie als Datenbasis für die Berechnung der zukünftig entstehenden CO₂-Mengen wurde die Datenbank des Industriemoduls des Energienachfragemodells WISEE-EDM³ des Wuppertal Instituts herangezogen. Die Datenbank des Modells wurde über mehr als zehn Jahre basierend auf Publikationen (Wissenschaft und Verbände), ExpertInnenengesprächen, behördlichen Daten und Web-Recherche aufgebaut und kontinuierlich aktualisiert und weiterentwickelt, und umfasst Produktionsanlagen aus den in der folgenden Tabelle aufgeführten Sektoren für die angegebene geographische Abdeckung:

Tabelle 1: Sektorale und geographische Abdeckung der verwendeten Datenbasis

Quelle: Eigene Darstellung

EU-27 + 3*	Zusätzlich für Deutschland
Eisen- und Stahlherstellung	Papier und Pappe
Grundstoffchemie (80 Produkte)	Nicht-Eisen-Metalle (Aluminium, Zink, Kupfer, Blei)
Raffinerien	Zement und Kalk
	Glas

*Schweiz, Norwegen, UK

Die Datenbank umfasst insgesamt ca. 800 Produktionsstandorte in Europa. Diese sind mit Geo-Koordinaten verknüpft und den EU-Mitgliedsstaaten sowie verschiedenen NUTS-Ebenen⁴ zugeordnet. Zudem sind mehr als 2600 industrielle Produktionsanlagen hinterlegt, die jeweils einem Standort zugeordnet sind. Die Produktionsanlagen sind bzgl. der verwendeten Technologie und ihrer Produktionskapazität spezifiziert. Für besonders energieintensive Anlagen ist zudem das Jahr der Errichtung erfasst.

Für NRW wurden anhand dieser Datenbasis 97 Produktionsprozesse an 53 Standorten identifiziert (s. Tabelle 2), an denen in mindestens einem der drei Zielbilder im Jahr 2045 eine CO₂-Entstehung angenommen wird.⁵ Die Anzahl der Standorte in den Zielbildern gliedert sich wie folgt: *Tech_Min* 47, *SYS* 50 und *BECCS* 53 (siehe Kapitel 3).

³ Die Abkürzung steht für: „Wuppertal Institute System Model Architecture for Energy and Emission Scenarios – Energy Demand Model“.

⁴ NUTS (französisch Nomenclature des unités territoriales statistiques) bezeichnet eine hierarchische Systematik zur eindeutigen Identifizierung und Klassifizierung der räumlichen Bezugseinheiten der amtlichen Statistik in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union (https://www.destatis.de/Europa/DE/Methoden-Metadaten/Klassifikationen/UebersichtKlassifikationen_NUTS.html). Deutsche NUTS-1 Gebiete entsprechen den Bundesländern.

⁵ Steamcracker an Raffinerie-Standorten wurden hier der Grundstoffchemie zugerechnet.

Tabelle 2: Anzahl der berücksichtigten Standorte und Prozesse in NRW je Sektor

Quelle: Eigene Darstellung

	Anzahl Standorte	Anzahl Prozesse
Eisen und Stahl	9	11
Grundstoffchemie	10	17
Zement	10	11
Kalk	10	43
Glas	14	15
Gesamt	53	97

3 Zielbilder zur Quantifizierung der CO₂-Mengen einer (weitgehend) klimaneutralen Industrie in NRW im Jahr 2045

3.1 Drei Zielbilder: *Tech_Min*, *SYS*, *BECCS*

Die zukünftige CO₂-Entstehung an industriellen Punktquellen in einem klimaneutralen NRW wird für drei Zielbilder abgeschätzt, in denen die Einbettung des Industriesektors ins Energiesystem auf unterschiedliche Weise berücksichtigt wurde. Jedes Zielbild bildet eine hypothetische Ausgestaltung des Industriesektors im Jahr 2045 ab.

- **Zielbild *Tech_Min*:** In diesem Zielbild wird für jede Punktquelle das aus Sicht der Einzelanlage technisch mögliche Minimum der CO₂-Entstehung angenommen. Es wird dafür angenommen, dass der durch die Umstellung einiger Prozesse entstehende, sehr hohe, Bedarf an erneuerbaren Energien gedeckt werden kann und benötigte Infrastrukturen an jedem Standort verfügbar sind.
- **Zielbild *SYS*:** In diesem Zielbild wird eine systemische Sicht über den Industriesektor hinaus eingenommen, und eine (aus Sicht des Wuppertal Instituts plausible) Abwägung zwischen einer Minimierung der CO₂-Entstehung aus industriellen Quellen, dem dabei entstehenden Bedarf an erneuerbarer Energie, Infrastrukturerfordernissen, Kosten, sowie sonstiger systemischer Effekte (z.B. Verlagerung von Abfallströmen) vorgenommen. Gegenüber dem Zielbild *Tech-Min* kommen hier vor Allem CO₂-Mengen aus abfallbasierten Alternativbrennstoffen der Zementklinker- und Branntkalkherstellung als auch aus einer thermischen Nutzung von Feedstocks an den Steamcrackern hinzu.
- **Zielbild *BECCS*:** Dieses, an die Studie „Klimaneutrales Deutschland“ (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2020) angelehnte, Zielbild entspricht weitgehend dem Zielbild *SYS*. Jedoch werden für die Bereitstellung von Prozessdampf in der Grundstoffchemie sowie für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme für die Walzwerke der Stahlindustrie gezielt biogene Energieträger (gasifizierte Biomasse) eingesetzt, um (in Kombination mit CCS) negative Emissionen zu erzeugen.

3.2 Annahmen im Detail

Für alle Zielbilder wird angenommen, dass bis zum Jahr 2045 jede Produktionsanlage (mindestens) einmal reinvestiert oder zumindest grundlegend nachgerüstet wurde. Es wird daher (vereinfachend) angenommen, dass im Jahr 2045 alle Standorte über die jeweils im Zielbild angenommene, fortschrittlichste, Technologie verfügen. Die heute bestehenden industriellen Standorte in Nordrhein-Westfalen bleiben in den Zielbildern auch zukünftig erhalten, entsprechend wurden keine Standortschließungen oder –verlagerungen angenommen.

Die in Tabelle 3 dargestellten Annahmen zu Produktionsmengen im Jahr 2045 im Vergleich zu heute (Basisjahr 2016) wurden in allen Zielbildern gleich getroffen. Sie basieren auf historischen Trends, publizierten Szenariostudien zur Entwicklung spezifischer Sektoren, eigenem Expertenwissen sowie Konsistenzbetrachtungen.⁶

⁶ Bzgl. der zukünftigen Produktionsmenge von Olefinen und Aromaten in Steamcrackern sind sehr unterschiedliche Szenarien denkbar. Hier wurde vereinfachend von einer gleichbleibenden Produktionsmenge ausgegangen.

Zielbilder zur Quantifizierung der CO₂-Mengen einer (weitgehend) klimaneutralen Industrie in NRW im Jahr 2045

Tabelle 3: Produktionsmengen

Quelle: Eigene Darstellung

Produkt	Index der Produktionsmenge im Jahr 2045 (Basisjahr 2016 =100)
Stahl (aus Elektrolichtbogenofen)*	880
Olefine u. Aromaten (Steamcracker)	100
Sonstige chemische (Zwischen-)Produkte	100
Zementklinker	95
Branntkalk	81
Behälterglas	95

* Sowohl Sekundärstahlherstellung als auch Primärstahlherstellung über die EAF-DRI-Route

In allen Zielbildern entstehen in gleicher Weise im Jahr 2045 in der Grundstoffchemie prozessbedingte CO₂-Mengen bei der Herstellung von Acrylsäure, Ethylenoxid, Formaldehyd, Maleinsäureanhydrid und Acrylnitril. Unterschiede zwischen den Zielbildern bestehen insbesondere bzgl. der Beheizung der Steamcracker und der Bereitstellung von Prozessdampf, sowie bei der Herstellung von Soda.

Für die Primärstahlherstellung wird in allen Zielbildern eine Umstellung auf die Direktreduktion von Eisenerz mit Hilfe von Wasserstoff (DRI-Verfahren) sowie eine Weiterverarbeitung des Eisenschwamms im Elektrolichtbogenofen unterstellt (DRI-EAF-Route). Die Sekundärstahlherstellung wird zwischen den Zielbildern nicht variiert. Unterschiede ergeben sich in der Stahlindustrie bei der Bereitstellung von Hochtemperaturwärme in Walzwerken sowie bei der Bereitstellung von Kohlenstoff für metallurgische Zwecke.⁷

Bzgl. der Herstellung von Zementklinker, Branntkalk, Behälterglas und Flachglas wurde zwischen den Zielbildern die Bereitstellung von Prozesswärme variiert, wohingegen die Annahmen bzgl. der Herstellung von Spezialglas, Glasfaser und Steinwolle in allen Zielbildern gleich sind.

