

Highlights des ersten Forschungsintervalls von SCI4climate.NRW

Forschungsergebnisse des 1. Forschungsintervalls von
SCI4climate.NRW

Ein Ergebnis der Themenfelder 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: 14.08.2020
Leitung: Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer, Wuppertal Institut
Koordination: Themenfeld 0 Christoph Zeiss, Wuppertal Institut
BearbeiterInnen: Themenfeld 1 Ulrich Seifert, Fraunhofer UMSICHT
Themenfeld 2 Dr. Balint Simon, RWTH Aachen
Themenfeld 3 Dr. Sascha Samadi, Wuppertal Institut
Themenfeld 4 Dr. Thilo Schaefer, IW Köln
Kontakt: christoph.zeiss@wupperinst.org
Bitte zitieren als: SCI4climate.NRW 2020 (Hrsg.): Highlights des ersten Forschungsintervalls von SCI4climate.NRW, Wuppertal

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
1 Das Forschungsprojekt SCI4climate.NRW	6
1.1 Ziele von SCI4climate.NRW	6
1.2 Organisatorische Struktur von SCI4climate.NRW	6
1.3 Integration in die Initiative IN4climate.NRW	7
2 Ergebnisse Technologien und Infrastrukturen	9
2.1 Forschungsfragen des 1. Forschungsintervalls	9
2.2 Ergebnisse Standorttool Industrie	10
2.3 Ergebnisse Technologiesteckbriefe	12
2.4 Ergebnisse Projektideen/ Forschungslücken	15
3 Ergebnisse Produkte und Wertschöpfungsketten	18
3.1 Forschungsfragen des 1. Forschungsintervalls	18
3.2 Quantitative Analyse des Kunststoffkreislaufs und potenzieller Kreislaufschlüsse in NRW	19
3.2.1 Ergebnisse der Analyse aktueller kunststoffbasierter Abfallströme in NRW	20
3.2.2 Ergebnisse der Analyse eines spezifischen Kunststoffstroms in NRW	22
3.2.3 Ergebnisse der Analyse industrieller Zusammenhänge	24
3.3 Analyse der Auswirkungen potenzieller Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette	25
3.3.1 Optimierung des Produktdesigns	26
3.3.2 Nachfrageentwicklung	29
3.3.3 Optimierung der Verwertungswege (änderungsorientierte Ökobilanz)	30
3.3.4 Einsatz von CCU-Technologien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalens Chemie- und Kunststoffindustrie	33
3.4 Ergebnissynthese und Ausblick	35
4 Ergebnisse Szenarien und Transformationspfade	37
4.1 Forschungsfragen des 1. Forschungsintervalls	37
4.2 Ergebnisse der Literaturanalyse zur Industrie-Transformation	37
4.3 Ergebnisse zur Definition und Entwicklung eines Sets von Kontextszenarien	41
4.4 Ergebnisse zur Entwicklung von Szenarien der NRW-Industrie	44
5 Ergebnisse Rahmenbedingungen	47
5.1 Forschungsfragen des 1. Forschungsintervalls	47
5.2 Ergebnisse Vergleich von Politikinstrumenten	47

5.3	Ergebnisse Expertenbefragung zu Geschäftsmodellen.....	51
5.4	Strukturwandelanalyse	59
5.5	Forschungsfragen für das 2. Forschungsintervall	62
6	Anhang	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tätigkeitsschwerpunkte der Projektpartner von SCI4climate.NRW in den Themenfeldern	7
Abbildung 2: Verbraucher, Energiewandler, Speicher und Transportprozesse in industriellen Energiesystemen	10
Abbildung 3: Schemazeichnung der zur Optimierung verwendeten Prozessklassen	11
Abbildung 4: Screenshot Technologiesteckbrief	13
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der quantitativen Analyse des Kunststoffkreislaufs in NRW	19
Abbildung 6: Darstellung der Stoffströme bei Kunststoffabfällen in NRW (2017).....	21
Abbildung 7: Sankey Diagramm der Kunststoffflusströme in NRW (Basisjahr 2017)	22
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Bestimmung signifikanter Produkte bzw. industrieller Sektoren zur Ergänzung der Ökobilanz durch Structural Path Analysis einer Aufkommens/Verwendung Tabelle	24
Abbildung 9: Eindrücke des digitalen Design-Workshops zu Lebensmittellogistik und Verpackungssystemen.....	27
Abbildung 10: Anforderungen an Produkt-/Dienstleistungsmodelle für zirkuläre Geschäftsmodelle..	28
Abbildung 11: Auswertung der Ausgaben von Haushalten in Deutschland nach 13 Ausgabekategorien	30
Abbildung 12: THG Vereinfachte Abbildung des Potenzials des Recyclings von Sortierung bis Produktion sekundärer Kunststoffe bzw. bis zur Pyrolyse in den modellierten Szenarien	32
Abbildung 13: Treibhausgasemission der Chemieindustrie über den gesamten Lebenszyklus [a) links/ b) rechts]	34
Abbildung 14: Überblick zur Strukturierung des Vorhabens im 2. Forschungsintervall	36
Abbildung 15: Unterscheidung von zehn zentralen Strategien für das Erreichen eines (nahezu) klimaneutralen Industriesektors	39
Abbildung 16: Unterscheidung der fünf „Shared Socioeconomic Pathways“-Zukünfte und Verortung der drei im Rahmen von SCI4climate.NRW entwickelten Kontextszenarien	42
Abbildung 17: Matrix Tool zum Arbeitspaket 4.1	48
Abbildung 18: Die vier Perspektiven zur Bewertung von Politikinstrumenten.....	49
Abbildung 19: Bestehende Hemmnisse, die die Umsetzung eines auf CO ₂ -freien Wasserstoff oder erneuerbaren Strom basierendes Geschäftsmodell in vielen Fällen bisher nicht rentabel machen....	54
Abbildung 20: Zusammenfassung der identifizierten Einflussfaktoren regionaler Transformationsprozesse	60
Abbildung 21: Auswahl offener Forschungsfragen für A 4.5 im 2. Forschungsintervall	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: SPA der Anteile der Kunststoffwaren (als Gütergruppe) in Verwendungen anhand Verwendungstabelle und I/O Tabelle (Quelle: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen Fachserie 18, Reihe 2).....	25
Tabelle 2: Auswahl der identifizierten relevanten nationalen und internationalen Studien zur Möglichkeit sehr weitgehender THG-Emissionsreduktionen im Industriesektor	37
Tabelle 3: Übersicht über die bei der Metaanalyse von Industrie-Transformationsszenarien berücksichtigten Studien und Szenarien.....	40
Tabelle 4: Zusammenfassendes Ergebnis der Metaanalyse von Industrie-Transformationsszenarien hinsichtlich der jeweils hauptsächlich verfolgten Minderungsstrategien	40
Tabelle 5: Szenarien der Sortierselektivität bzw. Effizienz.....	63

1 Das Forschungsprojekt SCI4climate.NRW

1.1 Ziele von SCI4climate.NRW

Das Ziel von SCI4climate.NRW ist die wissenschaftliche Betrachtung der Systemherausforderungen, die sich für das Land Nordrhein-Westfalen und die in NRW produzierenden Unternehmen der energieintensiven Grundstoffindustrie bei einer Transformation hin zu einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Industrie im Jahr 2050 stellen. Die wissenschaftlichen Arbeiten und die erstellten Studien sollen im Dialog mit der Industrie das Wissen um mögliche Pfade und deren Auswirkungen hin zu einer klimaneutralen Industrie erweitern und den Unternehmen und dem Land Informationen zu Handlungsmöglichkeiten liefern.

SCI4climate.NRW untersucht daher die Entwicklungsperspektiven und Gestaltungsmöglichkeiten einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Grundstoffindustrie in NRW unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit anderen Sektoren in Deutschland und auf internationaler Ebene (dies gilt insbesondere in Bezug auf die Berücksichtigung der Energiesystemtransformation) und der damit verbundenen Voraussetzungen, Herausforderungen, Chancen und Risiken sowie Handlungsoptionen für die verschiedenen Akteursgruppen. Zentral ist dabei neben der rein wissenschaftlichen Perspektive vor allem das Einbeziehen relevanter Forschungsfragen aus Industrie und gesellschaftlichen Gruppen in die Forschungsarbeiten und in den akteursübergreifenden Dialog. Ziele von SCI4climate.NRW sind:

- Das Anstoßen von branchenübergreifender Forschung für technische, infrastrukturelle oder organisatorische Innovationen und damit zusammenhängende Geschäftsideen.
- Die Bereitstellung interdisziplinärer Kompetenzen und die Vernetzung und Verknüpfung verschiedener relevanter Forschungs- und Analysestränge.
- Eine Impulsgebung für die inhaltliche und strategische Ausrichtung und Vernetzung der akademischen Aus- und Fortbildung sowie der Forschung zu den Themen einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Grundstoffindustrie an Universitäten und Hochschulen in NRW.

1.2 Organisatorische Struktur von SCI4climate.NRW

SCI4climate.NRW ist ein Verbund aus insgesamt sechs formal unabhängigen Forschungsvorhaben, die zeitlich parallel laufen und inhaltlich eng aufeinander bezogen sind. Aus dieser förderrechtlichen Konstruktion ergibt sich die in der Abbildung 1 dargestellte Struktur. Horizontal sind die sechs Forschungsvorhaben gekennzeichnet, die jeweils an einen der sechs Forschungspartner vergeben wurden. Die Zusammenarbeit der sechs Vorhaben wird in einem organisatorisch und vier inhaltlich ausgerichteten Themenfeldern organisiert, die vertikal dargestellt sind. Diese sind alle interdisziplinär aufgestellt und zeichnen sich jeweils durch eine spezifische Herangehensweise an die Thematik der Industrietransformation aus. Aus der Kombination der Sichtweisen soll sich im Laufe des Vorhabens ein zunehmend konsistenteres Zukunftsbild einer klimaneutralen und wettbewerbsfähigen Industrie für NRW ergeben.

Das Themenfeld 0 wird vom Wuppertal Institut geleitet. Sein Gegenstand ist zum einen der aktive Dialog mit den Akteuren aus Industrie und Gesellschaft in IN4climate.NRW; hierzu gehört u.a. die Entsendung von zwei Mitarbeitenden in die Geschäftsstelle von IN4climate.NRW. Zum anderen dient dieses Themenfeld der Interaktion und Koordination der Forschungspartner und der Forschungsfelder. In dieses Themenfeld sind zudem die Forschungsbeiträge des BFI und des VDZ integriert.

	Themenfeld 0 Koordination und Steuerung	Themenfeld 1 Technologien und Infrastruktur	Themenfeld 2 Produkte und Wertschöpfungsketten	Themenfeld 3 Szenarien und Transformationspfade	Themenfeld 4 Rahmenbedingungen
Wuppertal Institut	X Feder- führung	X	X	X	X
Fraunhofer UMSICHT	X Mit- arbeit	X			
RWTH Aachen		X	X		
IW Köln				X	X
VDZ	X				
BFI	X				

Abbildung 1: Tätigkeitsschwerpunkte der Projektpartner von SCI4climate.NRW in den Themenfeldern

- Themenfeld 1 wird von Fraunhofer UMSICHT geleitet, wobei insbesondere die RWTH Aachen und das Wuppertal Institut mitarbeiten. Es widmet sich vor allem Technologie- und Innovationsfragestellungen.
- Themenfeld 2 wird von der RWTH Aachen geleitet, das Wuppertal Institut arbeitet mit. Dieses Themenfeld widmet sich der Thematik von der Nachfrageseite und berücksichtigt hierbei insbesondere zirkuläre Wertschöpfungsketten.
- Themenfeld 3 wird vom Wuppertal Institut geleitet, das IW Köln arbeitet mit. Hier werden primär gesamtsystemische Aspekte und die Verbindung zum Energiesystem bearbeitet. Aufgrund seiner Perspektive nimmt das Themenfeld eine inhaltlich verbindende Stellung innerhalb der Forschungsfelder von SCI4climate.NRW ein.
- Themenfeld 4 wird vom IW Köln geleitet, das Wuppertal Institut arbeitet mit. Es beschäftigt sich mit den (politischen) Rahmenbedingungen für eine Transformation der Grundstoffindustrie in NRW

1.3 Integration in die Initiative IN4climate.NRW

SCI4climate.NRW ist ein vom Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen gefördertes unabhängiges Forschungsvorhaben mit einem transdisziplinären Ansatz, welches eine intensive und aktive Interaktion mit Akteuren aus Industrie und Gesellschaft in NRW beinhaltet. **IN4climate.NRW** ist eine neue und bundesweit bisher einzigartige Arbeitsplattform von Industrie, Wissenschaft und Landesregierung von Nordrhein-Westfalen. Ziel der Initiative ist es Strategien zu erarbeiten, wie die Industrie in Nordrhein-Westfalen ihre hohe Wettbewerbsfähigkeit erhalten, zusätzliches Wachstum erzeugen und zur Erreichung der Pariser Klimaschutzziele beitragen kann. SCI4climate.NRW und IN4climate.NRW arbeiten eng vernetzt und iterativ miteinander zusammen. Zentrale Aspekte der Zusammenarbeit sind:

Innovationsteams und Arbeitsgruppen: In den Innovationsteams und Arbeitsgruppen von IN4climate.NRW arbeiten IndustrievertreterInnen, WissenschaftlerInnen aus SCI4climate.NRW, die Geschäftsstelle IN4climate.NRW und VertreterInnen der Landesregierung miteinander an

branchenübergreifenden Dialogen zu Zukunftsvisionen, Innovationen, Finanzierungskonzepte etc. mit der Zielrichtung einer treibhausgasneutralen Produktion und der Herstellung klimafreundlicher Produkte. Die WissenschaftlerInnen aus SCI4climate.NRW unterstützen den Dialogprozess indem sie ihre Forschungserkenntnisse in die Gremien tragen, die Gremien nutzen um zusätzlich Erkenntnisse aus der Industrie zu erlangen und den Diskussionsprozess fachlich zu strukturieren.

2 Ergebnisse Technologien und Infrastrukturen

2.1 Forschungsfragen des 1. Forschungsintervalls

Im Rahmen des 1. Forschungsintervalls lag der wesentliche Schwerpunkt auf der Identifikation von zentralen Schlüsseltechnologie für die Grundstoffindustrie in NRW im Rahmen der Transformation zu einer klimaneutralen Industrie bis zum Jahr 2050. Dies erfolgte im Dialog mit den Partnern in SCI4climate.NRW sowie im Austausch mit den Vertretern der Industrie in den Arbeitsgruppen von IN4climate.NRW. Die Treffen der Innovationsteams und Arbeitsgruppen in IN4climate.NRW wurde mit der inhaltlichen Vor- und Nachbereitung unterstützt.

Für die Kategorisierung der für den Transformationsprozess identifizierten Technologien wurden geeigneten Kriterien, u. a. nach ihrer Bedeutung und Verfügbarkeit für den Transformationsprozess, festgelegt. Ein wesentlicher Schritt ist hierbei die Zusammenstellung einer hinreichenden Datenbasis, um die Auswahl und Bewertung von Technologien unterstützen zu können. Technologisch gibt es mit Carbon Direct Avoidance (CDA), Carbon Capture and Utilization (CCU) und Carbon Capture and Storage (CCS) drei wesentliche Lösungsansätze für die Industrie, um spürbar die Emission von Treibhausgasen (THG) senken zu können. Teil des ersten Forschungsintervalls war daher die möglichen Lösungswege für die einzelnen Branchen der Grundstoffindustrie zu betrachten. So wird derzeit beispielsweise in der Stahlindustrie an CDA- und CCU-Lösungen gearbeitet; die Zementindustrie hingegen prüft CCS- und CCU-Lösungen, da eine CDA-Lösung nicht verfügbar ist. Für die chemische Industrie ist der CCU-Ansatz eine Möglichkeit die Defossilisierung der Produktion voranzubringen. An den jeweiligen Lösungsansatz gekoppelt ergeben sich technologische Herausforderungen, die in einen zeitlichen Bezug hinsichtlich einer Umsetzung bis 2050 zu bringen sind. Es handelt sich hierbei um einen großen Transformationsprozess für die Industrie, der nicht allein auf Unternehmensebene erbracht werden kann.

Die Prozesse der Grundstoffindustrie sind durch einen hohen Energieeinsatz gekennzeichnet. Die Einbindung volatiler erneuerbarer Energien führt im Vergleich zu der bisher auf fossilen Energieträgern beruhenden Energiebereitstellung zu Schwankungen, die ggf. bei den zukünftigen Industrieprozessen berücksichtigt werden müssen. Bestehende Industrieprozesse können nicht in jedem Fall flexibel auf diese Schwankungen reagieren. Alternativ bedarf es daher einer Infrastruktur für die Stoff- und Energieversorgung der Prozesse, die ausreichend flexibel ist, um Schwankungen im System ausgleichen zu können. Insbesondere gehören zu den möglichen Maßnahmen bei der Infrastruktur Speicher- und Puffermöglichkeiten, die hinsichtlich ihres Potenzials zu betrachten sind.

Sowohl stofflich als auch energetisch ist Wasserstoff ist für die Transformationsprozesse ein zentraler Baustein, der bei den meisten Lösungsansätzen benötigt wird. Entsprechend wurde die Betrachtung der Herstellung und des Transports von Wasserstoff im 1. Forschungsintervall priorisiert. Für einzelne Industriestandorte in NRW ist eine Analyse der Potenziale cross-industrieller Produktionsnetzwerke sowie einer Optimierung der Energiesysteme vorzunehmen. Für diese Konkretisierung der Betrachtung in den nächsten Forschungsintervallen ist ein geeignetes Framework erforderlich, diese Arbeiten erfolgten im 1. Forschungsintervall.

Für die Fachdiskussion bedarf es in der weiteren Projektbearbeitung eines visionären Bildes der zukünftigen Prozesse sowie der zugehörigen Infrastruktur und ihrer Bereitstellung. Hierzu sind die technologiebezogenen Betrachtungen in einen Zeitbezug zu bringen, der als Ziel die klimaneutrale Grundstoffindustrie 2050 in NRW besitzt. Ein wesentlicher Baustein ist die Kopplung der Arbeiten aus Themenfeld 1 mit den Arbeiten zu den Szenarien in Themenfeld 3. In ähnlicher Weise wurde zu Beginn

des Forschungsintervalls die Produktion von Methanol als Grundlage für die chemische Industrie und somit als Schnittstelle zum Themenfeld 2 identifiziert.