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die in den Zielbildern angenommenen Prozesse und die eingesetzten Energieträger.

⁷ Im Zielbild *Tech_Min* wird unterstellt, dass bei der Primärstahlherstellung im DRI-EAF-Verfahren das im Elektrolichtbogenofen entstehende CO₂ aufgefangen und der Kohlenstoff für metallurgische Zwecke der Stahlherstellung rezykliert wird.

Zielbilder zur Quantifizierung der CO₂-Mengen einer (weitgehend) klimaneutralen Industrie in NRW im Jahr 2045

Tabelle 4: Annahmen der Prozesse und der eingesetzten Energieträger in den Zielbildern

Quelle: Eigene Darstellung

Produkt / Prozess	Tech_Min	SYS	BECCS
Acrylsäure, Ethylenoxid, Formaldehyd, Maleinsäureanhydrid, Acrylnitril	(gleichbleibende Prozesse mit prozessbedingten Emissionen)	(gleichbleibende Prozesse mit prozessbedingten Emissionen)	(gleichbleibende Prozesse mit prozessbedingten Emissionen)
Soda	Optimiertes Solvay-Verfahren (kein CO ₂)	Solvay-Verfahren (prozessbed. CO ₂)	Solvay-Verfahren (prozessbed. CO ₂)
Steamcracker*	Elektrifizierung; stoffliche Nutzung von Restchemikalien	Konventioneller Betrieb, thermische Nutzung von Restchemikalien	Konventioneller Betrieb, thermische Nutzung von Restchemikalien
Dampfbereitstellung Chemiepark	Strom / H ₂	Strom / H ₂	Gasifizierte Biomasse
Elektrolichtbogenofen (Schrott / DRI-EAF)	Elektrolichtbogenofen; DRI-EAF:Rezyklierung von CO ₂ in DRI-Synthesegas	Elektrolichtbogenofen	Elektrolichtbogenofen
Hochtemperatur-Wärme für Walzwerke (Stahl)	H ₂	H ₂	Gasifizierte Biomasse
Zementklinker	Elektrifizierung Kalzinator, Hauptfeuerung: 20 % H ₂ , 80 % Biomethan	Alternativbrennstoffe (90 %), biogene Brennstoffe (10%)	Alternativbrennstoffe (90 %), biogene Brennstoffe (10%)
Branntkalk	50 % H ₂ /Elektrifizierung, 50 % Biomethan	Alternativbrennstoffe (50 %), Biogas (50 %, aufbereitet)	Alternativbrennstoffe (50 %), Biogas (50 %, aufbereitet)
Behälterglas / Flachglas	Elektrische Zusatzheizung, Beimischung H ₂ ins Brenngas (50 % _{vol}), Biomethan	Elektrische Zusatzheizung, Biogas (aufbereitet)	Elektrische Zusatzheizung, Biogas (aufbereitet)
Spezialglas, Glasfaser	Elektrifizierung	Elektrifizierung	Elektrifizierung
Steinwolle	(Effizienter) konventioneller Prozess	(Effizienter) konventioneller Prozess	(Effizienter) konventioneller Prozess

* Naphtha als Feedstock. Mit berücksichtigt wurde die Nutzung von am Steamcracker entstehenden Restchemikalien (thermisch am Steamcracker oder stofflich mittels H₂-basierter Verfahren)

3.3 CO₂-Entstehung in den drei Zielbildern

Abbildung 2 fasst die CO₂-Entstehung in den drei Zielbildern zusammen. Im Zielbild *Tech-Min* entstehen in Summe 7.000 kt CO₂/a, wobei die mit Abstand größten Mengen auf die Herstellung von Zementklinker und Branntkalk entfallen.

Zielbilder zur Quantifizierung der CO₂-Mengen einer (weitgehend) klimaneutralen Industrie in NRW im Jahr 2045

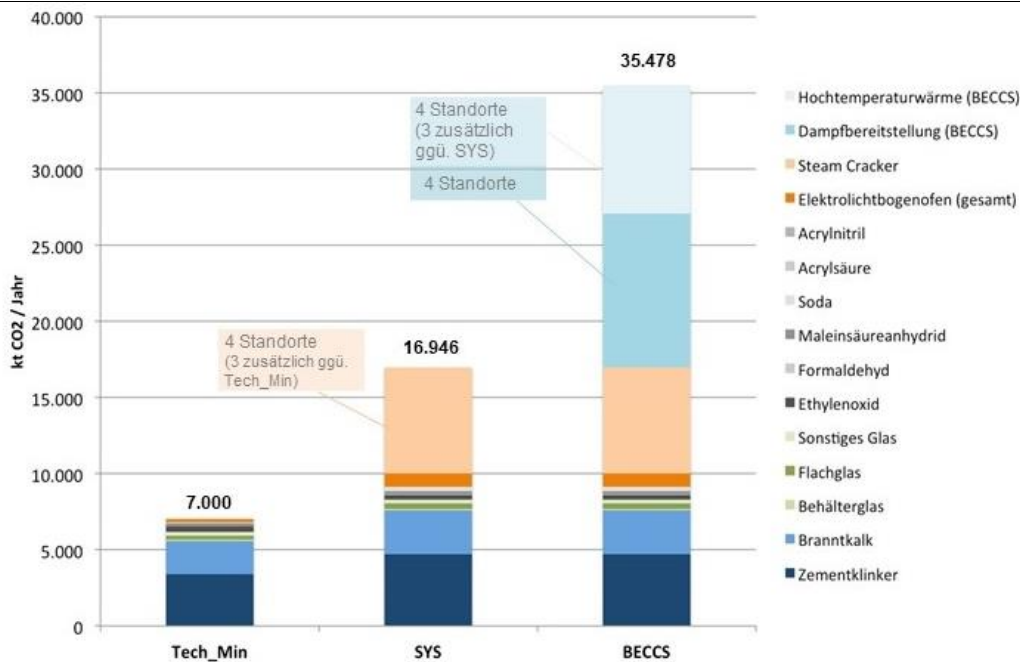


Abbildung 2: CO₂-Entstehung an industriellen Quellen in NRW im Jahr 2045 gemäß Zielbildern
Quelle: Eigene Darstellung

Im Zielbild *SYS* erhöht sich die CO₂-Entstehung bei der Herstellung von Zementklinker und Brantkalk, da im Zielbild aus systemischen Überlegungen heraus (verstärkt) abfallbasierte Alternativbrennstoffe und biogene Brennstoffe eingesetzt werden. Die CO₂-Entstehung an Elektrolichtbogenöfen erhöht sich, da im Zielbild *SYS* abweichend vom Zielbild *Tech_Min* nicht davon ausgegangen wird, dass im Elektrolichtbogenofen entstehendes CO₂ abgeschieden und der Kohlenstoff für metallurgische Zwecke der Stahlherstellung wiederverwendet wird. Insbesondere erhöht sich die CO₂-Entstehung im Zielbild *SYS* jedoch deutlich durch die veränderten Annahmen bzgl. der Steamcracker. Hier wird nicht von einer Strom- und Wasserstoff-intensiven (und damit auch teuren) Elektrifizierung der Steamcracker ausgegangen; auch weil das CO₂ sehr konzentriert an nur vier Standorten anfällt und damit prinzipiell vergleichsweise leicht aufgefangen werden kann.

Im Zielbild *BECCS* entsteht gegenüber dem Zielbild *SYS* etwa die doppelte CO₂-Menge. Der gezielte Einsatz von Biomasse für die Bereitstellung von Prozessdampf für die chemische Industrie sowie für Hochtemperaturwärme in den Walzwerken der Stahlindustrie ermöglicht in diesem Zielbild sehr große Ströme biogenen CO₂s an insgesamt (nur) acht Standorten zu konzentrieren, was im Zielbild die Möglichkeit für eine effiziente Erzielung negativer Emissionen des Industriesektors in NRW schafft.

Das weitere Vorgehen fokussiert auf das Zielbild *SYS*. Das Zielbild *Tech_Min* dient einer Auslotung des aus heutiger Sicht technisch möglichen Minimums einer zukünftigen CO₂-Entstehung; seine Realisierung würde jedoch den Einsatz großer Mengen erneuerbarer Energie erfordern, die aus unserer Sicht mit Blick auf das gesamte Energiesystem an anderer Stelle gewinnbringender eingesetzt werden könnten. Zudem würde es eine weit in die Fläche reichende H₂-Infrastruktur erfordern (s. u. zur räumlichen Verteilung der Standorte), die aus unserer Sicht – wiederum mit Blick auf das gesamte Energiesystem

Zielbilder zur Quantifizierung der CO₂-Mengen einer (weitgehend) klimaneutralen Industrie in NRW im Jahr 2045

– nicht errichtet werden müsste.⁸ Das Zielbild *BECCS* wiederum beleuchtet eine interessante Option – negative Emissionen im Industriesektor – deren Umsetzung jedoch keinesfalls zwingend ist. In Summe erscheint uns das Zielbild *SYS* unter den drei gewählten Zielbildern als die aus heutiger Sicht beste Annäherung an eine aus systemischer Perspektive sinnvoll defossilisierte Industrie in einem klimaneutralen NRW.