Bedarf und Aufwand der Umsetzung identifizierter Technologien und Infrastrukturmaßnahmen sind im laufenden Dialog mit den Industrievertretern in den Arbeitsgruppen in IN4climate.NRW zu klären. Als Ergebnis dieses Dialogs sollen geeignete Umsetzungsprojekte entwickelt werden, die den Transformationsprozess voranbringen.

2.2 Ergebnisse Standorttool Industrie

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor der Energiewende ist die verlässliche Energieversorgung der Industrie unter Einbindung regenerativer Technologien. Grundsätzlich sind regenerative Energien jedoch durch eine mitunter hohe Volatilität und begrenzte regionale Verfügbarkeit limitiert. Ein Ziel des Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung eines Optimierungsframeworks zur Planung und Betrieb von Energieversorgungssystemen (siehe Abbildung 2).

In Forschungsintervall 1 wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt und als Ergebnis eine Modellstruktur erarbeitet und implementiert. Folgende Anforderungen wurden dabei aus dem verstärkten Einsatz von Sektorkopplung und regenerativen Stromerzeugern identifiziert:

- Abbildung räumlicher und zeitlicher Kopplung
- Abbildung möglicher Synergieeffekte
- Berücksichtigung von prozessgetriebenen Bedarfsänderungen
- Nachweis der Verlässlichkeit des Energiesystems
- Mögliche Verlagerung von Klimawandel zu anderen Umweltbelastungen.

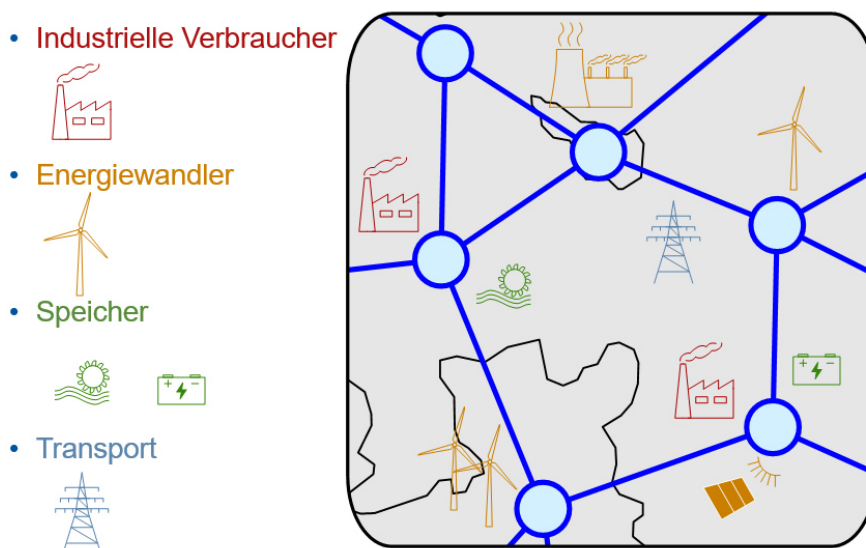


Abbildung 2: Verbraucher, Energiewandler, Speicher und Transportprozesse in industriellen Energiesystemen

Für die Ableitung ganzheitlicher Optimierungslösungen sind die neuen Herausforderungen in Optimierungsmethoden und zugehörigen Software-Frameworks abzubilden. Die erarbeitete Modellstruktur des Frameworks (siehe Abbildung 3) berücksichtigt neben Energiewandlern und Speichern auch den standortübergreifenden Transport von Strom und Gütern und kann dadurch Synergieeffekte zwischen

den Technologieoptionen aufzeigen. Eine integrierte Optimierung von Prozess- und Energiesystem unter Berücksichtigung zeitlicher Fluktuationen und ökologischer Indikatoren ist mit den bisherigen Tools nicht möglich. Die entwickelte Modellstruktur berücksichtigt prozessgetriebene Bedarfsänderungen und kann sehr flexibel auf verschiedene Energiesysteme unterschiedlicher Skalen angewendet werden. Als Multienergiesystem berücksichtigt das Framework verschiedene Energieformen. Die Verlässlichkeit des Systems kann mithilfe einer Betriebsvalidierung nachgewiesen werden. Im Besonderen die Einbeziehung der ökologischen Indikatoren in die Optimierung ist eine wesentliche Neuerung.

Für die Modellstruktur wurden vier notwendige Prozessklassen identifiziert und definiert (siehe Abbildung 3):

1. **Produktprozesse:** Auf Basis der Eingangsgrößen (z.B. Rohstoffe) werden in Produktprozessen ein oder mehrere Produkte hergestellt. Dies umfasst beispielsweise Kraftwerksprozesse, so wird auf Basis des eingehenden Brennstoffes Strom produziert.
2. **Speicherprozesse:** Speicherprozesse speichern Produkte, beispielsweise Strom. Sie sind typischerweise wirkungsgradbehaftet.
3. **Transportprozesse:** Transportprozesse ermöglichen den Transport eines Rohstoffes oder Produktes. Transportprozesse sind optional verlustbehaftet.
4. **Übertragungsprozesse:** Übertragungsprozesse erlauben den Transport des Produktes „Elektrizität“.

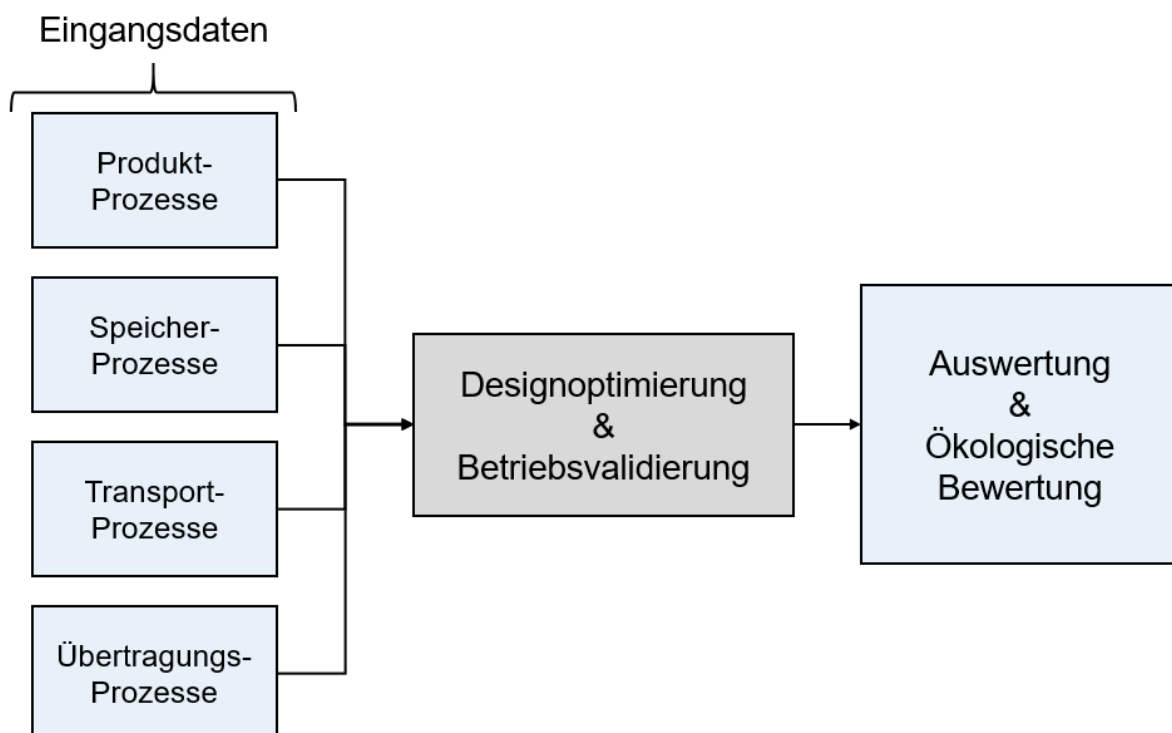


Abbildung 3: Schemazeichnung der zur Optimierung verwendeten Prozessklassen

Der Status des Frameworks wird auf der Statuskonferenz am Ende des ersten Forschungsintervalls in Form eines Posters vorgestellt. Die erarbeiteten Methoden werden am Ende des Forschungsvorhabens über ein Open-Source Tool durch den Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der RWTH Aachen für

Vertreter/innen aus Industrie und Wissenschaft zugänglich gemacht. Mit der Bereitstellung als Open-Source wird die Einbindung in bestehende Werkzeuge ermöglicht. Der Lehrstuhl leistet somit einen entscheidenden Beitrag zur Verbreitung dieser Methoden.

Verknüpfte Produkte im 1. Forschungsintervall:

- Framework zur energetischen Standortoptimierung

2.3 Ergebnisse Technologiesteckbriefe

Ein zentraler Punkt für die Arbeiten in Themenfeld 1 ist die Ermittlung und Darstellung von Technologien für die Umsetzung der in Nummer 2.1 genannten Lösungsansätze im Zuge des anstehenden Transformationsprozesses der Grundstoffindustrie zur Klimaneutralität bis 2050. Die Technologien werden in Form standardisierter Technologiesteckbriefe abgebildet, die im Rahmen der folgenden Forschungsintervalle ergänzt und verfeinert werden. Am Beginn des ersten Intervalls wurden wesentliche Kriterien für die Erstellung der Steckbriefe erarbeitet, dies umfasst u.a.:

- Technologien dürfen nicht allein auf Grund eines niedrigen Technologie-Reifegrades (TRL) bzw. fehlender Konkurrenzfähigkeit zu den Referenzprozessen ausgeschlossen werden, wenn bestehende Rahmenbedingungen zu dieser Einschätzung führen und sich ggf. ändern können
- Technologien mit hohem TRL führen ggf. zu Mehrkosten, die mit bestehenden Prozessen ins Verhältnis zu setzen sind
- Relevanz für die Grundstoffindustrie in NRW
- Systemischer Einfluss der jeweiligen Technologie
- Beschreibung von Integrationspotenzialen insbesondere bei der Wärmeintegration
- Ausschluss von Technologien, die in der Summe keine Minderung der THG-Emissionen bzw. des Einsatzes fossiler Rohstoffe ermöglichen

Im Rahmen des Auftakttreffens von IN4climate.NRW (Februar 2019) wurde durch die Vertreter der Industriepartner eine umfangreiche Sammlung möglicher Schlüsseltechnologien durch die Industriepartner erstellt. Ein zentraler Baustein für nahezu die gesamte Industrie ist hierbei Wasserstoff, der sowohl energetisch als auch stofflich genutzt werden soll. Ein Beispiel ist der Prozess der Direktreduktion in der Stahlindustrie, der eine große Menge an grünem Wasserstoff benötigt wird, wenn das Verfahren großtechnisch zu Anwendung kommt. Auch für die CCU-Verfahren sowie die Circular Economy ist Wasserstoff bei der Kreislaufführung von Kohlenstoff ein zentrales Element.

Hinsichtlich der Wasserstoffinfrastruktur laufen derzeit noch viele Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Hierzu gehört u.a. die Nutzung bestehender Erdgasleitungen für eine Wasserstoffinfrastruktur sowie die Nutzung von Salzkavernen als großvolumige Speicher. Ähnlich wie bei den Prozessentwicklungen ist derzeit noch nicht absehbar, welche Technologien am Ende tatsächlich großtechnisch zum Einsatz kommen.

Bei der Wasserstoffbereitstellung wurden im ersten Schritt großtechnisch verfügbare Technologien gewählt. Für die Verfahren der Wasserelektrolyse wurden Steckbriefe erstellt. Derzeit stehen die

alkalische Elektrolyse (AEL), die Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)-Elektrolyse und mit Einschränkungen die Hochtemperaturelektrolyse (HTE) als Technologien zu Verfügung.

Verfahren wie die Methanpyrolyse erlauben die Bereitstellung von Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen, wodurch ggf. der Aufbau der erforderlichen Infrastruktur unterstützt werden kann, gleichzeitig ergeben sich allerdings kaum Vorteile hinsichtlich der angestrebten Klimaneutralität. Die Vergasung von Biomasse ist ebenfalls eine Option, wenn entstehendes Kohlenstoffdioxid bzw. Kohlenstoffmonoxid direkt in petrochemischen Prozessen genutzt wird.

Die chemische Industrie benötigt weiterhin umfangreiche Kohlenstoffquellen für ihre Produktion. Die Substitution fossiler Quellen ist in Verbindung mit grünem Wasserstoff möglich. Hierzu sind etablierte Verfahren der Grundstoffindustrie anzupassen. Eine der wichtigsten Plattformchemikalien ist Methanol, dass in vielen Bereich der chemischen Industrie (u.a. Lösungsmittel, Polymere) sowie im Kraftstoffbereich eingesetzt werden kann. Das CO₂ aus industriellen Prozessen wird hierzu mit dem grünen Wasserstoff zu Methanol umgesetzt werden. Eins der möglichen Folgeprodukte ist Dimethylether (DEM), das insbesondere im Kraftstoffbereich nachgefragt ist. Auch die Herstellung von höheren Alkoholen kann ein wichtiger Baustein für die chemische Industrie werden. Auch hier wurden erste Steckbriefe erstellt, die in den weiteren Forschungsintervallen zu überarbeiten sind. Inwieweit die Nutzung von CO₂ aus Industrieprozessgasen tatsächlich wirtschaftlich möglich ist, ist derzeit noch Gegenstand der Forschung, da im Vergleich zu den aktuellen Referenzprozessen eine umfängliche Konditionierung der Eingangsgasen erforderlich ist.

Die Steckbriefe enthalten jeweils einen allgemeinen, einen technologischen und einen ökonomischen Teil. Bei den Parametern berücksichtigt wurde u. a.:

- Klimaschutzrelevanz (Treibhausgasminderungspotenzial)
- Flexibilität der Technologie
- TRL
- Einordnung im Hinblick auf rechtliche Rahmenbedingungen

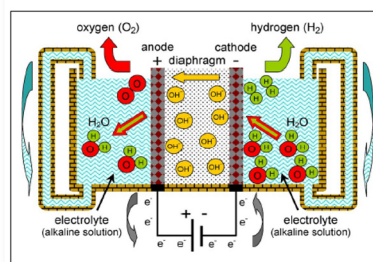
Aus Basis der Daten aus den Steckbriefen sowie der Austausch mit den Arbeitsgruppen in IN4climate.NRW konnten einige Punkte für eine mögliche Entwicklungslinie in Bezug auf die Wasserstoffinfrastruktur abgeleitet werden:

- Optimierung von Stromdichte, Wirkungsgrad und Lebensdauer der Verfahren zur Erzeugung des Wasserstoffs forcieren

Technologiesteckbriefe - Wasserstofftechnologien

Alkalische Elektrolyse

Steckbrief	Alkalische Elektrolyse
Beschreibung	Elektrochemische Spaltung von Wasser in Wasserstoff (H ₂) und Sauerstoff (O ₂) durch Anlegen einer elektrischen Spannung an zwei Elektroden in einer alkalischen Elektrolytlösung
Edukte	H ₂ O elektr. Strom
Produkte	Wasserstoff (mind. 99,95%) Sauerstoff (99,99%)
Gleichungssystem	Anode: 2 OH ⁻ → 0,5 O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ Kathode: 2 H ₂ O + 2e ⁻ → H ₂ + 2 OH ⁻ Gesamt: H ₂ O → H ₂ + 0,5 O ₂



Source: [Ursua-2010]

Parameter	Einheit	Literaturwerte	Quelle
Elektrolyt	[-]	flüssig (KOH)	[Ursua-2010]
Elektrodenmaterial	[-]	Nickel / Eisen	
Diaphragma	[-]		
Betriebstemperatur	°C	40 - 90	[Smolinka, et al.-2011]

Themenfeld 1 / SCI4climate.NRW

Abbildung 4: Screenshot Technologiesteckbrief

- Ausbildung und Erhalt einer Technologieviefalt und damit Sicherung unterschiedlicher Optionen zur Systemintegration
- Abhängigkeit von knappen Ressourcen (z.B. Iridium bei PEM) bei den Technologien reduzieren bzw. beseitigen – u.a. Entwicklung von Recyclingtechnologien
- Entwicklung und Optimierung von Technologien zur Nutzung des Wasserstoffs auf Anwenderseite unterstützen
- Stärken des Dialogs zwischen Politik, Gesellschaft, Technologieherstellern, Wasserstoffherzeugern und -anwendern
- Einbindung von Wasserstoff in das Energienetz und strategische Verteilung
- Ausbau der erneuerbaren Energien und der notwendigen Infrastruktur für Strom, Wärme und Gas
- Aufbau einer geeigneten Infrastruktur für den Import, die Verteilung und die Speicherung von Wasserstoff
- Bereitstellung des Wasserstoffs zur stofflichen und energetischen Nutzung in den industriellen Zentren
- Setzen des regulatorischen Rahmens für die wettbewerbsfähige Erzeugung und Bereitstellung des Wasserstoffs – national und international
- Aktivierung und Sicherung des Marktes für die Elektrolyseindustrie – Unterstützung bei der Entwicklung und Optimierung von wirtschaftlichen Herstellverfahren
- Entwicklung von Konzepten zur Vergrößerung der Produktion von Elektrolysetechnologien

Für die stoffliche Nutzung des CO₂ aus den Prozessgasen lassen sich vergleichbare Punkte ableiten, da hier bevorzugt auf bekannte Verfahren gesetzt werden soll, ist die Liste entsprechend kürzer:

- Nutzung bestehender Technologien für eine möglichst schnelle Umsetzung möglicher Transformationsschritte
- Unterstützung der Technologieentwicklung und -optimierung für die Defossilisierung der Synthesetechnologien
- Setzen von Marktanreizen zur Umsetzung der Defossilisierung
- Bereitstellung des erforderlichen Synthesegases – Aufbau einer H₂- und CO₂-Infrastruktur
- Setzen des regulatorischen Rahmens für die wettbewerbsfähige Produktion und die Klärung von Fragen im Zusammenhang mit der Nutzung von CO₂ aus Industrieprozessen

Diese Punkte sind in einem weiteren Schritt, soweit dies möglich ist, in eine zeitliche Abfolge zu bringen, um hieraus notwendige Handlungserfordernisse für die Einführung neuer Technologien ableiten zu können.

Verknüpfte Produkte im 1. Forschungsintervall:

- Auftakttreffen des Projekts IN4climate.NRW, Veranstalter: Geschäftsstelle IN4climate.NRW; das Treffen wurde von SCI4climate.NRW vorbereitet und unterstützt, die Ergebnisse bildeten die Grundlage für das erste Forschungsintervall (Februar 2019, <https://www.in4climate.nrw/nachrichten/details/initiative-fuer-mehr-klimaschutz-in-der-industrie-in4climate-nrw-nimmt-arbeit-auf/>)

- Workshop „CO₂-Infrastruktur in NRW“, Veranstalter: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (vdz) (August 2019, <https://www.vdz-online.de/aktuelles/einzelansicht-presse/news/workshop-zu-voraussetzungen-fuer-co2-infrastruktur-in-nrw-2/cobj/5051/>)
- Diskussionspapier zur Rolle von Wasserstoff, Herausgeber: Geschäftsstelle IN4climate.NRW (Dezember 2019, <https://www.in4climate.nrw/newsroom/publikationen/>)

2.4 Ergebnisse Projektideen/ Forschungslücken

Auf technologischer Basis sind derzeit keine direkten Substitutionsmöglichkeiten erkennbar, die allein durch den Austausch von Technologien den Schritt zur Klimaneutralität für die Grundstoffindustrie erkennen lassen. Vielmehr sind neue Technologiebausteine in das Produktionssystem zu integrieren bzw. Technologien in unterschiedlichen Sektoren auf geeignete Weise zu koppeln. Es entstehen dadurch entlang der Wertschöpfungsketten neue Abhängigkeiten. Hierzu bedarf es multikriterieller Ansätze, die die Auswahl geeigneter Technologieoptionen ermöglichen. Die geeigneten Kriterien sind in den nächsten Forschungsintervallen zu erarbeiten und insbesondere mit den Industriepartnern in den Arbeitsgruppen von IN4climate.NRW zu diskutieren. Entsprechend erfolgt auch eine stärkere Zusammenarbeit der Themenfelder in SCI4climate.NRW. Hierbei steht für Themenfeld 1 die folgende übergeordnete Forschungsfrage im Mittelpunkt:

- Wie sehen Entwicklungslinien für zentrale Technologiefelder und Infrastrukturen aus, die geeignet sind, die angestrebte Treibhausgas-Neutralität der Grundstoffindustrie in NRW bis 2050 zu erreichen?

Beispiele hierfür sind allen Bereichen der Grundstoffindustrie in NRW zu finden. Die Stahlindustrie erwartet den größten Wandel mit der Direktreduktion von Eisen mittels Wasserstoff (DRI). Allerdings laufen großtechnische Tests derzeit erst an¹, ob die Technologie mit 100%-Einsatz von Wasserstoff bis zum Jahr 2050 im Industriemaßstab zur Verfügung steht, ist noch offen. Die Technologie würde den CO₂-Fußabdrucks des Stahls in Relation zur Hochofenroute deutlich reduzieren. Parallel wird an der stofflichen Nutzung (CCU) des bei der Stahlproduktion entstehenden CO₂ gearbeitet². Die Kopplung der unterschiedlichen Lösungsansätze bietet für die Gestaltung der Stahlproduktion enorme Möglichkeiten³. Die wesentliche Voraussetzung ist die Existenz einer funktionierenden Wasserstoffinfrastruktur. Entsprechend ergeben sich zwei zentrale Arbeitsfelder:

- *Technologiefelder und Infrastrukturen:* Wie sehen Entwicklungslinien für zentrale Technologiefelder und Infrastrukturen aus, die geeignet sind, im Rahmen der in Themenfeld 3 entwickelten Szenarien die angestrebte THG-Neutralität der Grundstoffindustrie in NRW zu erreichen?

¹ ArcelorMittal Germany: Weltneuheit für Stahl: ArcelorMittal untersucht industriellen Einsatz von reinem Wasserstoff. <https://www.presseportal.de/pm/134113/4230508>, zuletzt besucht 21.04.2020

² Carbon2Chem®, <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/carbon2chem.php>, zuletzt besucht 21.04.2020

³ Wirtschaftsvereinigung Stahl: Perspektiven der Stahlproduktion in einer treibhausgasneutralen Wirtschaft. www.stahl-online.de, zuletzt besucht 21.04.2020

- *Wasserstoff-Bereitstellung*: Welche Schritte zur Bereitstellung von Wasserstoff als stoffliche Schlüsselkomponente zur Transformation der Grundstoffindustrie in Richtung Treibhausgasneutralität sind erforderlich?

Prozessbedingt ist die Entstehung von CO₂ beim Produktionsprozess der Zementindustrie nicht zu vermeiden. Es existiert eine breite Palette an Technologieoptionen, die gekoppelt die Emission von Treibhausgasen reduzieren⁴. Ein wichtiger Bestandteil der geplanten Maßnahmen auf dem Weg zur klimaneutralen Zementindustrie ist das Fassen und langfristige Speichern von CO₂. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist der Aufbau einer geeigneten CO₂-Infrastruktur. Inhalt der Arbeiten ist daher, analog zum Wasserstoff, die Zusammenstellung der notwendigen Schritte für eine leistungsfähige CO₂-Infrastruktur mit den technischen Herausforderungen.

Die chemische Industrie benötigt für ihre Produktion Kohlenstoff. Der Bedarf wird zu fast 90% aus fossilen Rohstoffen gedeckt. Für den Weg der chemischen Industrie zur klimaneutralen Produktion ist daher die Defossilisierung der entscheidende Baustein.⁵ Das Vorhandensein einer CO₂- und Wasserstoff-Infrastruktur ist eine wichtige Voraussetzung. Ergänzend bedarf es der notwendigen Technologien zur Etablierung einer kohlenstoffbasierten Circular Economy, wie sie in Themenfeld 2 betrachtet und entworfen wird. Die Rückgewinnung des Kohlenstoffs aus chemischen Produkten sollte dabei in möglichst größere Kohlenstoffketten erfolgen. Zusammen mit den Themenfeldern 2 und 3 soll dabei das Potenzial der Technologieoptionen dargestellt werden. Die zentrale Frage für Themenfeld 1 ist:

- *Chemisches Kunststoffrecycling*: Wie sehen geeignete Entwicklungslinien für Technologien des chemischen Kunststoffrecyclings als Beispiel für das Schließen von Kohlenstoffkreisläufen aus?

Auf Basis der Ergebnisse im 1. Forschungsintervall soll im Rahmen von SCI4climate.NRW u. a. eine Analyse der Potenziale der Technologien mit Bezug auf die Ergebnisse aus Themenfeld 3 (Kontextszenarien) und Themenfeld 4 (Rahmenbedingungen) vorgenommen werden. Durch die Einbeziehung der zeitlichen Entwicklung des Industriesystems bis 2050 sollen Handlungs- und Entwicklungsoptionen berücksichtigt werden. Dies betrifft insbesondere die abzuleitenden Entwicklungslinien für die Technologien.

Das Aufzeigen von Handlungserfordernissen ist umso dringlicher, da im Rahmen der technologischen Diskussion erkennbar ist, dass sowohl für Wasserstoff als auch Kohlenstoffdioxid, wie oben beschrieben, eine umfängliche Infrastruktur erforderlich ist, die derzeit erst in Ansätzen existiert. Fragen der „Akzeptanz von Technologie“ sind hierbei innerhalb von SCI4climate.NRW zu berücksichtigen, da sie wesentlich die Umsetzung technischer Lösungen beeinflussen. In Fall der Infrastrukturen ist hierzu u.a. zu klären: Was passiert bei technischen Havarien? Welche neuen technischen Risiken entstehen? Welche rechtlichen Anforderungen ergeben sich für die Unternehmen?

⁴ Ruppert; Wagener; Palm; Scheuer; Hoenig: Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie. Abschlussbericht, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, März 2020. ISSN 1862-4804, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

⁵ Geres; Kohn; Lenz; Ausfelder; Bazzanella; Möller: Roadmap Chemie 2050. FutureCamp Climate GmbH; DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2019. ISBN: 978-3-89746-223-6, www.vci.de

- *Technik und Rahmenbedingungen:* Wie gestaltet sich das Wechselspiel zwischen technischen Entwicklungen einerseits und planungs-/zulassungsrechtlichen Rahmenbedingungen andererseits (Standortanforderungen, Beherrschung technischer Risiken)?

Bei der Energieversorgung ist die Notwendigkeit der Verknüpfung unterschiedlicher Energiequellen absehbar, da in NRW und auch Deutschland nicht ausreichend erneuerbare Energie bis 2050 zur Verfügung stehen wird. Der Import von erneuerbarer Energie mit den hiermit verbundenen Herausforderungen ist somit im Rahmen der Infrastruktur zu berücksichtigen. Der Punkt der System- und Energieintegration sowie die Optimierung von Energiesystemen wird damit noch wichtiger. Entsprechend erfolgt die weitere Entwicklung des Standorttools zur Optimierung eines zeitlich aufgelösten Energieversorgungssystems unter Nutzung fossiler und regenerativer Energiewandler zur Wärme- und Strombereitstellung.

Die notwendigen Arbeitsschritte werden im Forschungsplan für 2. Forschungsintervall näher ausgeführt.

3 Ergebnisse Produkte und Wertschöpfungsketten

Die Zielsetzung des Themenfelds besteht in der Analyse nachfrageseitiger Maßnahmen für eine klimaneutrale Industrie und in der Entwicklung ressourceneffizienter und zirkulärer nachfrageseitiger Wertschöpfungs-systeme. Das Themenfeld setzt dabei am Grundstoff an und analysiert und optimiert den weiteren Lebenszyklus vom Produktdesign über die Produktion und Nutzung bis hin zur hochwertigen Kreislaufführung sowie die Umsetzung der entsprechenden Maßnahmen in den entsprechenden Wertschöpfungsketten. Die Teilziele sind damit folgende:

- Quantitative Abbildung der Grundstoffflüsse entlang des Lebenszyklus wesentlicher Güter in denen die Grundstoffe genutzt werden unter Berücksichtigung der Qualitäten
- Identifikation von Potenzialen zur Emissionsreduktion und zur Steigerung der Ressourceneffizienz entlang des Lebenszyklus ausgewählter Güter
- Technoökonomische Analyse und Gestaltung hochwertiger Kreislaufsysteme
- Analyse und Optimierung von Kreislaufstrategien und resultierender Handlungsalternativen
- Identifikation von neuen Ansätzen zum Produktdesign und von innovativen Geschäftsmodellen zur Befriedigung der der Güternachfrage zu Grunde liegenden Bedürfnisfelder

3.1 Forschungsfragen des 1. Forschungsintervalls

Für die Detailanalysen im ersten Forschungsintervall wurde der Betrachtungsrahmen hinsichtlich Kunststoffe und Verpackungsmaterialien eingegrenzt. Die Chemieindustrie ist der zweigrößte Emittent industriebedingter Treibhausgasemissionen in NRW. Zugleich werden Kunststoffe mit steigender Tendenz flächendeckend in einer Vielzahl von Produkten eingesetzt. Während zunächst bei der Produktion einer Tonne Kunststoff 1,7 -3,5 t CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq.) entstehen, werden durch den im Material gebundenen Kohlenstoff am Ende des Lebenszyklus weitere 1,4 – 3,5 t CO₂-Äq. freigesetzt. Besonders problematisch ist dies für Produkte mit kurzer Nutzungsdauer von (deutlich) weniger als einem Jahr, da hier eine hohe und hochfrequente Güterproduktion und Abfallerzeugung resultiert. Mit den Kunststoffverpackungen wurde somit ein Güterbündel gewählt, welches aufgrund der kurzen Nutzungsdauer hohe THG-Relevanz aufweist.

Vor diesem Hintergrund wurden folgende Forschungsfragen für das erste Forschungsintervall in Hinblick auf die Technologie- und Stoffstromanalyse sowie die Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen bzw. Optimierungspotenziale formuliert:

Analyse

- *In welcher Branche der Kunststoffindustrie bestehen die größten Potenziale, um Treibhausgasemissionen durch Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft einzusparen?*
- *Was sind die ökologischen und ökonomischen Engpässe bzw. Trade-offs bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffindustrie?*

Optimierung

- *Welche Kriterien können für zirkuläres Produktdesign im Bereich von Kunststoffen und insbesondere für das Gut Verpackungen angelegt werden?*
- *Welche Erkenntnisse lassen sich aus der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) bezüglich der Nachfrage nach Materialgruppen (Kunststoff, Metall, etc.) in NRW gewinnen?*

- *Wie könnte ein alternatives Produkt-/Dienstleistungssystem für Lebensmittelverpackungen gestaltet sein, welches zum einen nutzerorientiert und zum anderen ökologisch vorteilhafter als das bestehende System ist?*
- *Was sind die Potenziale von CCU-Technologien zur Reduktion der Chemie- und Kunststoffindustrie in NRW?*

Es erfolgten zunächst die Quantifizierung des aktuellen Kunststoffkreislaufes in NRW sowie die Analyse potenzieller Kreislaufschlüsse in NRW. Die zentralen Ergebnisse sind in Abschnitt 3.2 zusammengefasst. Darauf aufbauend wurden die Auswirkungen bei der Umsetzung potenzieller Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen analysiert und optimiert. Die Ergebnisse der Optimierung der Wertschöpfungsketten, des Produktdesigns und der Verwertungswege werden in Abschnitt 3.3 aufgeführt.

3.2 Quantitative Analyse des Kunststoffkreislaufs und potenzieller Kreislaufschlüsse in NRW

Die Analyse des Kunststoffkreislaufs und potenzieller Kreislaufschlüsse in NRW erfolgte in einem dreistufigen Prozess (siehe Abbildung 5). Als Ausgangspunkt für die Quantifizierung der Kunststoffströme setzt die Analyse zunächst am End-of-Life der Produkte in Form eines Überblicks über die Kunststoffabfallströme in NRW an (siehe Abbildung 6). Für fortführende Analysen hinsichtlich der Ressourcennutzung und Umweltwirkungen wurde im Rahmen der Analyse eines spezifischen Kunststoffstroms ein quantitatives Mengengerüst bei Erweiterung des Betrachtungsrahmens auf die gesamte Wertschöpfungskette erstellt. Die Analyse aktueller Stoffströme von Kunststoffverpackungen in NRW (3.2.2) zeigt das Substitutionspotenzial von Primärkunststoffen durch Sekundärmaterial, das nach aktuellem Stand der Technik aus dem Dualen System in NRW gewonnen werden kann, und knüpft damit direkt an die Erkenntnisse aus der Abfallstromanalyse an. Abschließend werden die industriellen Zusammenhänge für NRW analysiert (3.2.3), um weitere Optionen für die Erhöhung der Nutzung von Rezyklaten zu analysieren und die Erkenntnisse in eine Ökobilanz einzuspeisen.

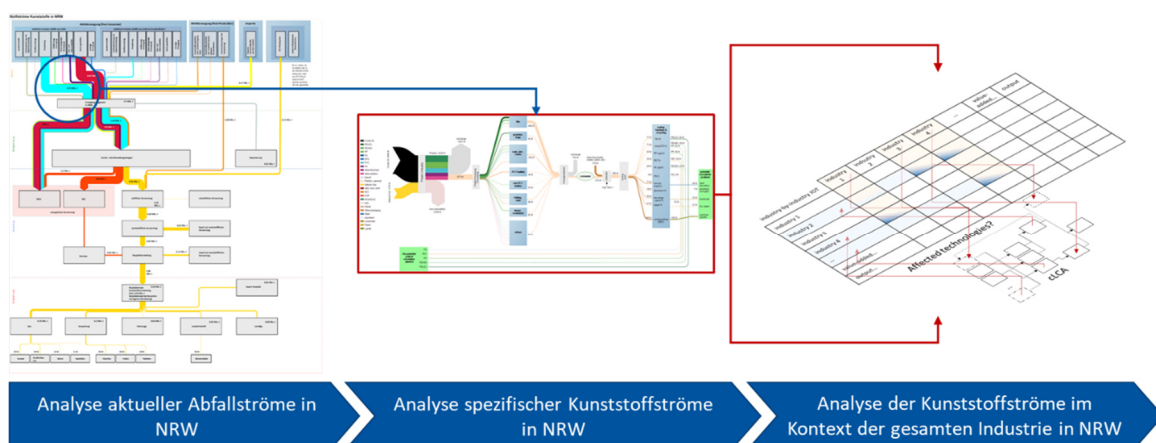


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der quantitativen Analyse des Kunststoffkreislaufs in NRW

Grundlage der Modellierung der kunststoffbasierten Abfallströme sind die an den Abfallbehandlungsanlagen durch das Statistische Landesamt NRW erfassten Abfallmengen. Für NRW liegen keine ganzheitlichen, eigenständigen Informationen, Daten oder Studien vor, die eine spezifische Ableitung der unterschiedlichen Verwertungswege und des Rezyklateinsatzes in verschiedenen Branchen erlauben

würden. Allerdings ist das Land NRW als ein bevölkerungsreiches, großes Flächenland mit sowohl ländlich geprägten Regionen als auch urbanen Zentren ein Abbild der Bundesrepublik Deutschland. Daher erscheint die Annahme plausibel, dass die Übertragung von prozentualen Anteilen für Gesamtdeutschland, wie sie aus der Conversio-Studie (2018) und Steger et al. (2018) entnommen werden können, eine richtungssichere Abschätzung der Kunststoff-Stoffströme für NRW ermöglichen. Neben der Abfallstatistik wurden die Abfallimporte aus anderen Ländern nach der entsprechenden tiefgegliederten Abfallschlüsselung ermittelt. In dieser Menge sind die Kunststoffmengen aus PET-Pfandsystemen und aus dem internen Recycling nicht enthalten, da diese auf Grund ihrer Sortenreinheit direkt in die stoffliche Verwertung gehen. Den Anteilen wird aufgrund der geringen Masse jedoch eine untergeordnete Rolle zugeordnet. Die Daten für die Analyse des Stoffstroms von Kunststoffverpackungen wurden aus Branchenstatistiken, Verbänden und Handelsstatistiken entnommen und stellenweise anhand der auf NRW-Niveau skalierten prozentualen Anteile gemäß der oben erwähnten Studie von Conversio ausgehend von gesamtdeutschen Werten ergänzt.

3.2.1 Ergebnisse der Analyse aktueller kunststoffbasierter Abfallströme in NRW

Ermittlung der Kunststoffanteile an den Abfallströmen

Für das Land NRW wurde im Jahr 2017 eine Kunststoffabfallmenge von 2,4 Mio. t identifiziert, die zur Verwertung oder Beseitigung zur Verfügung stehen.