⁸ In Anlehnung an Szenariostudien, die vom Wuppertal Institut durchgeführt wurden oder an denen das Wuppertal Institut beteiligt war, wird von einem weit überwiegenden Einsatz von direkt-elektrischen Technologien im Verkehr sowie für die Beheizung von Gebäuden ausgegangen, so dass in der Fläche keine H₂-Versorgung benötigt würde.

4 Geografische Verteilung der CO₂-Quellen im Jahr 2045 in NRW

In Abbildung 3 ist die räumliche Verteilung der CO₂-Entstehung im Jahr 2045 für das Zielbild SYS zu sehen. In diesem Zielbild beträgt die CO₂-Menge in Nordrhein-Westfalen ca. 16,9 Mt. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung ist deutlich zu sehen, dass sich ein großer Teil der Standorte in Süd-West-Westfalen sowie in Ostwestfalen befindet. Weiterhin gibt es einzelne Standorte, welche im ländlichen Raum liegen. Die CO₂-Mengen (ca. 0,8 Mt) in der Stahlindustrie fallen vor allem am Standort in Duisburg an, was auf den angenommenen zukünftigen Einsatz eines Elektrolichtbogenofens in der Primärstahlerzeugung zurückzuführen ist. Neben dem Standort in Duisburg befinden sich in Nordrhein-Westfalen aber auch viele kleinere Punktquellen der Sekundärstahlerzeugung, die verteilt in der Fläche liegen. In der Grundstoffchemie sind die dargestellten CO₂-Mengen (ca. 7,8 Mt) auf Steamcracker und CO₂-Entstehung in den Chemieparks entlang des Rheins und im Ruhrgebiet zurückzuführen. Die CO₂-Mengen aus der Zementindustrie (ca. 4,8 Mt) haben nach den CO₂-Mengen aus der Grundstoffchemie den größten Anteil (s.o.). Die Standorte der Zementindustrie konzentrieren sich hauptsächlich in Ostwestfalen in der Nähe der Kalksteinvorkommen. Die CO₂-Mengen der Kalkindustrie (ca. 2,8 Mt) sind an dritter Stelle nach der Grundstoffchemie und der Zementindustrie einzuordnen. Die Kalkindustrie ist im Gegensatz zu der Verteilung der Zementindustrie nicht räumlich zentriert. Auffällig ist hierbei das Werk Flandersbach der Lhoist Germany Rheinkalk GmbH in Wülfrath, welches als größtes Kalkwerk Europas und einer großen CO₂-Menge besonders hervorsticht. Die CO₂-Mengen (ca. 0,7 Mt) der Glasindustrie sind im Vergleich eher gering und überwiegend im westlichen Teil von Nordrhein-Westfalen angesiedelt.

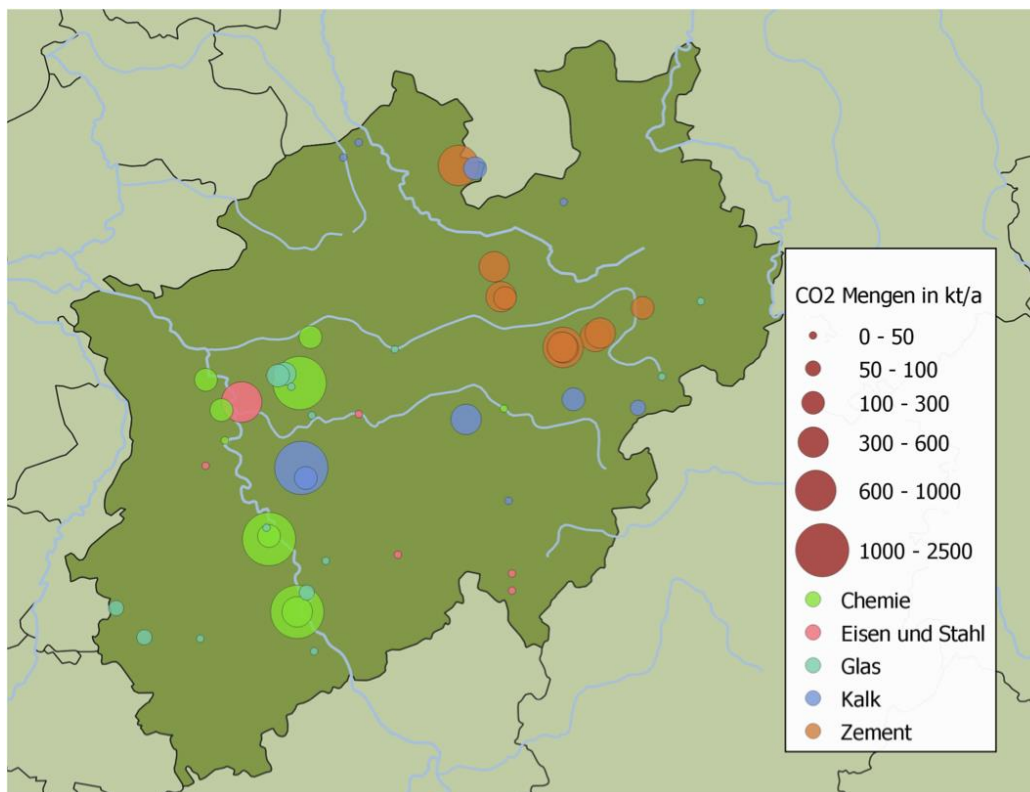


Abbildung 3: Geographische Verteilung der Punktquellen inkl. der CO₂-Mengen in NRW im Jahr 2045 im Zielbild SYS

Quelle: Eigene Darstellung

5 Von NRW aus erreichbare Speicherstätten

Um aufzuzeigen, dass ein Abtransport der in den Zielbildern anfallenden CO₂-Mengen aus heutiger Sicht durchaus vorstellbar ist werden hier zwei aktuelle Projekte vorgestellt, die für eine Speicherung von CO₂ aus NRW grundsätzlich in Frage kommen.

5.1 Norwegen (Northern Lights)

Das Projekt Northern Lights entwickelt eine CO₂-Transport- und Speicherstruktur, die Unternehmen als Serviceangebot nutzen können um CO₂-Mengen langfristig einzulagern. Das Unternehmen will mit Hilfe eigener Schiffe das CO₂ aus europäischen Häfen abholen und in der Nordsee westlich von Norwegen bis zu 2600 Meter Tiefe unter dem Seeboden permanent einspeichern. Die theoretische Speicherkapazität der Johansen-Formation (Saline Aquifer) liegt in der Größenordnung von > 1 GtCO₂, wenn man die Restsole-Sättigung (ca. 20 %) mit einbezieht (Eigestad 2009). Ab dem Jahr 2024 will Northern Lights 1,5 Mt CO₂/a einspeichern, eine Erweiterung bis 5 Mt CO₂/a ist vorgesehen sofern die Marktnachfrage vorhanden ist. Das Projekt strebt an bis zum Jahr 2030 Kosten von 30 - 55 €/t für den Transport und die Speicherung zu erreichen. Northern Light gehört zu dem norwegischen Projekt Longship, in dem auch die Abscheidung und der Transport von CO₂ aus einem Zementwerk (Brevik) und einer Müllverbrennungsanlage bei Oslo enthalten ist. Ein Teil der vorgesehenen Speichermenge (0,8 von 1,5 Mt/a) ist daher für diese Quellen bereits vorgesehen. Das Projekt Northern Lights wurde im März 2021 von den Partnern Equinor ASA, Royal Dutch Shell plc und Total SE gegründet (Northern Lights 2021).

Für Nordrhein-Westfalen ist dieses Konzept interessant, da durch eine Hafenanbindung der Punktquellen ein Abtransport und eine Speicherung (oder auch eine Nutzung) von CO₂ außerhalb Deutschlands möglich wäre.

5.2 Rotterdam (Porthos)

Das Projekt Porthos entwickelt ebenfalls eine CO₂-Transport- und Speicherstruktur, die Unternehmen als Serviceangebot nutzen können, um CO₂-Mengen einzulagern. Das Unternehmen will CO₂ über eine Sammelpipeline durch das Hafengebiet von Rotterdam über eine bestehende offshore Erdgas-Pipeline an leere Erdgasfelder in der Nordsee leiten und dort speichern. Dabei sollen bestehende Infrastrukturen aus der Erdgasförderung wie vorhandene Plattformen in der Nordsee genutzt werden. Das P18 Gasfeld liegt etwa 20 km vor der Küste der Niederlande in einer Tiefe zwischen 3175 und 3455 Metern. Die theoretische Speicherkapazität des P18-Feldes liegt laut Aussage des Unternehmens bei 37 Mt CO₂ mit einer jährlichen Speichermenge von ungefähr 2,5 Mt CO₂. Weitere Gasfelder liegen in unmittelbarer Nähe. Ab dem Jahr 2022 soll mit der Errichtung des Systems begonnen werden, im Jahr 2024 soll es einsatzfähig sein. Die vorhandenen Speicherkapazitäten sind für Unternehmen auf dem Gelände des Port of Rotterdam (Air Liquide, Air Products, ExxonMobil und Royal Dutch Shell) bereits reserviert. Eine mögliche Ausweitung des Projektes und der Partner wird geprüft (Porthos 2021).