Wie aus dem Sankey-Diagramm (siehe Abbildung 6) ersichtlich ist, werden Kunststoffabfälle derzeit zu einem großen Teil in Müllverbrennungsanlagen (MVA) oder als vorbehandelte Ersatzbrennstoffe (EBS), in EBS-Kraftwerken oder bspw. in der Zementindustrie energetisch verwertet. Aktuell werden der Restmüll der Haushalte oder hausmüllähnliche Gewerbeabfälle zu fast 100% energetisch verwertet. Selbst gewerbliche Verpackungen werden noch zu 60% verbrannt und nicht stofflich verwertet. Von den 2,4 Mio. t an angefallenen Kunststoffabfällen in NRW im Jahr 2017 wurden schätzungsgemäß 58% einer gewissen Vorbehandlung, wie z.B. einer Zerkleinerung, Säuberung und Sortierung (und ggf. weiteren Behandlungsschritte) unterzogen. Den Sortier- und Behandlungsanlagen werden zu einem großen Teil Verpackungsabfälle zugeführt. Insgesamt wurden von den vorbehandelten Anteilen aber nur 36% im weiteren Verlauf einer stofflichen Verwertung zugeführt, der Rest wurde energetisch verwertet (aufgrund der höheren Sortenreinheit gegenüber Mischabfällen überwiegend als Ersatzbrennstoffe). Die Deponierung wird insgesamt nur für einen geringen Mengenanteil vorgenommen und wird daher als vernachlässigbar erachtet.

Stoffströme Kunststoffe in NRW

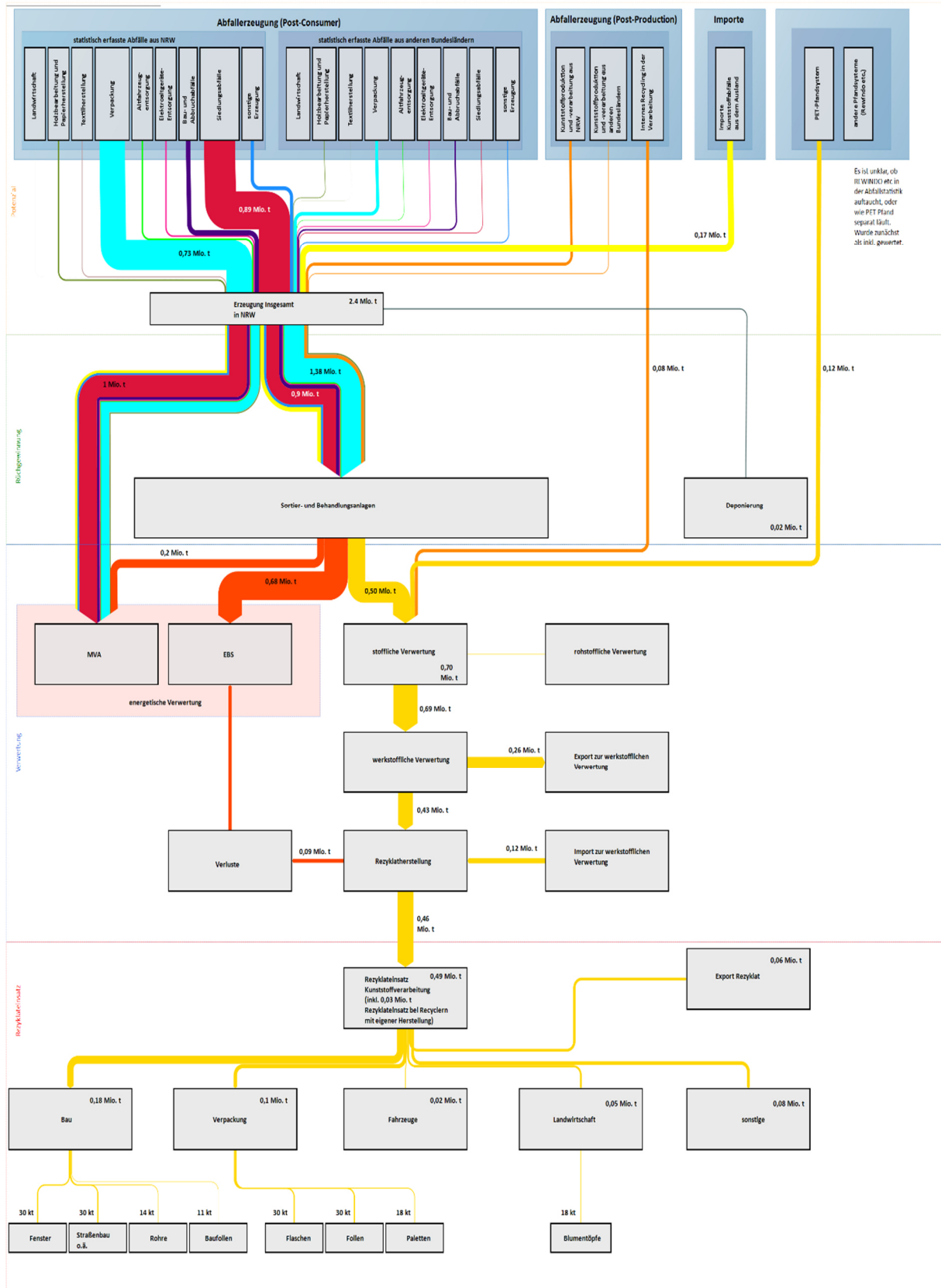


Abbildung 6: Darstellung der Stoffströme bei Kunststoffabfällen in NRW (2017)

Von den Kunststoffabfällen zur werkstofflichen Verwertung wurden nach Berücksichtigung der Im- und Exporte etwa 80% zur Rezyklatherstellung in NRW verwendet. Nach Abzug von Aufbereitungsverlusten

entspricht dies lediglich ca. 67% der Gesamtabfallmasse des stofflichen Verwertungspfad. Der Gesamtzyklateinsatz in der Kunststoffverarbeitung in NRW wird damit auf 0,5 Mio. t Rezyklat geschätzt.

Die Analyse zeigt, dass Verpackungsabfälle aufgrund ihrer mengenmäßigen Relevanz von ca. 30% des Gesamtabfallaufkommens von Kunststoffabfällen eine gesonderte Rolle spielen. Verpackungsabfälle weisen zudem durch ihre spezifische Sammlung ein hohes Recyclingpotenzial auf. Durch eine Analyse der im Dualen System gesammelten Stoffströme von Kunststoffleichtverpackungen wird im folgenden Abschnitt eine Quantifizierung der Stoffströme der vorgelagerten Wertschöpfungskette aufgezeigt.

3.2.2 Ergebnisse der Analyse eines spezifischen Kunststoffstroms in NRW

Abbildung 7 zeigt die Kunststoffströme von Leichtverpackungen im Fall einer theoretisch maximalen Ausbeute von Abfallfraktionen in der Sortieranlage und deren Verarbeitung zu Sekundärrohstoffen.

Insgesamt werden in NRW ca. 4,4 Mio. t Kunststoffe für verschiedenste Einsatzzwecke produziert. Die Ergebnisse zeigen, dass knapp ein Viertel der in NRW produzierten Menge an Kunststoffen dort auch zu Verpackungen weiterverarbeitet wird. Weiterhin zeigt sich, dass im gleichen Jahr im Dualen System etwa 274 kt Kunststoffabfälle aus Verpackungen im gelben Sack (LVP – Leichtverpackungen) anfielen. Das entspricht etwa 28% der hergestellten Verpackungsprodukte. Gemäß dem theoretisch maximalen Anteil ergibt sich ein Potenzial von insgesamt 195 kt an Sekundärkunststoffen. Das festgestellte Potenzial entspricht somit weniger als 5% der Produktion in NRW und etwa 20% der Verarbeitungsmenge von Kunststoffen in Verpackungsprodukten. Das Potenzial eines geschlossenen Kreislaussystems für Verpackungskunststoffe basierend auf den in NRW anfallenden Abfallmassen wird daher als gering eingeschätzt. Diese Menge wird durch technische Restriktionen der Sortierung und qualitative Restriktionen des Recyclings ggf. weiter eingeschränkt. Ausschlaggebend für die verhältnismäßig geringe Menge ist eine starke Produktion und ein großer Handelsüberschuss für Verpackungsprodukte in NRW. Neben den Sekundärkunststoffen besteht ein Potenzial zur Steigerung der Gewinnung weiterer Sekundärmaterialien bei systemweiter Anwendung der theoretisch maximalen Sortiereffizienz aus dem Dualen System. Die Kunststoffströme von Verpackungen weisen nicht zuletzt durch das am Lebensende anfallende Potenzial von kunststofffremden Sekundärrohstoffen oder EBS zur energetischen Verwertung in industriellen Kraftwerken Interdependenzen mit anderen industriellen Sektoren auf. Im folgenden Abschnitt werden daher die Ergebnisse einer Analyse vorgestellt, die diese Zusammenhänge näher beleuchtet und damit die Potenziale zur Kreislaufführung erfasst.

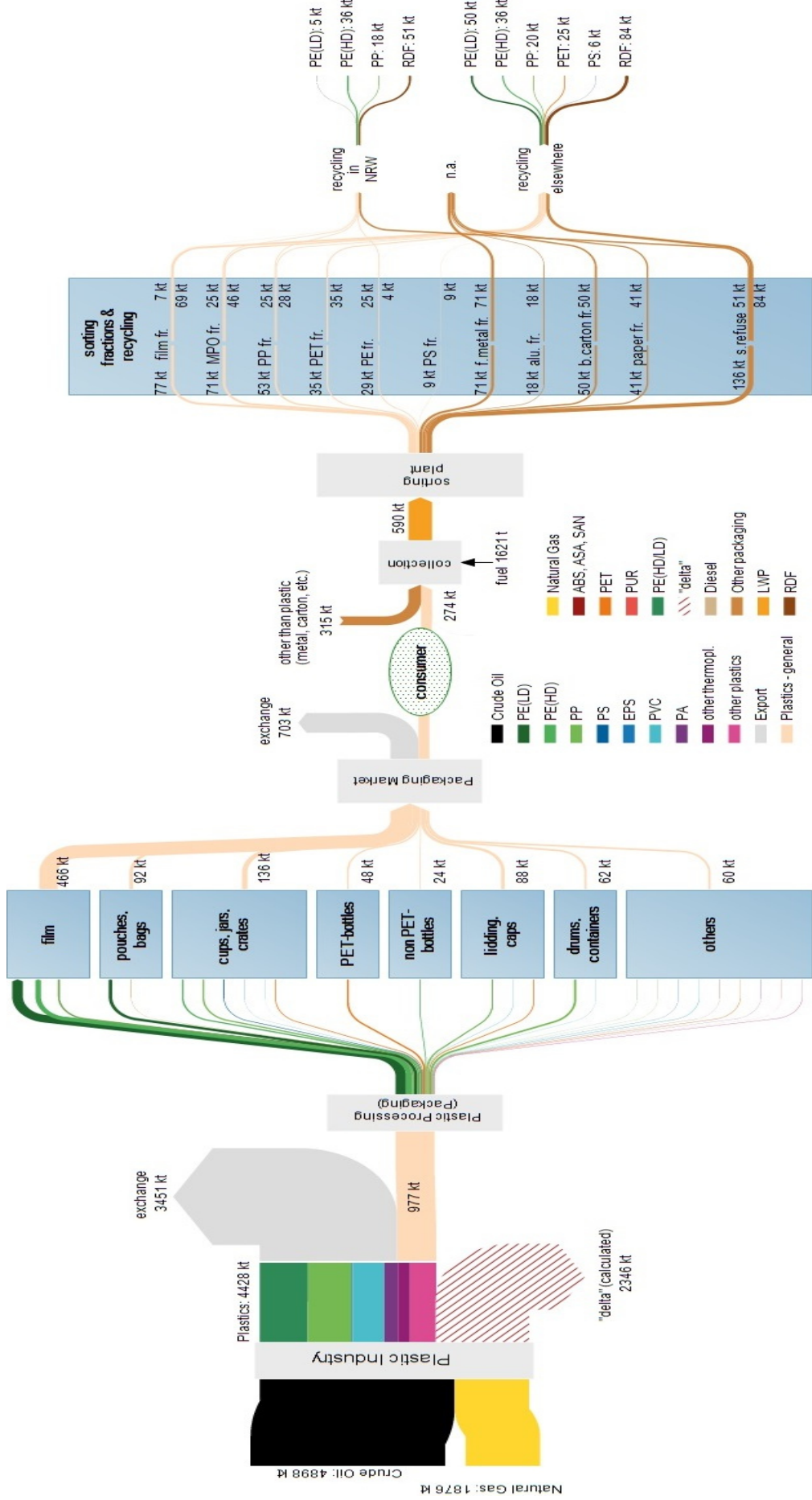


Abbildung 7: Sankey Diagramm der Kunststoffflussströme in NRW (Basisjahr 2017)

3.2.3 Ergebnisse der Analyse industrieller Zusammenhänge

Input-Output- (IOT) oder Aufkommen-Verwendung-Tabellen (SUT) können angewendet werden, um komplexe wirtschaftliche Zusammenhänge einzelner Wirtschaftsbereiche abzubilden. SUT besteht aus zwei unterschiedlichen Tabellen. Die Aufkommenstabelle ordnet die hergestellte Menge von 85 Gütergruppen in 63 Wirtschaftsbereiche nach Herstellungspreisen ein. Die Anwendungstabelle stellt den Verbrauch von 85 Gütergruppen in 63 Wirtschaftsbereichen nach Anschaffungspreisen dar. IOT ist die Kombination von SUT und bildet den „Gütertausch“ in einer 72x72 Matrix nach Herstellungspreisen ab.

Trotz des hohen Aggregationsgrades, bieten IOT und SUT eine umfassende Darstellung der wirtschaftlichen Transaktionen zwischen Wirtschaftssektoren. Bildlich gesprochen können IOT und SUT als eine Landkarte dienen, auf der Beziehungen innerhalb und zwischen Wirtschaftssektoren abgebildet werden. Die Tabellen bieten daher einen Ansatzpunkt Herausforderungen bei der Fundierung von Ökobilanzen (LCA) zu überwinden, indem sie indirekt von technologischem und politischem Wandel betroffene Prozesse, bspw. die Wirkungen des Einsatzes innovativer Technologien in anderen Sektoren, aufzeigen. Abbildung 8 stellt den Gedankengang der implementierten Methodik dar. Das Aufzeigen aller durch eine Systemänderung möglicherweise tangierten relevanten Prozesse und der entsprechenden Wege dorthin ist mittels Strukturanalysen (sog. Structural Path Analysis – SPA) möglich. Die analysierten monetären Wirkungen müssen allerdings im Anschluss mit Hilfe von Statistiken, Berichten und anderen verfügbaren Informationen bezüglich der zu Grund liegenden physikalischen Stoffströmen weiter aufgeschlüsselt werden, um das Ergebnis für eine LCA nutzbar zu machen. Auf Basis dieser Daten kann eine zukunfts- und änderungsorientierte Ökobilanz (sog. Consequential LCA) erstellt werden.

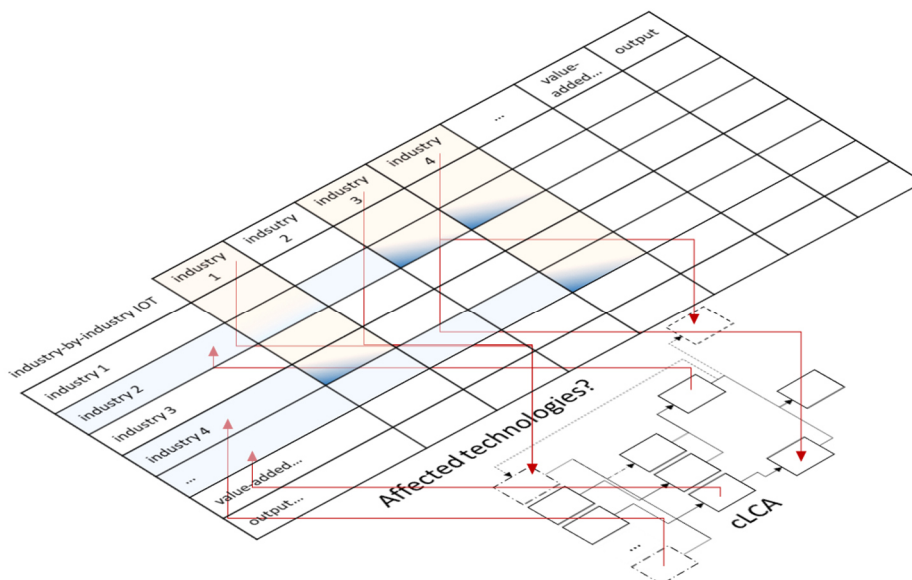


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Bestimmung signifikanter Produkte bzw. industrieller Sektoren zur Ergänzung der Ökobilanz durch Structural Path Analysis einer Aufkommens/Verwendung Tabelle

Im Rahmen der Analysen wurden mittels der Structural Path Analysis auf Basis von IOT und SUT die Auswirkungen einer Systemänderung in Form erhöhter Recyclingmengen an Kunststoffen (z.B. als

Folge regulatorischer Quotenvorgaben) auf die jeweiligen Sektoren ermittelt. Es erfolgte die Identifizierung der Wirtschaftssektoren, in denen Kunststoff-Rezyklate zum Einsatz kommen können. Die Ergebnisse zeigen, dass Anpassungen in 57 von 63 Wirtschaftsbereichen (in der Verwendungstabelle) aufgrund einer potentiellen Veränderung im Rezyklat-Aufkommen erwartet werden könnten, d.h. in 57 Sektoren der deutschen Wirtschaft werden in gewissem Umfang Kunststoffe verwendet und ggf. Rezyklate eingesetzt. Tabelle 1 stellt die vorläufigen Ergebnisse der SPA gemäß der aktuellsten deutschen Input-Output Rechnung für die Gütergruppe „Kunststoffwaren“ dar. Mehr als 90% des gesamten monetären Wertes (Anschaffungs- oder Herstellungspreise) der Kunststoffwaren wird durch die 15 anteilsstärksten der 57 betroffenen Wirtschaftsbereiche bzw. Gütergruppen abgedeckt, d.h. 25 % der aktiven Wirtschaftsbereiche leisten 90% der Wertschöpfung. Hierbei sind die Wirtschaftsbereiche und Gütergruppen „Baugewerbe“, „Kraftwagen...“, „Maschinenbau“, „Nahrungsmittel...“, „elektrische Ausrüstungen“, „Einzelhandel“ und „chemische Erzeugnisse“ besonders relevant. Diese Gütergruppen bilden den Ausgangspunkt für die weitere Aufschlüsselungen und Umsetzungen in physikalische Flüsse. Das so erworbene Wissen hilft dabei, die Bedingungen des Einsatzes von Rezyklaten besser zu verstehen und die ökologischen Wirkungen im Rahmen einer consequential LCA abzuschätzen.

Tabelle 1: SPA der Anteile der Kunststoffwaren (als Gütergruppe) in Verwendungen anhand Verwendungstabelle und I/O Tabelle (Quelle: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen Fachserie 18, Reihe 2)

Verwendungstabelle (basiert auf Anschaffungspreise)		I/O Tabelle (basiert auf Herstellungspreise)	
Wirtschaftsbereich	Anteil	Gütergruppen	Anteil
Baugewerbe	23,7%	Kraftwagen und Kraftwagenteile	23,0%
H.v. Kraftwagen und Kraftwagenteilen	19,1%	Gummi- und Kunststoffwaren	19,3%
H.v. Gummi- und Kunststoffwaren	14,1%	Vorb. Baustellen-, Bauinstallations- und sonstige Ausbaurbeiten	15,2%
Maschinenbau	8,1%	Maschinen	9,6%
H.v. Nahrungsmitteln u. Getränken, Tabakverarb.	5,1%	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse	3,2%
H.v. elektrischen Ausrüstungen	3,2%	Elektrische Ausrüstungen	3,0%
Einzelhandel (oh. Handel mit Kfz)	3,0%	Handelsleistungen mit Kfz, Instandhaltung und Reparatur an Kfz	2,6%
H.v. chemischen Erzeugnissen	3,0%	Chemische Erzeugnisse	2,6%
H.v. Möbeln u. sonstigen Waren	2,2%	Hochbaurbeiten	2,2%
H.v. Papier, Pappe und Waren daraus	1,9%	Einzelhandelsleistungen (ohne Handelsleistungen mit Kfz)	1,9%
H.v. Metallerzeugnissen	1,7%	Tiefbaurbeiten	1,7%
H.v. DV-Geräten, elektron. u. optischen Erzeugnissen	1,6%	Möbel und Waren a.n.g.	1,7%
Großhandel (oh. Handel mit Kfz)	1,4%	Reparatur, Instandh. u. Installation v. Maschinen u. Ausrüstungen	1,5%
Kfz-Handel; Instandhaltung u. Rep. v. Kfz	1,4%	DV-geräte, elektron. u. optische Erzeugnisse	1,4%
H.v. pharmazeutischen Erzeugnissen	1,2%	Metallerzeugnisse	1,2%

3.3 Analyse der Auswirkungen potenzieller Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette

In den quantitativen Analysen wurde Ansatzpunkte für Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz und der Reduktion von Emissionen in den Wertschöpfungsketten von Kunststoffverpackungen identifiziert. Die Maßnahmen setzen zum einen am Anfang der Wertschöpfungskette, durch die

Optimierung des Produktdesigns an (3.3.1). Zudem werden Ansatzpunkte aus einer Nachfrageanalyse ermittelt (3.3.2). Das Potenzial am Ende der Nutzung durch die Optimierung der Verwertungspfade wird in Abschnitt 3.3.3 näher erläutert. Darüber hinaus besteht mit dem Instrument des CCU die Möglichkeit, weitere Reduktionspotenziale zu erschließen (3.3.4).

3.3.1 Optimierung des Produktdesigns

Als Grundlage optimierender Maßnahmen wurde zunächst eine Übersicht zu **generellen Kriterien für zirkuläre Produkte** in Form eines Kriterienkatalogs erstellt. Übergeordnete Schlagworte sind hierfür: Robustheit, Upgradefähigkeit, Reparierbarkeit, Modularität, Zerlegbarkeit, Wiederaufarbeitbarkeit, Recyclingfähigkeit. Insbesondere wurde dabei auf folgende Einflussfaktoren Bezug genommen: Material, Produktstruktur/-architektur, Verbindungstechnik.

Diese Kriterien wurden auf das Beispiel eines vermeintlich wenig komplexen Produktes, einen Wasserkocher, angewendet. Bereits bei diesem einfachen Beispiel zeigten sich zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten im Hinblick auf die ermittelten Kriterien.

In einem weiteren Schritt wurden die Kriterien für das spezifische Gut „Verpackungen“ weiter spezifiziert, hier insb. in Hinblick auf Ressourcenschonung, Materialbeschaffung, Transport / Logistik, umweltverträgliche Nutzung, Recyclingfähigkeit. Auf dieser Basis wurden Designszenarien für Verpackungen für Milchprodukte entwickelt in Bezug auf Variation von Werkstoffen und Verpackungsgrößen und die Optionen Pfandsystem und Unverpacktladen.



Darüber hinaus wurde zusammen mit der Folkwang Universität der Künste ein (digitaler) Design-Workshop zum Thema Lebensmittellogistik für viskose Lebensmittel am konkreten Fallbeispiel Joghurt durchgeführt (halbtägiger Kompaktworkshop). Ziel war es, Ideen zu generieren sowohl für ressourceneffiziente Logistik als auch Verpackungssysteme. Es wurden sechs Designkonzepte mit dem folgenden Namen erstellt: "Rohrpost-Vertriebskollektiv-Hub", "Quartiersküche", "Yogomat", „Suffizienz für mehr Geschmack und Essensfreude – Verzicht als Erlebnis“, "Astronauten-Joghurt", "Essbare Verpackung". Drei wurde weiter im Detail ausgearbeitet. Die Konzepte berücksichtigen unter anderem nötige Technologien, Zeit und Ort der Warenübergabe oder Kostenstrukturen. Die Konzepte befinden sich derzeit noch in der Auswertung und werden im Forschungsintervall 2 strukturiert vorgestellt, um Impulse für Geschäftsmodelle zu liefern. Ein Eindruck über die kreative Workshoparbeit kann den Bildern (Abbildung 9) entnommen werden.

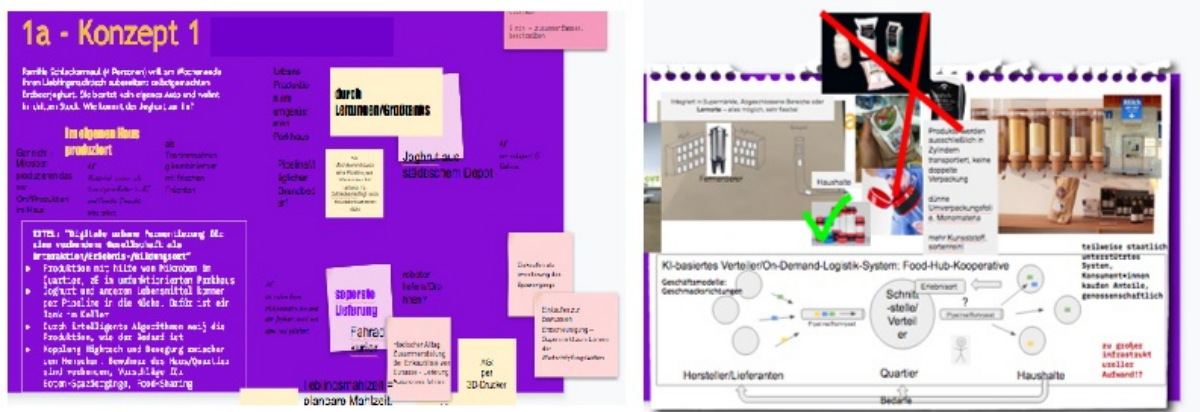


Abbildung 9: Eindrücke des digitalen Design-Workshops zu Lebensmittellogistik und Verpackungssystemen

Um die produktspezifischen Kriterien und Workshopideen in Forschungsintervall 2 in Impulse für Geschäftsmodelle zu überführen, wurden Ansätze bzw. Kriterien für zirkuläre Produkt-/Dienstleistungssysteme (PDS) recherchiert. Im Gegensatz zu linearen Geschäftsmodellen zielen zirkuläre Geschäftsmodelle darauf ab, Ressourcenkreisläufe zu verlangsamen und zu schließen und dabei immanente Werte von Produkten auf höchstmöglichen Nutzenniveau zu erhalten. Zirkuläre bzw. nachhaltige PDS lösen sich von bestehenden Produktkonzepten und zielen auf Bedarfe, Bedürfnisse oder die zu erfüllende Funktion ab. Nach Bocken et al. 2014 können Ansatzpunkte in folgende Gruppen und Strategien unterschieden werden: (i) Technologie: Material- und Energieeffizienz steigern (z.B. lean oder additive manufacturing), Werte aus Abfall generieren (z.B. Rücknahmesysteme), Substitution durch erneuerbare Ressourcen (z.B. green chemistry), (ii) Soziales: Funktionalität statt Besitz (z.B. Verleih, leasing, sharing, etc.), (Verantwortung (z.B. Fair Trade), Suffizienz fördern (z.B. Demand Management) und (iii) Organisation: Neugestaltung des Zwecks (z.B. Social Enterprise), skalierbare Lösungen (z.B. offene Innovationsplattformen, Franchising).

Insbesondere zu folgenden Schlagworten wurden bereits einige Anforderungen an Produkte und erste Ansatzpunkte zur Entwicklung von Geschäftsmodelle zusammengetragen, die in Forschungsintervall weiter ausgestaltet werden (siehe Abbildung 10): Product Attachment, repair, recall, midlife upgrade, maintenance, product pooling / sharing. Die recherchierten Beispiele und Ansatzpunkte sind derzeit noch nicht in den Kontext von Kunststoffen bzw. Verpackungen gesetzt. Diese Kontextualisierung erfolgt in Forschungsintervall 2.

<p>Arten von Nutzungsdauer- verlängerung: Produktebene</p>	<p>Kriterien an Produkte Eigene + Bakker et al. 2014, Arcos et al. 2018, Khan et al. 2018, Bovea et al. 2018, Cole et al. 2017</p>
<p>Products attachement</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Vor Erstgebraucht: Nutzer übernimmt Assembly → Befähigung für Reparatur, Produktbindung • Material das Gebrauchsspuren zulässt → Used Look=individuell • qualitativ hochwertige Komponenten = hochpreisig → Wertgewinn
<p>Repair</p>	<ul style="list-style-type: none"> • dauerhaftes Users Manual, Tutorials, Servicehotline KI → Feedbackdaten • Ersatzteile bereitstellen (Fairphone) / Reparaturdienstleister (Apple) → Logistik → Verpackungen zum Wiederverwenden • standardisierte Bauteile → große Masse → dauerhafte Verfügbarkeit • kompatibel für 3D-Druck: Ersatzteile selbst drucken → Infrastruktur • Use assembly methods that allow disassembly without damage to (reusable) components with a different life duration • Verschleißteile sichtbar/leicht erreichbar machen • Rückmeldung/Belohnung nach Reparatur = Erfolgserlebnis → Motivation
<p>Product reuse/redistribute</p>	<ul style="list-style-type: none"> • für informellen Sektor: online Plattform (eBay, Kleiderkreisel..) • Sichere Transportmöglichkeiten: Verpackung, Produkt: ‚Design for Transportation‘ • generic standard/quality label for reused items (Sicherheit, Funktion..) • Use modular components, part standardization, Testmöglichkeiten • Allow for easy testing of components: System das sagt wo der Fehler ist • Use components with a similar life span: nicht ständig auswechseln • Use materials that overcome cleaning processes • Design to avoid dirt from accumulating • ‚Lohnt‘ sich für qualitativ hochwertige Produkte, Wert nach 1.Nutzen noch hoch • zentrale Sammelstellen/Netzwerke zwischen OEM und Verwertern
<p>Recall</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reverse logistic: Steck-/stapelbare Produkte, sicherer Transport, reduziertes Produktvolumen • keine Ausbuchtungen außerhalb des regulären Produktvolumens • Product can easily be returned → Infrastruktur, PSS.. • Nachverfolgen der Produkte → Online Registrierung gut gestalten
<p>Midlife upgrade</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Structure to facilitate ease of upgrade of product • Leichte Zugänglichkeit zu Testpunkten • Hardware: vorausschauend, modular bauen → zukünftigen Fortschritt/Trend/Plan berücksichtigen • Neues Geschäftsmodell: manufacturer → provider, neue Vertragsbedingungen: B2U/B2B. Infrastruktur → lokale Produktion(?) • Software: automatisch, unkompliziert, immer auf dem neuesten Stand
<p>Maintenance</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reinigungsfreundlichkeit: Werkstoffe, die Säuberungsprozesse überstehen (Temperatur in Spülmaschine..) + Ensure that all parts to be cleaned are easily accessed + Ensure product surfaces are smooth and wear resistant • Reduktion der Werkstoffvielfalt der Produkte • Minimize geometric features that trap contaminants • Ausbuchtungen/Hohlräume reduzieren, die Schmutz sammeln können • Scharfe Kanten vermeiden • Werkstoffe resistent gegen Schmutz und Korrosion • wasserfeste Produktstrukturen/Bauteile • matte, helle Oberflächen wirken langfristiger neuwertig und sauber • (Online) Überwachung von Qualität, Prüfung, Wartung und Abrechnungen • Werkstoffe, die Nutzung ‚speichern‘ (robuster Holztisch, Jeans..) → Wertsteigerung
<p>Product pooling/sharing</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassungsfähigkeit an diverse Nutzer: Individualität durch Software. Flexibilität für gewünschte Leistung/Funktion/Äußeres → Customizing • passendes Geschäftsmodell! • Konnektivität zu Smartphone = Nutzer: App-Error-Report, Verantwortungsübertragung (für Laden von Batterien..Belohnung) • Reinigungsservice → Servicehotline • robuste Bauteile → Neuwertiger Zustand vor Nutzung → Gefühl von Erstbenutzung • Vernetzung, Daten teilen: Infos zu Staus, Wetter, schnellste/gemütlichste Route → ‚Copenhagen Wheel‘, Schwarmverhalten. Infos über Zustand, Message unter Nutzern, Empfehlungen, Erlebtes teilen • Griffe, Kontakte zu Mensch aus antibakteriellen Werkstoffen • Sicherheitsaspekte/Rechtslage beachten (Helmpflicht für Scooter..)

Abbildung 10: Anforderungen an Produkt-/Dienstleistungsmodelle für zirkuläre Geschäftsmodelle

3.3.2 Nachfrageentwicklung

Während Themenfeld 3 tendenziell eine Makroperspektive auf Systeme wie Wirtschaft, Politik, Infrastruktur, oder Technologien zur Szenarienbildung nutzt, wendet Themenfeld 2 verstärkt eine bottom-up-Perspektive an, die auf der Ebene von Konsument*innen und Produkten ansetzt. Diese Perspektive aus Themenfeld 2 kann die Perspektive aus Themenfeld 3 ergänzend informieren und dient des Weiteren dazu, konkrete Ansatzpunkte für die Etablierung nachhaltiger Produkt-Service-Systeme zu identifizieren.

Dies kann z.B. durch Aufzeigen von Hot-Spots in relevanten Konsumbereichen gelingen. Beispielsweise zeigt nachstehende Ergebniszusammenfassung, dass deutsche Haushalte vergleichsweise viel Geld für Lebensmittel und unter anderem Molkereiprodukte ausgeben, die einen hohen Bedarf an Verpackungen und schließlich Kunststoffen nach sich ziehen. Dies war einer der Gründe dafür, dass der Designworkshop (siehe Abschnitt 3.3.1) zum Thema Lebensmittellogistik und Verpackungssysteme durchgeführt wurde.

Um mittels eines bottom-up Ansatzes Trends in relevanten Konsumbereichen aufzuzeigen, wurden auf Basis der deutschlandweite erhobenen Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) die Ausgaben von Haushalten in Deutschland und NRW nach 13 Ausgabekategorien sowie die Ausstattung deutschen Haushalten mit Gebrauchsgütern untersucht. Da die EVS für 2018 noch nicht veröffentlicht wurde, bezieht sich die Analyse vorerst auf die Jahre 2003 und 2013.

Die Auswertung (siehe Abbildung 11) zeigt:

- Deutschlandweit gab es keine gravierenden Veränderungen in der Ausgabenstruktur der Haushalte zwischen 2003 und 2013
- In fast allen Konsumkategorien zeigen sich fast identische Trends zwischen NRW und dem Rest Deutschlands
- Der Stadt-Land-Vergleich sowie der Vergleich zwischen verschiedenen Einkommenskategorien zeigen nur marginale Unterschiede hinsichtlich der Konsumtrends in den untersuchten Ausgabekategorien
- Aufgrund des national weitgehend homogenen Waren- und Serviceangebotes erscheint die Homogenität der Ergebnisse nicht zu überraschen.

Lebensmittel, Verkehr bzw. Mobilität und Freizeit, Unterhaltung, Kultur, machen zusammen sowohl 2003 als auch 2013 etwa ein Drittel der Konsumausgaben der Haushalte aus

- zwischen Haushalten mit unterschiedlichem Einkommensniveau scheint es bzgl. der Ausgabenstruktur keine signifikanten Unterschiede zu geben, allerdings weisen zahlreiche Ausreißer in den Daten auf eine gewisse Heterogenität hin, die ggf. nicht rein auf Basis des Einkommens analysiert werden kann
- Lebensmittelausgaben der Haushalte sind größtenteils auf rohes und verarbeitetes Fleisch, Molkereiprodukte, Getränke und Süßigkeiten zurückzuführen, vergleichsweise wenig Geld wird für Gemüse, Obst, Fertiggerichte, Lieferdienste oder Fisch ausgegeben
- Die Ausstattungsgrade der Haushalte mit Gebrauchsgütern sind bei gleichzeitiger Zunahme der Anzahl der Haushalte tendenziell gestiegen. Es kann von einer leichten Zunahme des Gebrauchsgüterbestandes in Deutschland ausgegangen werden.

- Es ist eindeutig ein Digitalisierungstrend zu erkennen. Die Ausstattung mit digitalen Geräten für Arbeit und Freizeit hat deutlich zugenommen.