Porthos ist ein gemeinsames Projekt der staatlichen Unternehmen Energie Beheer Nederland (EBN), Nederlandse Gasunie NV und Port of Rotterdam Authority.

6 CO₂-Transportmöglichkeiten in NRW

Ein CO₂-Transport in Nordrhein-Westfalen könnte – zunächst allgemein betrachtet – entweder per Pipeline, per Binnenschifffahrt, per Zug oder per LKW erfolgen. Aufgrund der niedrigen CO₂-Transportkapazitäten von LKW, á 20 tCO₂, sowie die in den Infrastrukturentwurf einbezogenen CO₂-Mengen der Industriestandorte von mindestens 60 kt CO₂/a wurde die Transportmöglichkeit per LKW nicht tiefergehend betrachtet, da > 3000 LkW pro Jahr als nicht praktikabel angesehen werden (Peletiri et al. 2018). Im Folgenden wird auf die Auswahl der in Betracht kommenden Transportmedien anhand der Kriterien: Kontinuität des Transports, Bandbreite der Transportkapazitäten, Erweiterbarkeit der Kapazität, Flexibilität der Standorte sowie Risiken näher eingegangen, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: CO₂-Transportmöglichkeiten und ausgewählte Kriterien für das Zielbild SYS in NRW
Quelle: Eigene Darstellung

Kriterien	Pipeline (on-shore)	Schifffahrt	Zug
Kontinuität Transport	Ja	Nein	Nein
Bandbreite Transportkapazitäten	60 – 37.000 kt CO ₂ pro Pipeline	2,5 – 7,5 kt CO ₂ pro Schiff	1 – 3 kt CO ₂ pro Zug
Erweiterbarkeit Kapazität	Nein (großer Aufwand) ⁹	Ja	Ja
Flexibilität Standorte	Nein	Ja (teilweise)	Ja (teilweise)
Risiken (Wetter; Unfall)	Geringer ggü. Schiff und Zug	Höher ggü. Pipeline	Höher ggü. Pipeline

6.1 Vergleich ausgewählter Transportmedien (Pipeline, Schifffahrt und Zug)

Der CO₂-Transport per Pipeline ist zum heutigen Zeitpunkt wohl erprobt und findet sowohl im Klein- als auch im Großmaßstab seine Anwendung in Projekten. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass aufgrund von hohen Investitionskosten bei Pipelines die Skalierung der Transportkosten in Abhängigkeit der Flussmenge steht und damit die Anwendung dieses Transportmediums eher im großindustriellen Maßstab sinnvoll ist. Die Anwendung von Pipelines als Transportmedium findet schon seit den frühen siebziger Jahren statt und bedarf daher keiner Neu- oder Weiterentwicklung im Gegensatz zu z. B. dem CO₂-Transport per Schiff. Im Jahr 2015 waren global betrachtet mehr als 8000 Kilometer CO₂-Pipeline in Betrieb, wobei der größte Anteil mit über 7200 Kilometer auf die Vereinigten Staaten von Amerika zurückzuführen ist (Lu et al. 2020). Der CO₂-Transport per Schiff hat sich hingegen durch den Einsatz seit mehr als 30 Jahren in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie bewährt, jedoch haben diese Schiffe eher niedrige Transportvolumina (Durusut und Joos 2018).

Die Unterschiede der dargestellten Transportmedien liegen zunächst darin, dass Pipelines gegenüber Zügen und Schiffen einen kontinuierlichen Transport gewährleisten und somit kein zusätzlicher Infrastrukturbedarf z. B. in Form von Zwischenspeichern nötig ist (siehe Tabelle 5). Hinsichtlich der Transportkapazitäten haben CO₂-Pipelines durch ihre große Bandbreite von 60 bis 37.000 kt CO₂/a einen Vorteil, um einen kontinuierlichen Transport von großen CO₂-Mengen zu gewährleisten. Die Transportkapazitäten von Schiffen liegen zum jetzigen Zeitpunkt in einer Bandbreite von ca. 2,5 kt CO₂ bis 7,5 kt CO₂ pro Schiff, wobei für Nordrhein-Westfalen die Binnenschifffahrt aufgrund von bedingt befahrbaren Gewässern lediglich eine Kapazität von ca. 2 kt CO₂ pro Schiff erlaubt (Le Van und Balzer 2019;

⁹ Wenn die Pipeline an die Kapazitätsgrenze der Auslegung stößt, dann nicht ohne Weiteres erweiterbar.

Ruppert et al. 2020). Der Zug als letzte der dargestellten Transportoptionen bietet mit 1 bis 3 kt CO₂ pro Zug die niedrigste Bandbreite in der Transportkapazität (Fischedick et al. 2007; Ruppert et al. 2020). Bei dem Kriterium der Erweiterbarkeit der Kapazität liegt der Vorteil bei Schiffen und Zügen, da ohne größeren Aufwand durch die Hinzunahme weiterer Schiffe oder Züge die Gesamttransportkapazität erhöht werden kann. Die Erweiterung der Kapazität von Pipelines ist bei bereits installierter Infrastruktur nur durch die Erhöhung des Transportdrucks möglich. Damit kommt der Auswahl des Materials von Pipelines eine entscheidende Rolle hinzu, um auch zukünftig die Erweiterbarkeit zu ermöglichen. Im Hinblick auf das Berücksichtigen weiterer Standorte und auch CO₂-Senken (Kriterium: Flexibilität Standorte) haben Pipelines einen klaren Nachteil gegenüber Schiffen oder Zügen, da sie im onshore-Bereich fest installiert sind. Schiffe und Züge können hingegen, sofern die Wasserwege und das Schienennetz es zulassen, beliebig neue Standorte einbeziehen. Bezugnehmend auf die Risiken der ausgewählten Transportmedien ist der Transport per Pipeline gegenüber Schiffen oder Zügen wiederum im Vorteil. Durch die Zunahme von Unsicherheiten beim Wetter (z. B. Niedrigwasser oder Sturm) sowie einer größeren Anfälligkeit auf dem Transportweg per Zug ist der kontinuierliche Transport per Pipeline im Vergleich unanfälliger für Störungen.

6.2 Auswahl eines Transportmediums für das Zielbild SYS

Nachdem im Kapitel 6.1 ein Vergleich der ausgewählten Transportmedien durchgeführt wurde, erfolgt hier eine Erläuterung der Auswahl eines Transportmediums.

Um die im Jahr 2045 entstehenden CO₂-Mengen des Zielbilds SYS in Höhe von ca. 16,9 Mt CO₂/a effizient in Richtung der Speicherstätten zu transportieren, ist die Nutzung von Pipelines in dem hier dargestellten Fall unverzichtbar. Aufbauend auf den Vor- und Nachteilen der unterschiedlichen Transportmedien sowie der Zielstellung eines Entwurfs für Nordrhein-Westfalen, ist bei dieser jährlichen Gesamtkohlenstoffdioxidmenge der ausschließliche Einsatz von Schiffen oder Zügen nicht ausreichend. Allein für den Abtransport einer CO₂-Menge von ca. 4 Mt/a müssten z.B. je nach Kapazität der Züge ca. 1300 bis 4000 Züge pro Jahr eingesetzt werden. Dies entspricht, ausgeschlossen des Zementwerks in Lengerich, in etwa der CO₂-Menge der Zementwerke in Ost-Westfalen. Die Transportoptionen Zug oder Schiff setzen weiterhin eine geographische Verortung der Punktquellen an der bestehenden Bahninfrastruktur oder einen direkten Zugang zu größeren Wasserstraßen voraus. Für diese beiden Transportoptionen müsste zudem ein Zubau von Zwischenspeichern an den Umladestationen erfolgen.

Die Transportoption Zug kann jedoch für kleinere Punktquellen, welche nicht in das Pipelinesystem eingebunden sind, eine alternative Option darstellen.

Sogenannte hybride Transportlösungen, die Kombination von unterschiedlichen Transportmedien, sind aufgrund der technisch unterschiedlichen CO₂-Transportbedingungen (Druck, Temperatur und Aggregatzustand) wirtschaftlich betrachtet schwer darstellbar. Aufgrund eines gesamtheitlichen Ansatzes, der unterschiedlichen geographischen Verortung der Punktquellen sowie eines präferierten kontinuierlichen Transports, wird die Transportoption der Pipeline für die anfallenden CO₂-Mengen des Zielbilds SYS im Jahr 2045 in Nordrhein-Westfalen als beste Option angesehen. Der Einsatz der Transportmedien Zug und LKW stellt jedoch für den Aufbau des dargestellten Zielbilds eine praktikable Möglichkeit dar.

7 CO₂-Pipeline-Infrastrukturentwurf für das Zielbild SYS

In diesem Kapitel wird, ausgehend von den ausgewiesenen CO₂-Mengen des Zielbilds SYS (s. Abschnitt 3.2), ein CO₂-Pipeline-Infrastrukturentwurf für Nordrhein-Westfalen entwickelt. Wie in Kapitel 6 herausgearbeitet wurde, ist der Einsatz eines CO₂-Pipelinesystems die adäquate Infrastrukturlösung, um der im Jahr 2045 anfallenden CO₂-Menge (knapp 17 Mt) gerecht zu werden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der in dieser Arbeit entwickelte CO₂-Infrastrukturentwurf ein vereinfachtes, möglichst optimales Zielsystem im Jahr 2045 darstellt. Er zeigt lediglich ein mögliches Infrastrukturkonzept zur Problemlösung auf und hat nicht den Anspruch uneingeschränkt als einzige Infrastrukturlösung in Frage zu kommen. Eine Einbeziehung von CO₂-Senken in NRW oder die Konzentration auf einen der beiden anvisierten Seehäfen würde ein deutlich anderes Bild ergeben. Der Einstieg und weitere Ausbau hin zum Zielbild der CO₂-Infrastruktur wird ebenfalls nicht beschrieben, sondern es wird lediglich das Endsystem gezeigt.

Um zu dem Zielsystem zu gelangen findet zunächst eine Auswahl statt, welche der 50 Standorte der Grundstoffindustrie in NRW aus dem Zielbild SYS in das Pipelinesystem integriert werden (s. Abschnitt 7.1). Im Anschluss wird ein Infrastrukturentwurf im Abschnitt 7.2 vorgestellt und erläutert sowie auf die Kosten eingegangen.

7.1 Vorgehensweise zur Auswahl der Punktquellen

Ziel der Anfertigung des CO₂-Pipelineinfrastrukturentwurfs ist es einen möglichst großen Anteil des im Zielbild SYS anfallenden Kohlenstoffdioxids bei gleichzeitig möglichst geringem Aufwand – u.a. Gesamtlänge der Rohrleitungen - in das Pipelinesystem zu integrieren. Da bisher noch keine methodische Grundlage existiert nach welchen Kriterien, CO₂-Mengen und Eigenschaften industrielle Standorte in einer CO₂-Pipelinesystem eingebunden werden sollten ist das Auswahlverfahren iterativ. Im ersten Schritt erfolgt die Sichtung der Industriestandorte mit den zugehörigen CO₂-Mengen (siehe Abbildung 3). Anschließend ist anhand der geographischen Verortung der Punktquellen eine Unterteilung in zwei Cluster vorgenommen worden (Rhein- und Westfalen-Cluster).

Die Clusterung ist hierbei aus mehreren Gründen erfolgt. Zum einen verringert sich die Gesamtlänge des Pipelinesystems in NRW signifikant, da keine Zwischenverbindung zwischen den beiden Clustern benötigt wird. Diese Zwischenverbindung würde unter anderem durch das dicht besiedelte Ruhrgebiet führen oder müsste nördlich vorbeigeführt werden, was einen weiteren Mehraufwand bedeuten würde. Zum anderen befinden sich einige Punktquellen der Cluster deutlich näher an dem jeweiligen CO₂-Hubs Wilhelmshaven und Rotterdam – beispielsweise befinden sich zwei größere Punktquellen unmittelbar an der nordrheinwestfälischen und niedersächsischen Landesgrenze in der Nähe von Osnabrück. Mit einem gemeinsamen Infrastruktursystem hätte zwar NRW ein gemeinsames großes CO₂-Cluster, würde jedoch große Mengen an CO₂ deutlich weiter transportieren als unbedingt nötig, was energie- und kostenintensiver ist. Ohne Terrainfaktoren¹⁰ existieren folgende Entfernungen: NRW-Grenze - Rotterdam ca. 140 km, NRW-Grenze - Wilhelmshaven ca. 130 km und Verbindung zwischen dem Westfalen- und Rhein-Cluster 105 - 113 km. Bei einer Nicht-Clusterung würde, in Bezug auf das Beispiel der beiden Punktquellen im Raum Osnabrück, das CO₂ statt der 130 km Richtung

¹⁰ Terrainfaktoren sind ein prozentualer Aufschlag auf die gemessene Distanz, da oftmals nicht der direkte Weg genutzt werden kann.

Wilhelmshaven über 300 km nach Rotterdam transportiert werden - zu den etwa 250 km kommt noch die Distanz innerhalb des Westfalen-Clusters hinzu.

Mit der Diversifizierung der Hochseehäfen als CO₂-Hubs kann sich zudem die Entfernung zwischen der verschieden verorteten Offshorespeicherstätten in der Nordsee, z.B. Niederlande, Großbritannien und Norwegen, und den CO₂-Hubs, an die das CO₂ aus NRW verbracht wird, verringern. Zu guter Letzt sollte bedacht werden, dass der Impuls einer von NRW ausgehenden CO₂-Pipelineinfrastruktur für andere Punktquellen aus eventuellen Transitregionen, mit geringer Dichte an CO₂-Punktquellen, eine echte Chance darstellt, um sich einer CO₂-Infrastruktur anzuschließen – aus eigenem Antrieb heraus erscheint der Aufbau einer solchen Infrastruktur in solchen Regionen eher unwahrscheinlich. So könnten beispielsweise Punktquellen aus Ostfriesland, dem Oldenburger Münsterland oder Bremen bei geographisch günstiger Lage in die CO₂-Pipeline zwischen NRW und Wilhelmshaven eingebunden werden. Ein genauere Vergleich der Vor- und Nachteile dieser Clusterung gegenüber anderen Infrastrukturen lohnt sich, geht aber über die Betrachtung in dieser Arbeit hinaus.

Im nächsten Schritt erfolgt eine genauere Betrachtung der einzelnen Punktquellen, um festzustellen, ob eine Einbindung in eine zukünftige CO₂-Pipelineinfrastruktur sinnvoll ist. Kriterien, die zu einer Nichtberücksichtigung in der CO₂-Pipelineinfrastruktur geführt haben sind folgende:

- ungünstige geographische Lage (Entfernung und unwegsames Gelände) der Punktquelle in Bezug zu den übrigen Quellen,
- zu geringe CO₂-Menge der Punktquelle und
- alternative Transportmöglichkeit (Zug).

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass keines dieser Kriterien bei Erfüllung per se zu einem Ausschluss einer Punktquelle führt. Für eine Nichtberücksichtigung für den Infrastrukturentwurf müssen mindestens zwei Kriterien gegeben sein. Hierbei sind verschiedene Kombinationen möglich.

In Bezug auf das zweite Kriterium ist die Untergrenze von 60 kt CO₂/a pro Punktquelle gewählt worden. Dies ist laut Literaturrecherche die kleinste aktuelle Pipeline für Kohlenstoffdioxid (Peletiri et al. 2018). Der Wert von 60 kt CO₂/a stellt hierbei keine „harte“ Grenze dar, sondern ist eher als Richtwert zu verstehen. Ist z. B. ein Industriestandort mit einer jährlichen CO₂-Menge von 59 kt/a geographisch günstig zwischen zwei großen Punktquellen verortet, so wird er natürlich in das Pipelinesystem integriert.

Das erste Kriterium betrifft vereinzelte isolierte Quellen, in Bezug auf die übrigen Quellen – z. B. die beiden kleineren Stahlwerke im Siegerland. Die beiden Stahlwerke wurden des Weiteren nicht in das Pipelinesystem eingebunden, da sie über eine gute Anbindung via Schiene verfügen (Kriterium drei).

Insgesamt konnten nach dieser Methode 30 der 50 Industriestandorte in dem CO₂-Infrastrukturentwurf berücksichtigt werden. Die übrigen 20 Standorte, in der Regel kleinere Punktquellen aus den Sektoren Kalk-, Stahl- und Glasindustrie, verfügen meistens über einen bestehenden Bahnanschluss oder befinden sich unmittelbar in der Nähe des Schienennetzes, sodass ein Transport über die Schiene aufgrund der geringen CO₂-Mengen theoretisch möglich ist. Dieser Ansatz ist im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt worden, dient jedoch zur Verifizierung, dass der vorliegende Infrastrukturentwurf so wenige Punktquellen wie möglich unbedacht lässt und gleichzeitig Möglichkeiten aufzeigt.