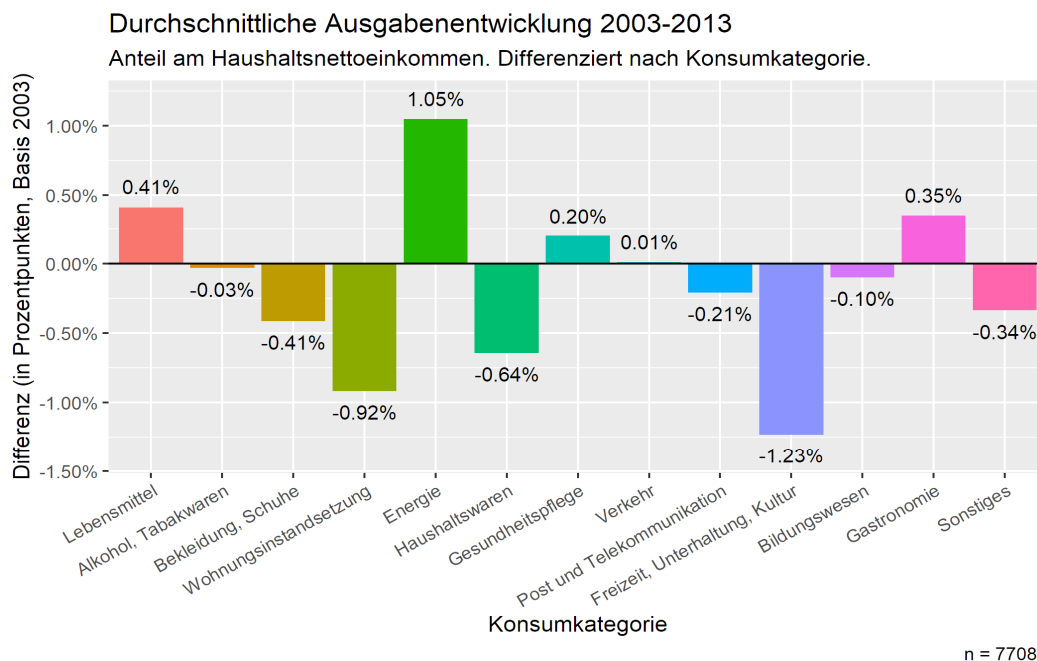


Abbildung 11: Auswertung der Ausgaben von Haushalten in Deutschland nach 13 Ausgabekategorien

Die oben durchgeführten Analysen weisen auf einen zunehmenden negativen ökologischen Effekt des Konsums in Deutschland hin bzw. zumindest nicht auf einen abnehmenden Effekt. Die Auswertung lässt keine direkte Bewertung aus ökologischer Perspektive zu, da sie vornehmlich Ausgabestrukturen aufzeigt. Da jedoch viele neue digitale Produkte in das Haushaltsinventar aufgenommen wurden, die im Vergleich zu den analogen Varianten meist ressourcenintensiver sind (z.B. wegen des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase oder des erhöhten Bedarfs an seltenen Metallen), scheint jedoch zumindest keine abnehmende Tendenz hinsichtlich negativer ökologischer Wirkungen erwartbar. Die aktuelle Konsumstruktur in Deutschland scheint das Erreichen einer 8-Tonnen-Gesellschaft, d.h. einer Gesellschaft die im Durchschnitt pro Person einen Material-Footprint von 8t erreicht, noch nicht zu unterstützen.

3.3.3 Optimierung der Verwertungswege (änderungsorientierte Ökobilanz)

Um die technologische Entwicklung der Sortierung und des Recyclings von Kunststoffen hinsichtlich ihrer umweltbezogenen Auswirkungen zu bewerten, wurde der methodische Ansatz der consequential LCA (cLCA) gewählt. Dieser Ansatz zur Ökobilanzierung ermöglicht die Analyse von potenziellen Veränderungen relevanter Stoffstromflüsse aufgrund technologischer bzw. systematischer Änderungen. Hierfür werden Datensätze marginaler Technologien berücksichtigt⁶.

⁶ Erläuterung marginaler Technologien: Bei der Änderung der Stromnachfrage reagiert das Stromsystem aufgrund bestimmter politischer oder technischer Voraussetzungen ggf. lediglich durch Änderung der Anteile ausgewählter Kraftwerkstypen (marginale Technologien). So ist vor dem Hintergrund der Energiewende zu erwarten, dass der Kraftwerkspark auf eine erhöhte Stromnachfrage mit einem zunehmenden Anteil an Gas-, Wind- und PV-Anlagen reagiert. Entsprechend dieser Erwartung rechnet der Ansatz der consequential LCA (cLCA) für

Zunächst wird mittels einer „attributional“ Ökobilanzierung (aLCA) der Status Quo des Systems bewertet (SQ). Dies entspricht somit einer „Momentaufnahme“ des Systems, erlaubt aber zunächst keine Zukunftsprojektionen. Anschließend wird diese „Momentaufnahme“ des aktuellen Recyclingsystems mit cLCA Ergebnissen kombiniert.

Im Rahmen der Analyse für die Verpackungsabfälle (Gelber Sack) in NRW werden folgende Szenarien zu Grunde gelegt (vgl. Tabelle 5): Das Status-Quo Basisszenario „SQ“ entspricht den aktuell durchschnittlich in NRW aus Sortieranlagen gewonnenen Kunststoffen in Effizienz (Masse/Anteil) und Selektivität (Fraktionen). Das Szenario „BAT“ entspricht dem mit dem fortschrittlichen Verfahren der Firma Meilo erzielbaren höheren Sortiergrad und Selektivität. Im Vergleich dazu wird im Szenario „Pyrolyse“ ein reduzierter Sortieraufwand berücksichtigt, da nur der für einen Einsatz von Fraktionen in der Pyrolyse notwendige Mindestaufwand umgesetzt wird. Das Szenario „Pyrolyse“ weist somit eine im Vergleich zum Szenario „BAT“ (etwas) geringere Effizienz und Selektivität auf, so werden gemischte Polyolefine und Mischkunststoffe nicht getrennt und es resultiert ein geringerer Stromverbrauch der Sortierung. Das Szenario „Max“ stellt als Extremszenario das theoretische, technisch nicht erreichbare Maximum gegenüber. Dieses entspricht der Zusammensetzung des gelben Sackes anhand der aktuellen Marktmengen den Verpackungsmaterialien und bildet somit eine (theoretische) vollständige Selektivität und Effizienz ab. Als funktionelle Einheit wurde das jährliche Aufkommen der Leichtverpackungen (LVP) gewählt (590 kt⁷ in Recyclingsystemen verarbeitete LVP). Das Basisszenario beruht auf folgenden (optimistischen) Annahmen: Erfassung der LVP mittels LKW, Transport zur Sortieranlage über eine Umladestation, Sortierung der gesamten Menge der erfassten LVP in NRW (nur Stromverbrauch berücksichtigt), Verarbeitung zu Ersatzbrennstoffen (EBS) bzw. Recycling zu sekundäre Rohstoffen mit Substitution primärer Rohstoffe (vgl. in Tabelle 5, eckige Klammer).. Der Datensatz des LCA-Modells beruht auf Messdaten, Kalkulationen, Experten-Interviews, weiteren Studien und Daten der Ecoinvent Datenbank Version 3.4.

Tabelle 5 im Anhang zeigt die Massenanteile unterschiedlicher Abfallfraktionen (Produkte) einer Sortieranlage für die Sortiereffizienz und -selektivitäten der verschiedenen Szenarien. Es wird angenommen, dass die gewonnenen Sortierfraktionen im Anschluss zu Rezyklaten verarbeitet werden, welche aus fossilen Quellen hergestellte Primärmaterialien substituieren.

Die THG Emissionen der Szenarien in CO₂-Äquivalenten werden in Abbildung 12 gegenübergestellt. Aufgrund der häufig nur geringen Unterschiede wurden die BAT- und Pyrolyseszenarien bei mengen-gleichen Abfallfraktionen in der Darstellung zusammengeführt. Die hellblauen Balken stellen die THG-Emissionen bezüglich der funktionellen Einheit (590 kt LVP) dar. Die grünen Balken informieren über den möglichen Gutschriften durch Substitution der primären Rohstoffe. Die gesamte Menge der THG-Emissionen in SQ wurde mit ca. 94 kt CO₂-Äquivalenten berechnet, durch die Umsetzung der Szenarien "BAT", "Pyrolyse" und "max" inkl. Gutschriften können Verringerungen von 160 kt, 73 kt bzw. 305 kt CO₂-Äq. erzielt werden. Insgesamt zeigen die Analysen, dass sich eine verstärkte Rückgewinnung von Altkunststoffen nur dann lohnt, wenn auch die Sekundärmaterialien zu einem beträchtlichen Anteil eingesetzt werden können und entsprechende Gutschriften angerechnet werden. In diesem Fall ist das mechanische Recycling vorteilhafter als das thermo-chemische Verfahren, da mit ersterem insgesamt 67 kt CO₂ eingespart werden können (d.h. im Szenario „BAT“ überwiegen die Gutschriften die

diesen erhöhtem Strombedarf „nur“ mit dem aus diesen marginalen Technologien resultierenden marginalen Strommix.

⁷ kt = Kilotonne = 1000 Tonne

Emissionen aus dem Recycling), während aufgrund des hohen Energiebedarfs die reduzierten Emissionen im Szenario Pyrolyse auf 20 kt CO₂-Äquivalent sinken. Allerdings hängt das THG-Potenzial des thermo-chemischen Recyclings stark von der Wärmebereitstellung und den Emissionen der Erdgasproduktion (Brennstoff) ab. Auch sind die höheren Qualitäten der resultierenden Sekundärmaterialien sowie der noch geringe Technology Readiness Level (TRL) der Technologie und somit potenzielle Verbesserungen über die Zeit zu berücksichtigen.

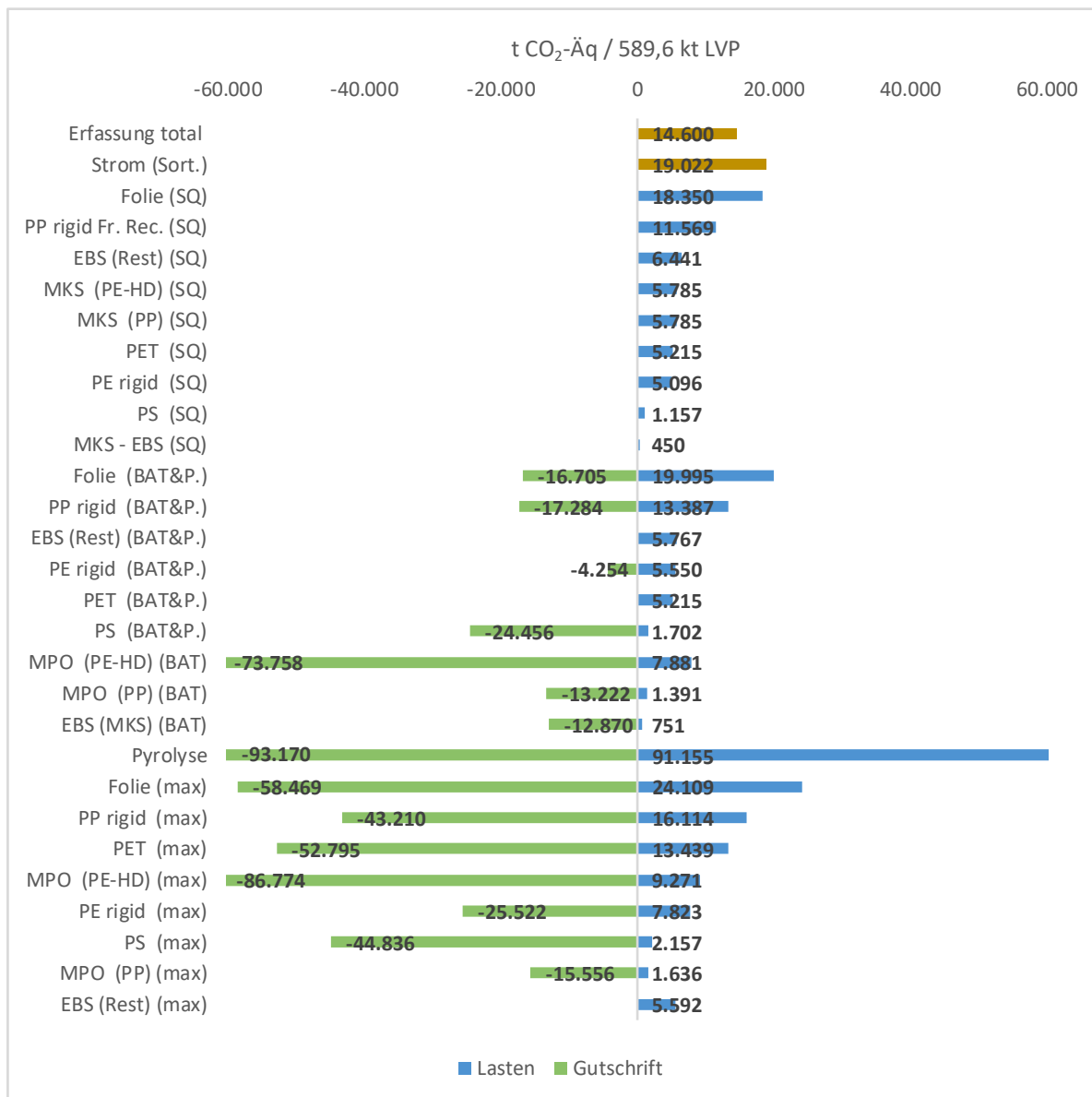


Abbildung 12: Vereinfachte Abbildung des THG Potenzials des Recyclings von Sortierung bis Produktion sekundärer Kunststoffe bzw. bis zur Pyrolyse in den modellierten Szenarien (Sort. – Sortierung, SQ – Status-quo, BAT&P. – Werte zu Szenarian BAT und Pyrolyse, BAT – Werte nur zur Szenario BAT, max – Werte zur Szenario max)

3.3.4 Einsatz von CCU-Technologien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalens Chemie- und Kunststoffindustrie

Potential zur Reduktion von Treibhausgasen mittels CCU

Alternativ zur konventionellen Produktion von Chemikalien auf Basis von fossilen Ressourcen, können die gleichen Chemikalien mittels CCU basierend auf CO_2 und H_2 produziert werden. Ziel der nachfolgenden Analyse ist es, das Reduktionspotential für Treibhausgasemissionen durch die Verwendung von CCU zu quantifizieren. Das Potential wird basierend auf einer ökologischen Optimierung für Nordrhein-Westfalens Chemie- und Kunststoffindustrie berechnet und wird in Abhängigkeit der Emissionen für die Bereitstellung der Ausgangsstoffe CO_2 und H_2 dargestellt.

Für die Bereitstellung von CO_2 definiert das Verdichten von CO_2 aus industriellen Punktquellen die untere Grenze für anfallende Emissionen und Direct Air Capture die obere Grenze. Für die Bereitstellung des H_2 wird angenommen, dass H_2 mittels des Elektrolyseverfahrens hergestellt wird, dessen indirekte Emissionen durch die Bereitstellung des verwendeten Stroms bestimmt werden. Somit werden durch eine Minderung der spezifischen Emissionen pro Kilowattstunde Elektrizität auch die Emissionen zur Bereitstellung des H_2 reduziert.

Dementsprechend zeigt die Abbildung 13 a) die Treibhausgasemissionen der Chemieindustrie aufgetragen über den spezifischen Emissionen des Stromsektors. Für die fossil-basierte Produktion der Chemikalien (in schwarz) ist auf Grund des geringen Strombedarfes eine nur geringe Abhängigkeit der Treibhausgasemissionen gegenüber den spezifischen Emissionen des Stromsektors zu erkennen. Zudem sind die Treibhausgasemissionen der fossil-basierten Chemieindustrie unabhängig gegenüber der Bereitstellung von CO_2 , da in der fossilen Produktion für den gewählten Betrachtungsrahmen kein CO_2 verwendet wird.

Die blauen Linien repräsentieren das optimale Produktionssystem der Chemieindustrie mit minimalen Treibhausgasemissionen, wobei sowohl fossil-basierte als auch CCU-basierte Technologien im Produktionssystem enthalten sein können. Für spezifische Emissionen des Stromsektors zwischen 600 und ca. 200 g/kWh gleichen die Treibhausgasemissionen des optimalen Produktionssystems denen der fossil-basierten Produktion. Das optimale System besteht somit ausschließlich aus fossil-basierten Technologien und es existiert kein Reduktionspotential durch den Einsatz von CCU.

Unterhalb von ca. 200 g/kWh erzielt der Einsatz von CCU im optimalen Produktionssystem eine Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur konventionellen Produktion. Zudem führt der Einsatz von CCU zu einer Differenz der Reduktionspotentiale je nach CO_2 -Quelle. Der Energieaufwand zur Bereitstellung des CO_2 bestimmt gemeinsam mit der verwendeten Menge an CO_2 die Differenz der Reduktionspotentiale. Durch den geringeren Energieaufwand für CO_2 aus industriellen Punktquellen sinken die Emissionen gegenüber dem Direct Air Capture Verfahren.

Bei sinkenden spezifischen Emissionen des Stromsektors erzielen zunehmend mehr CCU-basierte Technologien Reduktionen gegenüber den fossil-basierten Technologien, wodurch der Bedarf an Elektrizität für die H_2 -Bereitstellung ansteigt. Durch die steigende Verwendung von Elektrizität führen Reduktionen der spezifischen Emissionen des Stromsektors zu zunehmend stärker sinkenden Emissionen für das optimale Produktionssystem, sodass die Kurve der Treibhausgasemissionen mit sinkenden spezifischen Emissionen des Stromsektors zunehmend steiler abfällt.

Das maximale Reduktionspotential beträgt 50 Megatonnen an CO_2 -Equivalenten bei spezifischen Emissionen von 0 g/kWh. Jedoch ist ein Erreichen der spezifischen Emissionen des Stromsektors von

0 g/kWh selbst bei vollständiger Verwendung erneuerbarer Energieträger nicht als realistisch einzustufen. Für eine weiterführende Betrachtung des Reduktionspotentials ist daher zusätzlich eine gekoppelte Betrachtung des Stromsektors im Zusammenspiel mit der Chemieindustrie anzustreben.

Nichts desto trotz existiert für spezifischen Emissionen des Stromsektors unterhalb von 100 g/kWh ein deutliches Reduktionspotential durch die Verwendung von CCU-Technologien. Da das Reduktionspotential nur bei ausreichend niedrigen Emissionen des Stromsektors gewährleistet werden kann, thematisiert der folgende Abschnitt den Einfluss der Verfügbarkeit an erneuerbarer Elektrizität auf das Reduktionspotential der Treibhausgasemissionen.