7.2 CO₂-Pipelineinfrastrukturentwurf für NRW

Wie bereits erwähnt konnten 30 der 50 Industriestandorte, mit kumuliert 16,4 Mt CO₂/a der ursprünglich 16,9 Mt CO₂/a, in die Pipelineinfrastrukturen des Rhein- und Westfalen-Clusters eingebunden werden (siehe Abbildung 4). Das entspricht 97 % der CO₂-Gesamtmenge aus dem *Zielbild SYS*. Das Rhein-Cluster stellt hierbei mit 16 berücksichtigten Punktquellen und 10,6 Mt CO₂/a das größere Cluster dar.

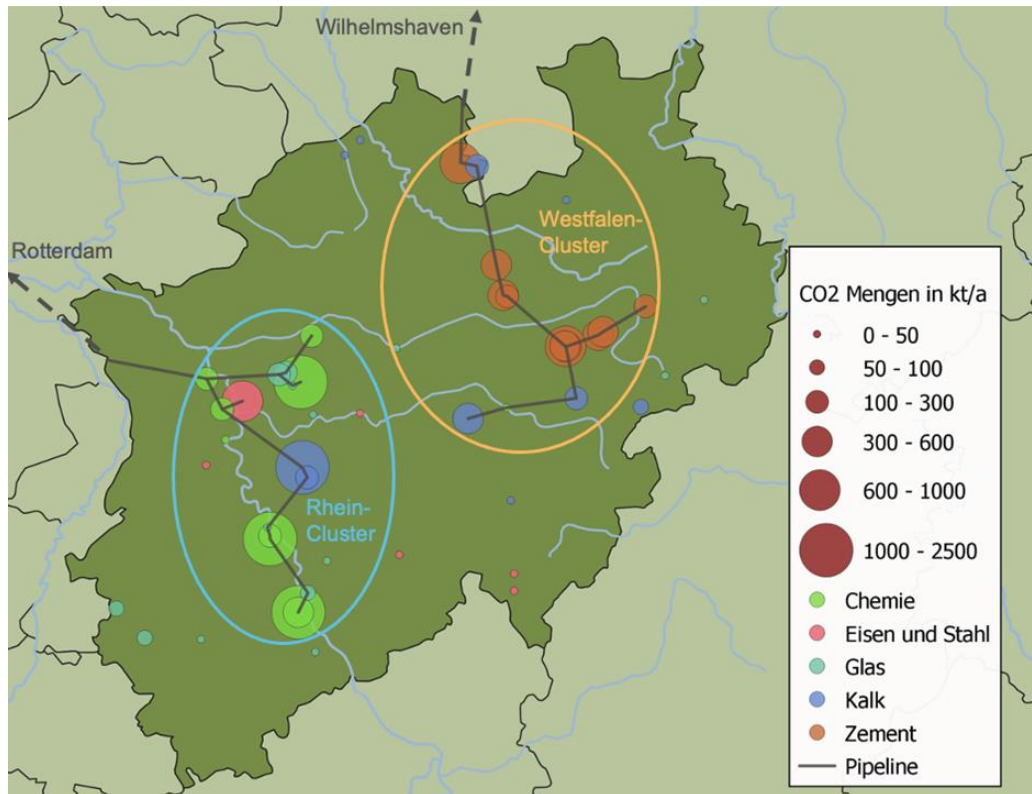


Abbildung 4: CO₂-Pipelineinfrastrukturentwurf für das Rhein- und Westfalen-Cluster im Jahr 2045 im Zielbild SYS

Quelle: Eigene Darstellung

Der CO₂-Transport via Pipeline erfolgt für das Rhein-Cluster ausgehend von den Chemieparcs Wesseling und Dormagen die Rheinschiene entlang Richtung Norden. Bei Rheinberg verbindet sich die Rheinpipeline mit einer kürzeren aus Osten kommenden Pipeline, welche das CO₂ aus dem Ruhrgebiet führt, um von dort gemeinsam nach Rotterdam zu gelangen. Für das Westfalen-Cluster werden die größeren Kalk- und Zementwerke aus zentral Westfalen berücksichtigt. Von Süden wird das abgeschiedene CO₂ Richtung Norden, zunächst in den Osnabrücker Raum und dann weiter nach Wilhelmshaven, geleitet. Der Weitertransport erfolgt von den Häfen Rotterdam (Rhein-Cluster) und Wilhelmshaven (Westfalen-Cluster) z. B. zu den geologischen Speicherstätten in der Nordsee.

Die 20 kleineren Punktquellen, welche in diesem Entwurf keine Berücksichtigung gefunden haben, sind oftmals dezentral an den Grenzen von NRW verortet (Nordwest-, Südwest und Ostwestfalen sowie der Aachener Raum). Prinzipiell wäre es möglich auch jene 20 Standorte in das Pipelinesystem einzubinden. Ob das in einer Kosten-Nutzenabwägung der einzelnen Standorte sinnvoll wäre geht über die Betrachtungstiefe dieser Arbeit hinaus.

Alternative Infrastrukturoptionen

Der im Rahmen dieser Arbeit gezeigte CO₂-Pipelineinfrastrukturentwurf stellt lediglich eine mögliche Konfiguration dar. Nachfolgend werden drei weitere verschiedene Infrastrukturentwürfe bzw. -modifikationen kurz vorgestellt, welche ebenfalls denkbar für NRW sind. Für diese drei Optionen sind keine Berechnungen erfolgt. Sie zeigen jedoch die Bandbreite der möglichen Entwicklungen.

1. Alternative Infrastrukturoption: Fokussierung auf einen CO₂-Hub

Die CO₂-Infrastruktur in NRW könnte sich lediglich auf einen CO₂-Hub bzw. Zielhafen (Rotterdam oder Wilhelmshaven) konzentrieren. Der in Abbildung 4 gezeigte Infrastrukturentwurf würde hierfür um einen ca. 100 km langen Pipelineabschnitt - inkl. eines angenommenen Terrainfaktors von 1,5 (siehe Kapitel 7.3), zwischen den Zementwerken in Beckum und dem Chemiepark Marl, erweitert werden. Durch die Fokussierung auf einen Zielhafen müssen diejenigen Pipelineabschnitte mit sich ändernden Kapazitätswerten angepasst werden. Es müsste z. B. eine Anpassung der Verbindungspipeline zwischen dem Zielhafen und dem letzten angeschlossenen Industriestandort vorgenommen werden, da in diesem Fall die gesamte CO₂-Menge über eine Verbindung abgeführt würde.

2. Alternative Infrastrukturoption: Verbindung des Rhein- und Westfalenclusters

Bei Beibehaltung der Clusterung ist eine Verbindung des Rhein- und Westfalen-Clusters ausgehend von dem Chemiepark Marl zu den Zementwerken in Beckum für eine erhöhte Flexibilität ebenfalls eine aussichtsreiche Option. Der Vorteil der erhöhten Flexibilität beruht auf der Möglichkeit das abgeschiedene CO₂, oder auch nur Teilmengen davon, wahlweise in Richtung Rotterdam oder Wilhelmshaven zu transportieren. Jedoch müsste die Dimensionierung der Verbindungspipeline und die nachgelagerten Anschlüsse angepasst werden. Die Verbindungspipeline muss das Maximum von ca. 10,6 Mt CO₂/a des Rhein-Clusters abdecken, um in beide Richtungen einen Austausch zu gewährleisten.

3. Alternative Infrastrukturoption: Anbindung des Rhein-Main-Gebietes

In dem in Abbildung 4 gezeigten Infrastrukturentwurf ist die Betrachtung NRW als mögliches Transitland für CO₂ nicht mit eingeflossen. Eine Anbindung zusätzlicher CO₂-Mengen aus dem Rhein-Main-Gebiet (und darüber hinaus), welche den Anschluss des Rhein-Clusters im Chemiewerk in Wesseling nutzen könnte, ist aber tendenziell sinnvoll und sollte in den weiteren Arbeiten berücksichtigt werden.

7.3 Kosten CO₂-Pipelineinfrastruktur

In diesem Abschnitt wird eine Investitionskostenabschätzung für das, im vorangegangenen Abschnitt dargestellte, CO₂-Pipelinesystem in NRW vorgenommen. Betriebskosten und die Pipelines außerhalb von NRW werden nicht berücksichtigt. Eine Abschätzung der Kosten ist herausfordernd, denn es existieren eine Vielzahl an Parametern und Einflussgrößen, welche sich auf die Auslegung und somit auf die Investitionskosten von CO₂-Pipelines auswirken. Zudem werden die Investitionsentscheidungen in der Zukunft unter den dann herrschenden zukünftigen Bedingungen entschieden. Im Nachfolgenden wird kurz auf die wichtigsten Faktoren und ihrer Annahmen eingegangen. Bei den meisten Faktoren handelt sich um bewährte Mittelwerte aus der Literatur. Die übrigen Annahmen sind nach intensiver Diskussion mit ExpertInnen des Wuppertal Instituts veranschlagt worden.

Essentiellen Einfluss auf die Höhe der Investitionskosten haben die benötigte Länge des Pipelinesystems, sowie die Wanddicke und der Durchmesser der Rohre. Die Gesamtlänge der in Abbildung 4 gezeigten CO₂-Pipelineinfrastruktur in NRW beträgt 507 km. Inkludiert sind hierbei die Terrainfaktoren

der Distanzen. Ausgehend von der Luftlinie zwischen den einzelnen Punktquellen werden folgende Terrainfaktoren verwendet (Kjärstad et al. 2016; Fishedick et al. 2007):

- 1,2 für flaches Terrain,
- 1,5 für hügeliges Terrain und
- 2 für dicht besiedelte Gebiete und Naturschutzgebiete.

Der Transport des CO₂s erfolgt im flüssigen Zustand, wobei Betriebsdrücke von 70 bis 110 bar und eine mittlere Außentemperatur von 20 °C zugrunde gelegt werden (Kjärstad et al. 2016). Das abgeschiedene CO₂ wird vor der Zuführung in die Pipeline verdichtet. Die mittlere Flussgeschwindigkeit des transportierenden CO₂ beträgt hierbei 2 m/s (Peletiri et al. 2018).

Ein weiterer wichtiger Faktor hinsichtlich der Auslegung der Pipelineinfrastruktur ist die Menge des zu transportierenden CO₂ über die Zeit. Die jährlichen Betriebsstunden der Pipelines werden auf 8000 Stunden und die mittlere CO₂-Abscheiderate an den Standorten wird im Jahr 2045 auf 95 % veranschlagt (Kjärstad et al. 2016). Die Abscheiderate in der Zukunft wird aufgrund erwarteter Effizienzsteigerungen durch weitere Forschungs- und Entwicklung demnach optimistisch abgeschätzt. Als weitere nicht vernachlässigbare Investitionskostenstelle wird die benötigte Verdichterleistung identifiziert und entsprechend berücksichtigt. Es wird von strombetriebenen ICL-Verdichtern, welche aktuell die beste verfügbare Technik darstellen, ausgegangen. Diese Verdichter besitzen den Vorteil, dass sie zukünftig mit 100 % erneuerbarem Strom betrieben werden können.

Unter der Berücksichtigung der skizzierten Annahmen und einer Abweichung von +-35 % ergeben sich für den dargestellten CO₂-Pipelineinfrastrukturentwurf (vgl. bei Bedarf Abschnitt 7.2) die Investitionssumme von 565 bis 1.174 Mio. € (basierend auf Kjärstad et al. 2016; Petak et al. 2018). Die Kosten für eine CO₂-Infrastruktur erscheinen vordergründig erstmal hoch. Allerdings sollte bedacht werden, dass diese sich auf mehrere Jahre verteilen. Zum anderen befindet sich die Größenordnung dieser Summe im Rahmen der Kosten anderer Infrastrukturkapitalaufwendungen. So hat das Bundesland NRW im Jahr 2018 ca. 1.313 Mio. € für Autobahnen und Bundesstraßen zur Verfügung gestellt (Land.NRW 2018). Die Amprion GmbH hat im Jahr 2020 über 1 Mrd. € für den Um- und Ausbau ihres Stromnetzes investiert (Amprion 2020).

8 Qualitative Einordnung der Zielbilder *Tech_Min* und *BECCS*

In diesem Kapitel erfolgt eine qualitative Einordnung der Zielbilder *Tech_Min* und *BECCS*. Dies bedeutet, dass auf die Robustheit des in Kapitel 7 gezeigten Infrastrukturentwurfs hinsichtlich der im Jahr 2045 anfallenden CO₂-Mengen der Zielbilder *Tech_Min* und *BECCS* näher eingegangen wird. Abbildung 5 zeigt die Zielbilder und die Punktquellen mit ihren im Jahr 2045 anfallenden CO₂-Mengen sowie der vorgenommenen Clusterung des Zielbilds *SYS*.

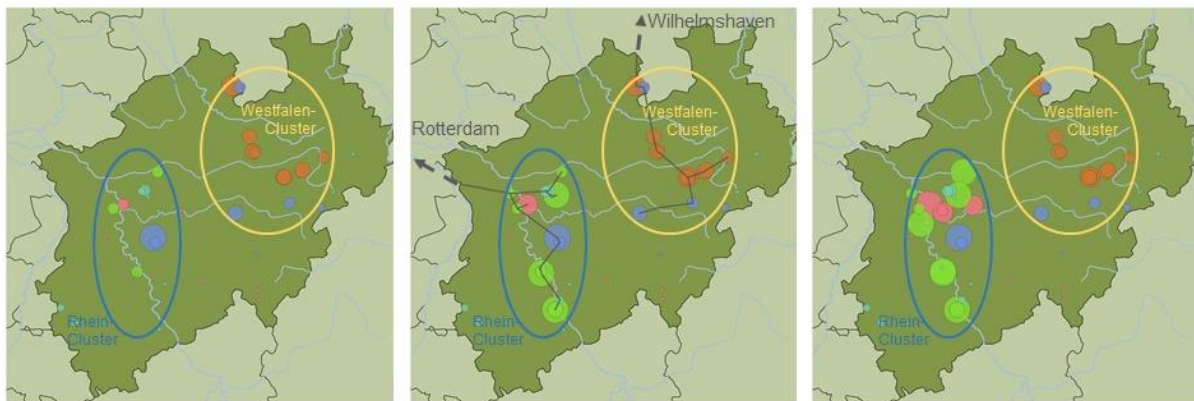


Abbildung 5: Geographische Verteilung inkl. der im Jahr 2045 anfallenden CO₂-Mengen der Zielbilder *Tech_Min* (links), *SYS* (Mitte) und *BECCS* (rechts)

Quelle: Eigene Darstellung

Robustheit des CO₂-Infrastrukturentwurfs bei Eintreten des Zielbilds *Tech_Min*

Im *Tech_Min* Zielbild entsteht im Jahr 2045 mit 7 Mt CO₂ gegenüber dem *SYS* Zielbild mit ca. 16,9 Mt deutlich weniger CO₂. Bezugnehmend auf die in Kapitel 7 vorgenommene Clusterung ist die geringere CO₂-Menge hauptsächlich auf das Rhein-Cluster zurückzuführen. In diesem Cluster ist die CO₂-Menge von ca. 8,3 Mt vor allem mit dem Wegfall von 4 Steamcrackern an Chemiestandorten zu begründen. Neben der Chemiebranche sind in den Bereichen Eisen und Stahl sowie Kalk ebenfalls geringere CO₂-Menge zu verzeichnen. Im Westfalen-Cluster ist die CO₂-Menge um ca. 1,5 Mt geringer, was neben der Kalkindustrie hauptsächlich auf die Zementindustrie zurückzuführen ist.

Bei Eintreten des Zielbilds *Tech_Min* ist gegenüber dem Zielbild *SYS* demnach eine deutliche Reduktion der CO₂-Mengen vor allen an den Chemiestandorten zu sehen. Aufgrund der geringeren CO₂-Mengen müsste der Bedarf und die Auslegung einer CO₂-Pipelineinfrastruktur insbesondere für das Rhein-Cluster in diesem Zielbild erneut geprüft werden, wohingegen der Infrastrukturentwurf für das Westfalen-Cluster robust erscheint.

Robustheit des CO₂-Infrastrukturentwurfs bei Eintreten des Zielbilds *BECCS*

Im Zielbild *BECCS* entsteht im Jahr 2045 mit ca. 35,5 Mt fast die doppelte CO₂-Menge im Vergleich zu dem Zielbild *SYS*. In diesem Zielbild ist im Rhein-Cluster eine erhöhte CO₂-Menge von ca. 18,5 Mt zu verzeichnen, wohingegen die CO₂-Menge im Westfalen in beiden Zielbildern nahezu gleich ist. Die größere CO₂-Menge ist zum einen mit den größeren CO₂-Mengen an den Chemiestandorten (z. B. Dormagen und Wesseling) sowie dem Stahlstandort Duisburg zu begründen. Zum anderen beinhaltet das Zielbild *BECCS* drei zusätzliche Standorte der Stahlindustrie, welche im Zielbild *Tech_Min* nicht vertreten sind. Neben den drei bereits erwähnten zusätzlichen Standorten wird ein zuvor nicht berücksichtigter Chemiestandort in Krefeld, aufgrund einer größeren der CO₂-Menge von ca. 1,3 Mt/a in die CO₂-Infrastruktur eingebunden. Im Hinblick auf den Entwurf der Pipelineinfrastruktur für das Zielbild *SYS* in

Qualitative Einordnung der Zielbilder Tech_Min und BECCS

Nordrhein-Westfalen wären hierbei nur geringfügige Anpassungen notwendig. Konkret würde das Zielbild *BECCS* bedeuten, dass eine Anpassung der Transportkapazitäten in Teilen des gezeigten Entwurfs der Pipelineinfrastruktur für Nordrhein-Westfalen notwendig wäre, die räumliche Struktur und Länge des Pipelinesystems aber nur geringfügig angepasst werden müsste.