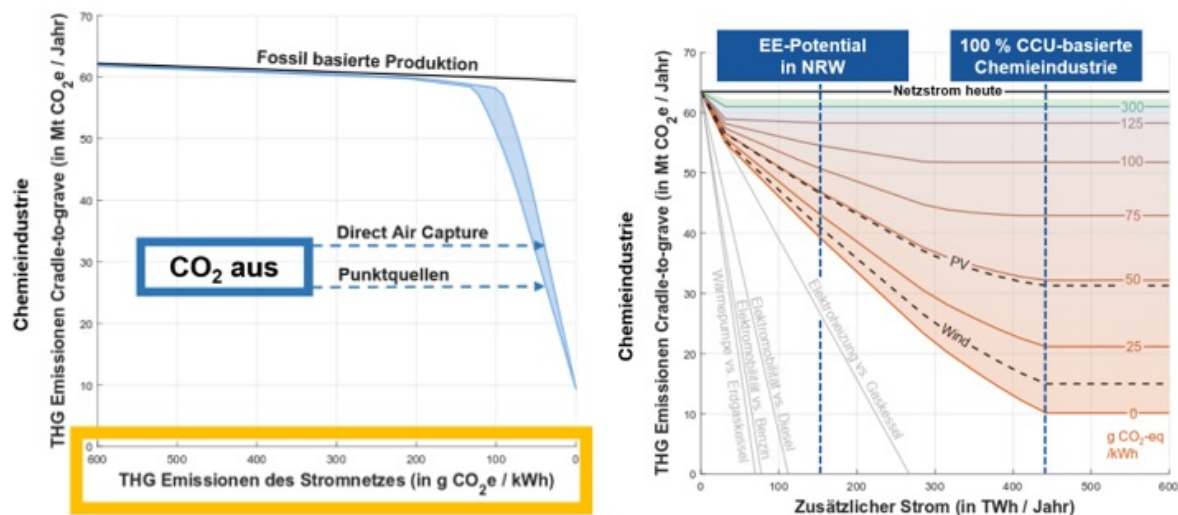


Abbildung 13: Treibhausgasemission der Chemieindustrie über den gesamten Lebenszyklus⁸ [a] links/ b) rechts]

Bedarf an erneuerbaren Energien zur erfolgreichen Minderung von Treibhausgasen mittels CCU

Abbildung 13 b) zeigt das Reduktionspotential für Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit der zusätzlich für die Chemieindustrie verfügbaren Menge an Elektrizität für verschiedene Linien an spezifischen Emissionen des Stromsektors in g/kWh.

Für konstante spezifische Emissionen des Stromsektors sinken die Treibhausgasemissionen der Chemieindustrie nichtlinear mit steigender Menge an verfügbarer Elektrizität. Der nichtlineare Verlauf der Treibhausgasemissionen resultiert aus den unterschiedlichen Wirkungsgraden der CCU-Technologien bei der Verwendung von Elektrizität zur Verminderung von Treibhausgasen.

Zusätzliche Elektrizität wird zunächst für die Technologie verwendet, die am effizientesten Treibhausgasemissionen vermeidet, bis die Nachfrage der produzierten Chemikalie vollständig durch die CCU-Technologie gedeckt wird. Danach wird die zusätzliche Elektrizität für die nächsteffiziente Technologie verwendet. Infolgedessen sinkt die Reduktion an Treibhausgasen je Kilowattstunde Elektrizität bis keine zusätzlichen Reduktionen an Treibhausgasemissionen erzielt werden können. Für Emissionen

⁸ a) Treibhausgasemission der Chemieindustrie über den gesamten Lebenszyklus (cradle to grave) für die gesamte Jahresproduktion der betrachteten Chemikalien und Kunststoffe in Nordrhein-Westfalen; b) Treibhausgasemission der Chemieindustrie über den gesamten Lebenszyklus (cradle to grave) für die gesamte Jahresproduktion der betrachteten Chemikalien und Kunststoffe in Nordrhein-Westfalen in Abhängigkeit der verfügbaren Menge an Elektrizität zur Verwendung in CCU-Technologien für unterschiedliche spezifische Emissionen des Stromsektors, Elektrizitätsbedarf für eine vollständige Verwendung von CCU-Technologien und Potential für zukünftig verfügbare erneuerbare Energie in Nordrhein-Westfalen sowie Technologiealternativen zur Minderung von Treibhausgasemissionen durch Elektrifizierung abseits der Produktion von Chemikalien und Kunststoffen.

des Stromsektor von <50 g/kWh werden auf diese Weise alle CCU-Technologien implementiert. Für höhere spezifische Emissionen des Stromsektors können nicht alle CCU-Technologien eine Reduktion erzielen, sodass nur eine Teilmenge implementiert wird. Der Bedarf an Elektrizität zur vollständigen Implementierung der CCU-Technologien in Nordrhein-Westfalen beträgt 440 TWh/a. Das Potential zum Ausbau für erneuerbare Energien in Nordrhein-Westfalen wird hingegen auf 150 TWh/a geschätzt. Somit sollten vor allem zuerst die effizientesten CCU-Technologien zur Reduktion von Treibhausgasen eingesetzt werden.

Neben CCU-Technologien bieten andere Technologien ebenfalls die Möglichkeit durch den Einsatz von erneuerbarer Elektrizität Treibhausgasemissionen zu reduzieren. In Abbildung 13 b) sind vier Beispiele für Elektrifizierungsoptionen abseits von CCU gezeigt. Die gezeigte Elektrifizierungsoptionen können bei gleicher Menge an Elektrizität mehr Emissionen vermeiden. Daher sollten bei begrenzter Verfügbarkeit an Elektrizität zunächst die effizientesten Elektrifizierungsoptionen umgesetzt werden, um möglichst hohe Reduktionen zu erzielen. Jedoch bietet die Implementierung von CCU-Technologien die Möglichkeit CO₂ aus schwer vermeidbaren industriellen Punktquellen zu verwenden und wertschöpfend in chemischen Produkten zu binden. Die Interaktion emissionsintensiver Industrien mit der Chemieindustrie kann somit ökologische Potentiale erschließen und gegebenenfalls ökonomische Synergien erschaffen. Für die ökologische Bewertung weiterer Elektrifizierungstechnologien wird auf Sternberg et al. verwiesen [Sternberg et al. 2015, Energy and Environmental Science, Power to What? Environmental assessment of energy storage systems].

Das bestehende LCA-Modell soll im Forschungsintervall 2 um zusätzliche Prozesse der Chemieindustrie und weitere Grundstoffindustrien erweitert werden. Auf Basis dieses erweiterten Modells können im Projektverlauf beispielsweise Maßnahmen zur Reduktion von Umweltauswirkungen durch die Verwendung von erneuerbarem Strom und Wärme, CCU Technologien, Biomasse, mechanischem und chemischem Kunststoffrecycling, Mineralisierung oder Wasserstoff zur Eisenerzreduktion ganzheitlich bewertet werden.

3.4 Ergebnissynthese und Ausblick

Im folgenden Abschnitt soll ein kurzer Ausblick auf die angestrebten Arbeiten im zweiten Forschungsintervall skizziert werden.

Grundsätzlich baut das Vorhaben auf den Erkenntnissen des ersten Forschungsintervalls auf, wo vor allem die methodischen Grundlagen für die Analyse von Kunststoffen geschaffen wurden. Im zweiten Forschungsintervall werden daher die bereits identifizierten nachfrageseitigen Minderungsmaßnahmen für dieses Güterbündel näher untersucht und deren Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen sowie Energie- und Ressourcenbedarf analysiert. Beispiele hierfür sind eine erhöhte Zirkularität, die Rolle der Digitalisierung oder ein nachhaltiges Produktdesign. Thematisch neu hinzu kommt im zweiten Forschungsintervall das Bedürfnisfeld Bauen/Wohnen. Analog zur Vorgehensweise bei den Kunststoffen sind auch hier zunächst Stoffstromanalysen geplant, welche sukzessive durch die Identifikation und Bewertung von Minderungsmaßnahmen ergänzt werden. Diese Handlungsoptionen können stofflicher Natur (z.B. alternative Baumaterialien) sein, veränderten Nutzungskonzepten zugrunde liegen (z.B. modulare Bauweise) oder durch Recyclingmaßnahmen im Rückbau bestimmt sein (z.B. Design for Recycling). Abbildung 14 gibt einen Überblick zur Strukturierung des Vorhabens.

Übergeordnete Forschungsfragen
 Welche Potenziale bestehen durch Minderungsmaßnahmen im Lebenszyklus vom Produktdesign über die Produktion und Nutzung bis hin zur hochwertigen Kreislaufführung? Wie können diese Maßnahmen umgesetzt werden und wie wirken sich diese Maßnahmen auf die Wertschöpfungsketten der Grundstoffe und die Grundstoffströme aus?

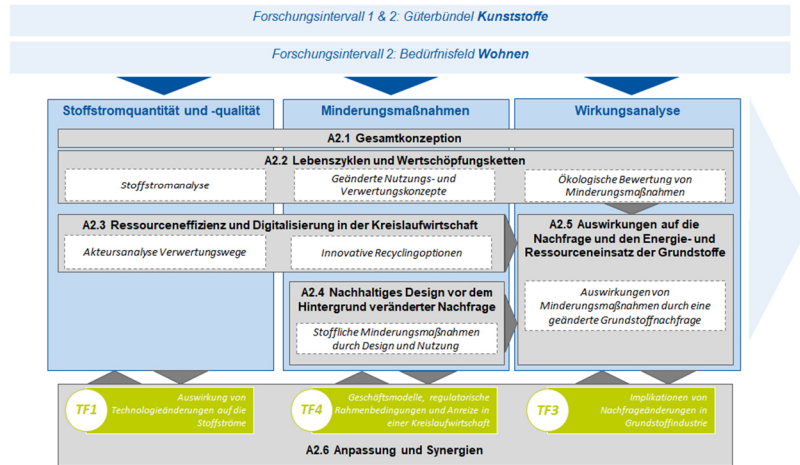


Abbildung 14: Überblick zur Strukturierung des Vorhabens im 2. Forschungsintervall

4 Ergebnisse Szenarien und Transformationspfade

4.1 Forschungsfragen des 1. Forschungsintervalls

Im ersten Forschungsintervall standen die folgenden Forschungsfragen im Mittelpunkt der Arbeiten von Themenfeld 3 „Szenarien und Transformationspfade“:

- Welche Strategien und Szenarien werden aktuell in Wissenschaft und Wirtschaft diskutiert, um eine weitgehend THG-freie Industrieproduktion bis Mitte des Jahrhunderts realisieren zu können?
- Welche unterschiedlichen globalen sozio-demografischen, ökonomischen und klimapolitischen Entwicklungen sind bis Mitte des Jahrhunderts denkbar?
- Welche Transformationspfade der NRW-Industrie und speziell der zentralen Grundstoffindustrien in Richtung Klimaneutralität sind bis Mitte des Jahrhunderts denkbar und wie werden diese Pfade eingebettet sein in die Transformation des gesamten Energiesystems?

4.2 Ergebnisse der Literaturanalyse zur Industrie-Transformation

Im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche und -analyse wurden in Aktivität A 3.1 über 40 seit 2017 erschienene nationale und internationale Studien identifiziert, die sich entweder ausschließlich oder schwerpunktmäßig mit den Möglichkeiten und Voraussetzungen einer weitgehenden zukünftigen THG-Emissionsreduktion im Industriesektor beschäftigen. Die folgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über einen Teil der identifizierten Studien, die zwischen Anfang 2018 und Ende 2019 erschienen sind und sich ausschließlich um Klimaschutz in der Industrie kümmern. Die rechte Spalte zeigt dabei, welche Industriebranchen eine Studie in den Blick nimmt, während die zweite Spalte von rechts den thematischen Schwerpunkt einer Studie aufführt.

Tabelle 2: Auswahl der identifizierten relevanten nationalen und internationalen Studien zur Möglichkeit sehr weitgehender THG-Emissionsreduktionen im Industriesektor

Herausgeber und Erscheinungsjahr	Titel	Thematischer Schwerpunkt	Abdeckung Industriebranchen
Acatech (2018)	CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie	Rahmenbedingungen	energieintensive Industrie
Agora Energiewende/Wuppertal Institut (2019)	Nachhaltige Industrie - Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement	Rahmenbedingungen	energieintensive Industrie
Climate Strategies (2019)	Building blocks for a climate-neutral European industrial sector	Rahmenbedingungen	gesamte Industrie
E3G (2019)	The Race to Decarbonise Industry – How to Keep the EU in Pole Position	Rahmenbedingungen	energieintensive Industrie
Energy Transitions Commission (2018)	Mission Possible – Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century	Szenarien	energieintensive Industrie
ETH/EPFL (2018)	A sustainable future for the european cement and concrete industry	Szenarien	Zement

Europäische Kommission (2019)	Strengthening Strategic Value Chains for a future-ready EU Industry	Rahmenbedingungen	Gesamte Industrie
HLG on Energy-intensive Industries (2019)	Masterplan for a Competitive Transformation of EU Energy-intensive Industries – Enabling a Climate-neutral, Circular Economy by 2050	Rahmenbedingungen	energieintensive Industrie
IEA (2018)	Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry	Szenarien	Zement
IEA (2019)	Material Efficiency in Clean Energy Transitions	Szenarien	energieintensive Industrie
IEA (2019)	Transforming Industry through CCUS	Szenarien	Gesamte Industrie
Material Economics (2018)	The Circular Economy – A Powerful Force for Climate Mitigation	Szenarien	energieintensive Industrie
Material Economics (2019)	Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry	Szenarien	energieintensive Industrie
McKinsey (2018)	Decarbonization of industrial sectors: The next frontier	Technologien & Prozesse	energieintensive Industrie
VCI/DECHEMA (2019)	Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer THG-neutralen chemischen Industrie in Deutschland	Szenarien	Chemie
VUB/IES (2019)	Metals for a Climate Neutral Europe – A 2050 Blueprint	Technologien & Prozesse	Metalle
Wyns et al. (2019)	Industrial Transformation 2050 – Towards an Industrial Strategy for a Climate Neutral Europe	Rahmenbedingungen	energieintensive Industrie

Einige der Studien beschäftigen sich schwerpunktmäßig mit den (v. a. politischen) Rahmenbedingungen, die für die Realisierung weitgehender Emissionsminderungen als notwendig erachtet werden. Andere Studien erstellen Szenarien, die mit hohem technologischen Detailgrad mögliche Transformationspfade für einzelne Industriebranchen aufzeigen und diskutieren. Schließlich liegen auch Studien vor, die auf eine detaillierte Beschreibung von zentralen Schlüsseltechnologien und -prozessen für eine klimaneutrale Industrie der Zukunft fokussieren. Unter den Herausgebern der Studien befinden sich Forschungsinstitute (z. B. Material Economics und das Wuppertal Institut) staatliche Institutionen (z. B. das BMWi und die Europäische Kommission), Industrieverbände (der VCI), Umweltorganisationen (der WWF) und Expertenkommissionen (z. B. die Energy Transitions Commission).

Die Literaturrecherche verdeutlicht, dass sich in den vergangenen Jahren auf nationaler und internationaler (v. a. europäischer) Ebene die Forschungsaktivitäten zu den Möglichkeiten und Voraussetzungen von weitgehenden THG-Emissionsrückgängen im Industriesektor stark intensiviert haben. Die Transformation des Industriesektors in Richtung Treibhausgasneutralität wird mittlerweile offensichtlich als ein für den nationalen und internationalen Klimaschutz zentrales Thema wahrgenommen, bei dem – sicherlich auch aufgrund der nicht unerheblichen Herausforderungen – ein breiterer und tieferer Wissensstand anzustreben ist.

Rund ein Dutzend der identifizierten Studien wurden im Laufe des ersten Forschungsintervalls in Form einheitlich aufgebauter, dreiseitiger „Studiensteckbriefe“ zusammengefasst. Diese Steckbriefe, zu denen der VDZ zu einer von ihnen erarbeiteten Studie beigetragen hat, wurden mittlerweile auf der Webseite der Initiative IN4climate.NRW veröffentlicht und sind über den folgenden Link verfügbar: <https://www.in4climate.nrw/ergebnisse/sci4climatenrw/szenarien/>

Neben der Identifikation der relevanten aktuellen Literatur zu weitgehendem Klimaschutz im Industriesektor sowie der Zusammenfassung einiger dieser Studien in Form von Steckbriefen wurden in Aktivität A 3.1 auch zwei Szenario-Metaanalysen durchgeführt: Eine dieser Analysen untersucht die Rolle von Wasserstoff in verschiedenen vorliegenden Klimaschutzszenarien für Deutschland (Lechtenbömer et al. 2019). Aus dieser Analyse, die in der Zeitschrift „Energiewirtschaftliche Tagesfragen“ erschienen ist, geht unter anderem die potenziell hohe zukünftige Bedeutung von Wasserstoff insbesondere im Industriesektor hervor.

Die zweite Metaanalyse untersucht die Entwicklungen des Industriesektors in verschiedenen vorliegenden ambitionierten Klimaschutzszenarien für Deutschland, Europa und die Welt. Dafür wurden zunächst – basierend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Literaturrecherche – zehn zentrale Klimaschutzstrategien des Industriesektors in vier übergeordneten Kategorien unterschieden, die in der folgenden Abbildung 15 dargestellt sind.