9 Fazit

Die vorgestellten Zielbilder einer CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW zeigen, dass der Aufbau einer CO₂-Pipelineinfrastruktur aus heutiger Sicht notwendig sein wird. Zentrale Erkenntnisse der Arbeit sind:

- Die zukünftig (2045) an industriellen Quellen in NRW entstehenden “unvermeidbaren” CO₂-Mengen schätzen die Autoren in der Größenordnung von 7 Mt CO₂/a bis 16,9 Mt CO₂ ab. Aus systemischer Sicht (negative Emissionen) könnte auch die Entstehung, Abscheidung und dauerhafte Bindung einer größeren CO₂-Menge von bis zu 36 Mt CO₂/a sinnvoll sein.
- Die CO₂-Entstehung in der Zement- und Kalkindustrie hat in allen betrachteten Zielbildern einen wesentlichen Anteil, und bildet bei der abgeschätzten technisch minimal möglichen CO₂-Entstehung (Zielbild *Tech_Min*) den mit Abstand größten Block.
- Die zukünftige CO₂-Entstehung an den Steamcrackern hat in zwei der drei betrachteten Zielbilder einen signifikanten Anteil an der gesamten CO₂-Menge. Die Mengen treten zudem sehr konzentriert an nur wenigen Standorten auf. Die zukünftige Entwicklung der CO₂-Entstehung an Steamcrackern ist gleichzeitig mit vielen Unsicherheiten behaftet – genannt seien eine mögliche Elektrifizierung, aber auch veränderte Feedstocks sowie ggf. Konkurrenz durch andere Verfahren der Herstellung von Olefinen und Aromaten. Die Zukunft der Steamcracker ist bei der Planung einer zukünftigen CO₂-Infrastruktur daher in besonderer Weise mit zu betrachten.
- Eine explizite *BECCS-Strategie* zur Erzeugung negativer Emissionen an Standorten der Stahl- und Chemieindustrie hätte auf die Länge und Struktur eines CO₂-Pipelinesystems kaum Auswirkungen, müsste jedoch aufgrund der möglichen großen CO₂-Mengen bei der Kapazitätsauslegung von Pipelines dennoch von vornherein mitgedacht werden.
- Die verbleibenden CO₂-Punktquellen unterscheiden sich bzgl. der entstehenden CO₂-Menge stark, insbesondere gibt es eine größere Zahl von Standorten der Kalk-, Stahl- und Glasindustrie mit (im Vergleich) geringer CO₂-Entstehung.
- Durch Einbindung von über der Hälfte der Punktquellen (30 von 50) in eine CO₂-Pipelineinfrastruktur im Zielbild *SYS* lässt sich bereits der allergrößte Teil (97 %) des entstehenden CO₂ abscheiden und zu Senken transportieren.
- Für die entstehenden CO₂-Mengen und unter Berücksichtigung der geographischen Lage und Infrastrukturanbindung der Standorte ist für einen großen Teil der Standorte der CO₂-Transport per Pipeline die sinnvollste Lösung. Ein Abtransport solcher CO₂-Mengen über andere Transportoptionen (LKW, Zug und Schiff) wäre hingegen an diesen Standorten kaum realisierbar bzw. praktikabel sowie wirtschaftlich nur äußerst schwer darstellbar.
- In Westfalen (“Westfalen-Cluster”) empfiehlt sich der Einschätzung der Autoren nach in allen betrachteten Zielbildern der Aufbau eines CO₂-Pipelinesystems.
- An Rhein und Ruhr (“Rhein-Cluster”) ist die zukünftige CO₂-Entstehung an den Steamcrackern der Chemieindustrie sowie mögliche CO₂-Entstehung im Rahmen einer *BECCS-Strategie* ausschlaggebend für eine zukünftige CO₂-Infrastruktur (s. o.). Die an konventionell betriebenen Steamcrackern sowie die bei einer expliziten *BECCS-Strategie* anfallenden CO₂-Mengen können unserer Einschätzung nach nur mittels eines Pipeline-Systems mit vertretbarem Aufwand abtransportiert werden. Unter Annahme einer Elektrifizierung der Steamcracker und bei Verzicht auf (zusätzliches) *BECCS* (Zielbild *Tech_Min*) wäre ein Transport (nur) mit Schiffen auf dem Rhein zu prüfen.

Um das Thema weiter zu vertiefen sind weitere Forschungsarbeiten notwendig. Die Darstellung des Aufbaus einer Infrastruktur mit möglichen Zwischenlösungen im Zeitverlauf wäre ein wichtiger Beitrag zur Identifizierung konkreter Maßnahmen und Projekte in den nächsten Jahren. Eine Einbeziehung möglicher CO₂-Senken in NRW, zum Beispiel für CCU, würde Hinweise geben, ob es Alternativen zum Abtransport und zu der gezeigten Infrastruktur geben kann. Schlussendlich muss für eine konkrete Planung von Infrastrukturen noch ein ganz anderer Detaillierungsgrad für eine Pipelininfrastrukturplanung erarbeitet werden die über den Ansatz dieser Arbeit weit hinausgehen. Die Autoren hoffen aber durch die vorgelegte Arbeit dieser Diskussion einen Impuls geben zu können.

Literaturverzeichnis

- Amprion (2020): NETZAUSBAU-BILANZ 2020: GROSSE FORTSCHRITTE TROTZ CORONA. Online verfügbar unter: <https://www.amprion.net/Netzjournal/Beitr%C3%A4ge-2020/Netzausbau-Bilanz-2020.html>.
- Durusut, Emrah; Joos, Michael (2018): Shipping CO₂ - UK CO₂ Estimation Study. Final Report for BEIS (Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Hrsg.). Cambridge: Element Energy Limited.
- Eigestad, G. T.; Dahle, H. K.; Hellevang, B.; Riis, F.; Johansen, W. T.; Øian, E. (2009): GEOLOGICAL MODELING AND SIMULATION OF CO₂ INJECTION IN THE JOHANSEN FORMATION.
- Fischedick, Manfred; Esken, Andrea; Pastowski, Andreas; Schüwer, Dietmar; Supersberger, Nikolaus; Nitsch, Joachim et al. (2007): RECCS. Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS). Stand: Dezember 2007. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin. Online verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-28023>.
- IEAGHG (2013): CO₂ Pipeline Infrastructure, 2013/2018. Online verfügbar unter: https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-18.pdf.
- IN4climate.NRW (2020): Unvermeidbare CO₂-Entstehung in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie NRW: Definition und Kriterien. Ein Diskussionsbeitrag der AG Kohlendioxidwirtschaft von IN4climate.NRW. Gelsenkirchen.
- Kjärstad, Jan; Skagestad, Ragnhild; Eldrup, Nils Henrik; Johnsson, Filip (2016): Ship transport—A low cost and low risk CO₂ transport option in the Nordic countries. In: International Journal of Greenhouse Gas Control 54 (September (5)), S. 168–184.
- Land.NRW (2018): 53 Millionen Euro mehr für Autobahnen und Bundesstraßen. Online verfügbar unter: <https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/53-millionen-euro-mehr-fuer-autobahnen-und-bundesstrassen-sanierung-und-erhalt-der>.
- Landtag.NRW (2020): Entwurf eines Gesetzes zur Neufassung des Klimaschutzgesetzes von Nordrhein-Westfalen, Vorlage 17/4418 des Landtags von Nordrhein-Westfalen vom 21.12.2020. Online verfügbar unter: <https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMV17-4418.pdf>.
- Le Van, Gilles; Balzer, Frank (2019): „CO₂ als Rohstoff gewinnen, transportieren, nutzen“. In: Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. „CO₂-Infrastruktur in NRW“ – Workshop am 22. August 2019 in Düsseldorf. Online verfügbar unter: www.vdz-online.de.
- Lu, Hongfang; Ma, Xin; Huang, Kun; Fu, Lingdi; Azimi, Mohammadamin (2020): Carbon dioxide transport via pipelines. A systematic review. In: Journal of Cleaner Production 266 (5), S. 121994.
- Northern Lights (2021): Northern Lights. Online verfügbar unter: <https://northernlightscs.com/>.
- Peletiri, Suoton; Rahmanian, Nejat; Mujtaba, Iqbal (2018): CO₂ Pipeline Design. A Review. In: Energies 11 (9), S. 2184.
- Petak, Kevin; Manik, Julio; Griffith, Andrew (2018): North America Midstream Infrastructure through 2035. ICF.

Porthos (2021): Porthos CO₂ TRANSPORT & Storage. Online verfügbar unter: <https://www.porthosco2.nl/en/>.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.

Ruppert, Johannes; Furth, Guido; Hoppe, Helmuth (2020): CO₂-Transport aus der Perspektive von Zementwerken auf Basis einer Ausarbeitung der VDZ gGmbH. PowerPoint Folien – AG Kohlendioxidwirtschaft am 05. Februar 2020 in Gelsenkirchen.