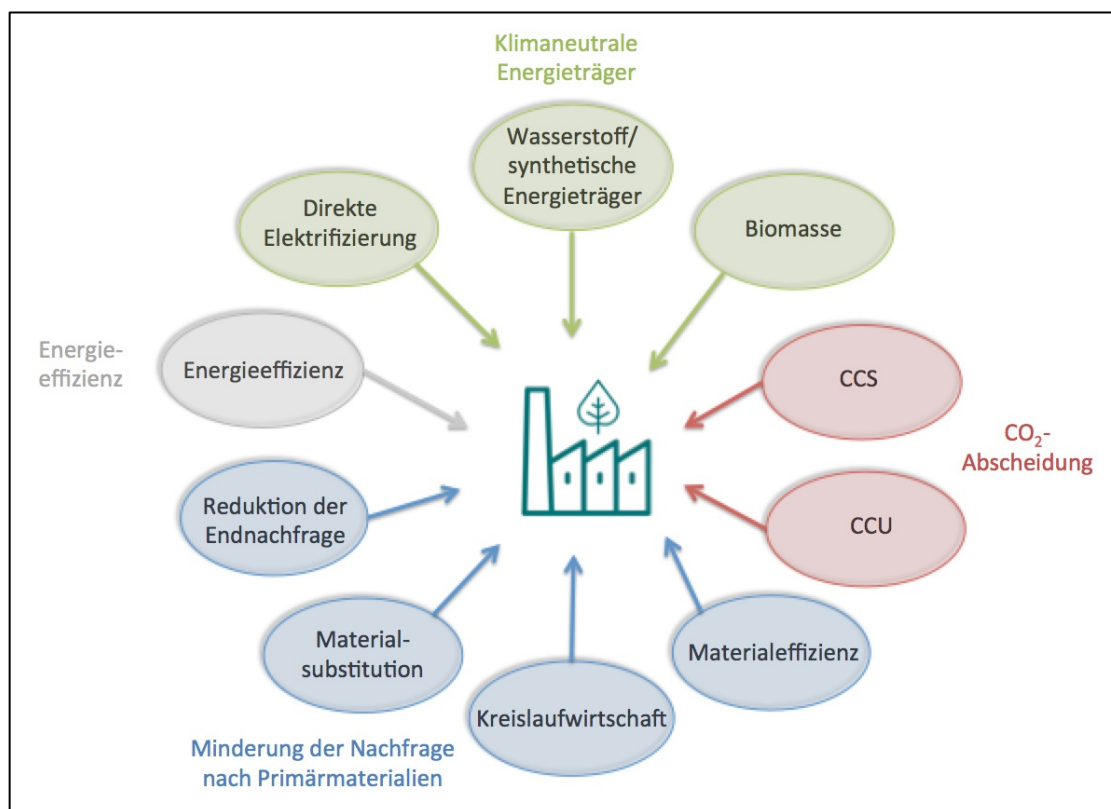


Abbildung 15: Unterscheidung von zehn zentralen Strategien für das Erreichen eines (nahezu) klimaneutralen Industriesektors

Anschließend wurden die in Tabelle 3 dargestellten Klimaschutzszenarien daraufhin untersucht, inwieweit in ihnen für das Erreichen weitgehender CO₂-Minderungen im Industriesektor bis 2050 auf die einzelnen Strategien zurückgegriffen wird.

Tabelle 3: Übersicht über die bei der Metaanalyse von Industrie-Transformations Szenarien berücksichtigten Studien und Szenarien

Institution und Veröffentlichungsjahr	Titel der Studie	Name(n) der in der Metaanalyse berücksichtigten Szenarien	Änderungen der CO ₂ -Emissionen (gegenüber 1990)	
			Alle Sektoren	Industriesektor
DEUTSCHLAND				
UBA 2019	Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE	GreenEe1	-96 %	-95 %
		GreenSupreme	-97 %	-97 %
dena 2018	dena-Leitstudie Integrierte Energiewende	TM95	-95 %	-91 %
		EL95	-95 %	-91 %
BDI 2018	Klimapfade für Deutschland	95 %-Pfad	-95 %	-95 %
EUROPA				
EC 2018	A Clean Planet for all – A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy	1.5TECH	-100 %	-92 %
		1.5LIFE	-100 %	-93 %
ECF 2018	Net-Zero by 2050: From Whether to How	Shared-efforts	-99 %	-92 %
WELT				
IEA 2017	Energy Technology Perspectives 2017	B2DS	-78 %	-38 %
ETC 2018	Mission possible – Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century	Supply Side	-91 %	-74 %

Die Ergebnisse der Metaanalyse werden in der folgenden Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Zusammenfassendes Ergebnis der Metaanalyse von Industrie-Transformations Szenarien hinsichtlich der jeweils hauptsächlich verfolgten Minderungsstrategien

Szenario	Klimaneutrale Energieträger			CO ₂ -Abscheidung		Minderung der Nachfrage nach Primärmaterialien			
	Direkte Elektrifizierung	H ₂ bzw. synthetische Energieträger	Biomasse	CCS	CCU	Materialeffizienz	Kreislaufwirtschaft	Materialsubstitution	Reduktion der Endnachfrage
DEUTSCHLAND									
GreenEe1	++	+++	o	o	o	++	+++	++	++
GreenSupreme	++	+++	o	o	o	+++	+++	+++	+++
TM95	o	+++	o	+	+	o	+	o	o
EL95	+++	++	o	+	+	o	+	o	o
95 %-Pfad	o	o	+++	+++	o	o	+	o	o
EUROPA									
1.5TECH	++	++	++	+++	+++	o	o	o	o
1.5LIFE	++	++	++	+	++	+	+	+	++
Shared-efforts	++	+	++	+	o	++	++	++	++
WELT									
B2DS	+	o	++	+++	o	+	+	o	o
Supply Side	+++	++	o	+++	++	o	o	o	o

Legende:

o = Strategie wird nicht oder nur in sehr geringem Maße verfolgt

+ / ++ / +++ = Strategie wird in moderatem / starkem / sehr starkem Maße verfolgt

Tabelle 4 verdeutlicht, dass vorliegende Klimaschutzszenarien teilweise sehr unterschiedliche Strategien verfolgen, um im Industriesektor weitgehende Emissionsreduktionen bis Mitte des Jahrhunderts zu erreichen. So spielt in einigen der betrachteten Szenarien der Einsatz von CCS eine herausragende Rolle (z. B. im „95 %-Pfad“, BDI 2018 und im „B2DS“-Szenario, IEA 2017), während andere Szenarien aufgrund von Bedenken hinsichtlich der Nachhaltigkeit dieser Strategie gar nicht auf CCS setzen (die Szenarien der Studie UBA 2019). Auf der anderen Seite spielen im „95 %-Pfad“ (BDI 2018) die Strategien der Kategorie „Reduktion der Nachfrage nach Primärmaterialien“ keine relevante Rolle, während sie im Szenario „1.5LIFE“ (EC 2018) und insbesondere im Szenario „GreenSupreme“ (UBA 2019) sehr bedeutende Beiträge zur Minderung der THG-Emissionen des Industriesektors beisteuern. Auch die zukünftige Rolle der Biomasse wird in den Szenarien sehr unterschiedlich eingeschätzt.

Zusammenfassend lässt sich auf Grundlage der durchgeführten Metaanalyse festhalten, dass es in Wissenschaft und Industrie offenbar noch beträchtliche Unterschiede in den Einschätzungen bezüglich plausibler bzw. wünschenswerter zukünftiger Entwicklung des Industriesektors in Richtung Treibhausgasneutralität gibt. Zusätzliche Forschung über die Realisierungsherausforderungen sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Emissionsminderungsstrategien könnte dabei helfen, zu einer breiter geteilten Vision der anstehenden Transformation zu gelangen. Dabei ist auch die Frage zu untersuchen, zu welchem Zeitpunkt bestimmte Entscheidungen getroffen werden müssen, damit einzelne Strategie bis 2050 signifikante Emissionseinsparungen bringen kann. Neben weiterer Forschung erscheint aber auch ein gesellschaftlicher Diskurs über die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Strategien sinnvoll, um auch auf dieser Grundlage einen besseren Eindruck der Realisierungswahrscheinlichkeit bzw. des Potenzials verschiedener Strategien erlangen zu können.

Die ausführliche Darstellung dieser Metaanalyse erfolgt im Rahmen eines Fachartikels, der für die Konferenz „Industrial Efficiency 2020“ im September 2020 eingereicht wurde und voraussichtlich im Juli 2020 erscheinen wird.

4.3 Ergebnisse zur Definition und Entwicklung eines Sets von Kontextszenarien

Im Rahmen des Forschungsprojekts SCI4climate.NRW spielen Annahmen über gesellschaftliche, politische und ökonomische Entwicklungen im Ausland an verschiedenen Stellen eine wichtige Rolle. So ist es beispielsweise im Themenfeld 1 „Technologien“ für Annahmen zur weiteren technologischen Entwicklung der kommenden Jahre und Jahrzehnte von Bedeutung, in welche Technologien auch außerhalb von Deutschland und Europa investiert werden wird. Dies wiederum ist nicht zuletzt abhängig vom Klimaschutz-Ambitionsniveau in verschiedenen Regionen der Welt. In Themenfeld 3 können unter anderem die in den Szenarien getroffenen Annahmen zur Grundstoffproduktion infolge der Import- und Exportbeziehungen Deutschlands und Europas von globalen Entwicklungen (Wirtschaftswachstum, Freiheit des Welthandels) abhängen. Und in Themenfeld 4 „Rahmenbedingungen“ spielen Annahmen über das Klimaschutzniveau im Ausland sowie über die Freiheit des zukünftigen Welthandels eine Rolle bei den Empfehlungen eines sinnvollen zukünftigen energie- und industriepolitischen Instrumentenmixes.

Aufgrund dieser Relevanz der globalen gesellschaftlichen, politischen und ökonomischen Entwicklungen für verschiedene im Rahmen des Projekts angegangenen Forschungsfragen wurden in Themenfeld 3 mehrere mögliche zukünftige globale Entwicklungen – so genannte Kontextszenarien – entwickelt. Diese Kontextszenarien sollen mehrere unterschiedliche denkbare globale Zukunftsentwicklungen

beschreiben. Dabei wurde entschieden, zunächst drei verschiedene Kontextszenarien zu definieren und sich dabei auf solche zukünftigen Entwicklungen zu konzentrieren, die der im SCI4climate.NRW-Projekt angestrebten weitgehenden Klimaneutralität der Industrie bis 2050 zumindest nicht diametral entgegenstehen.⁹

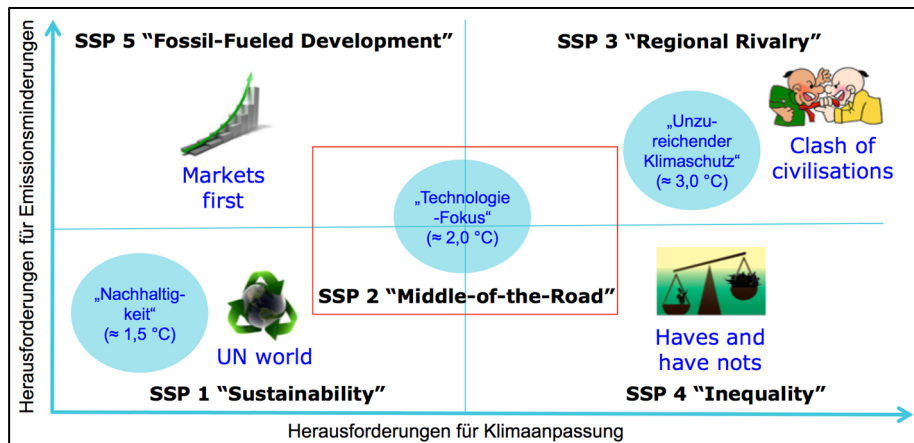


Abbildung 16: Unterscheidung der fünf „Shared Socioeconomic Pathways“-Zukünfte und Verortung der drei im Rahmen von SCI4climate.NRW entwickelten Kontextszenarien

Für die Definition der drei Kontextszenarien wurde dabei auf die bestehenden und in der internationalen Literatur vielfach verwendeten „Shared Socioeconomic Pathways“ (SSP) Bezug genommen, auch um eine Anschlussfähigkeit an die internationale Literatur zu gewährleisten (O’Neill et al. 2014, Rogelj et al. 2018). Dabei die folgenden fünf SSPs unterschieden, die in Bezug auf Annahmen zur zukünftigen sozioökonomischen Entwicklung der Welt abweichen. Diese fünf SSPs werden auf einem Koordinatensystem verortet, das auf der einen Koordinate die Herausforderungen für Emissionsminderungen und auf der anderen Koordinate die Herausforderungen für Klimaanpassung jeweils von niedrig bis hoch aufführt, wie in Abbildung 16 ersichtlich ist.

SSP 1: In diesem auch „**Sustainability**“ genannten SSP sind die Herausforderungen für Klimaschutz relativ niedrig. Es wird angenommen, dass auch ohne gezielte Klimaschutzpolitiken in hohem Maße in umweltfreundliche Technologien investiert wird und der Anteil erneuerbarer Energien stark ansteigt. Es wird von einer stetigen und global relativ gleich verteilten Verbesserung des menschlichen Wohlergehens ausgegangen, unterstützt durch starke globale, regionale und nationale Institutionen.

SSP 2: In dieser „**Middle-of-the-Road**“-Entwicklung verbleibt die Ungleichheiten zwischen und innerhalb der Länder - was unter anderem die Einkommensverhältnisse und den Zugang zu Bildung und Gesundheitsfürsorge angeht - ungefähr auf heutigem Niveau. Die Welt folgt einem Weg sozialer, ökonomischer und technischer Trends, die sich kaum vom bisherigen Verlauf unterscheiden.

SSP 3: In diesem SSP namens „**Regional Rivalry**“ sind die Herausforderung für ambitionierten Klimaschutz hoch, denn internationale und regionale Konflikte überschatten die internationalen Beziehungen und Staaten legen eine Priorität auf ihre nationale Sicherheit. Der technologische Wandel in

⁹ Bei einer zukünftigen globalen Entwicklung, in der das (außereuropäische) Ausland keinerlei Klimaschutzanstrengungen unternimmt und folglich die durchschnittliche Erdtemperatur gegenüber der vorindustriellen Zeit um rund 4 °C oder mehr ansteigt, dürften Maßnahmen, die zu einer weitgehenden Klimaneutralität der deutschen und europäischen Industrie führen, kaum durchsetzbar sein.

diesem SSP verläuft relativ langsam. Es erfolgt ein intensiver Ressourcenverbrauch inkl. einer hohen Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen.

SSP 4: Im SSP „**Inequality**“ sind die Herausforderungen für ambitionierten Klimaschutz relativ niedrig, da die Entwicklung von CO₂-armen Versorgungsoptionen vorangetrieben wird und der technologische Wandel schnell ist. Allerdings gibt es weiterhin global sehr ungleiche Investitionen in Bildung und auch dadurch erhebliche Diskrepanzen im Wohlstandniveau zwischen und innerhalb der Staaten.

SSP 5: Im SSP „**Fossil-Fueled Development**“ bestehen hohe Herausforderung für ambitionierten Klimaschutz, denn in diesem SSP verbleibt weltweit auch langfristig eine starke Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Ökologische Anliegen haben in Gesellschaft und Politik relativ geringe Priorität. Gleichzeitig gibt es einen schnellen technologischen Fortschritt und stetiges Wirtschaftswachstum.

Wie Abbildung 16 zeigt, werden die drei definierten Kontextszenarien in den SSP 1 („Sustainability“), SSP 2 („Middle-of-the-Road“) und SSP 3 („Regional Rivalry“) verortet. Nicht zuletzt aufgrund der rasanten Fortschritte und Kostensenkungen im Bereich erneuerbarer Energien im Laufe der vergangenen Jahre wird eine globale Entwicklung, wie sie in SSP 5 („Fossil-Fueled Development“) skizziert wird, nicht als plausible zukünftige Entwicklung angesehen. SSP 4 („Inequality“) fokussiert hingegen auf eine große Ungleichheit zwischen und innerhalb von Ländern und die damit verbundenen Herausforderungen für die Anpassung an den Klimawandel, was für die im Projekt SCI4climate.NRW im Mittelpunkt stehenden Forschungsfragen von eher untergeordnetem Interesse ist.

Die folgenden drei Kontextszenarien wurden in Themenfeld 3 definiert:

- **„Nachhaltigkeit“:** Dieses Kontextszenario geht von einer globalen Entwicklung aus, die durch starke internationale Kooperation und ein hohes Umweltbewusstsein innerhalb der Gesellschaften gekennzeichnet ist. Es findet eine anhaltende Verschiebung in Richtung weniger energie- und materialintensiven Lebensstile statt. Diese sozioökonomischen Entwicklungen werden durch eine ambitionierte und weltweit koordinierte Klimaschutzpolitik flankiert, die es auch dank schneller technischer Fortschritte bei den Klimaschutztechnologien ermöglicht, die globale Erwärmung auf rund 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.
- **„Technologie-Fokus“:** Dieses Kontextszenario befindet sich im SSP „Middle-of-the-Road“. Die sozioökonomischen Entwicklungen sind somit ähnlich wie in der Vergangenheit, d. h. es finden keine weitgehenden Lebensstiländerungen statt und die internationale Zusammenarbeit befindet sich auf einem mittleren Niveau. Dennoch gelingt es in diesem Kontextszenario über eine international weitgehend abgestimmte, ambitionierte Klimaschutzpolitik und einen starken Fokus auf technologische Lösungen (inkl. CCS) die globalen THG-Emissionen zeitnah und kontinuierlich abzusenken, so dass die globale Erwärmung auf etwa 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden kann.
- **„Unzureichender Klimaschutz“:** Wie der Name bereits verdeutlicht, sind die globalen Klimaschutzbemühungen in diesem Kontextszenario unzureichend, um die Zielspanne des Pariser Klimaschutzabkommens einhalten zu können. Die in den vergangenen Jahren in einigen Ländern der Welt beobachtete Tendenz zu einem Fokus auf nationale Interessen und einer einhergehenden Schwächung des Multilateralismus machen die Umsetzung von ambitioniertem Klimaschutz in diesem Szenario unmöglich. Einzelne Weltregionen wie die EU und einige verbündete Staaten verfolgen dennoch einen moderaten bis ambitionierten

Klimaschutz, außerdem setzen einige Länder und Regionen auf einen weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien, um eine größere Unabhängigkeit von Energieimporten zu erlangen. Aufgrund dieser Bemühungen können die globalen THG-Emissionen ab Mitte der 2030er Jahre reduziert werden. Die globale Erwärmung wird bis Ende des Jahrhunderts auf etwa 3 °C ansteigen.

Detailliertere Storylines und zentrale Kenngrößen (wie Wirtschaftswachstum, Nachfrage nach Grundstoffen und Energieträgerpreise) dieser drei Kontextszenarien werden in einem derzeit in Arbeit befindlichen Bericht näher ausgeführt.

4.4 Ergebnisse zur Entwicklung von Szenarien der NRW-Industrie

Über die gesamte Laufzeit des Projekts „SCI4climate.NRW“ stellt die Entwicklung von Szenarien der zukünftigen Entwicklung der NRW-Industrie (eingebettet in eine konsistente Entwicklung in Deutschland und Europa) einen zentralen Teil der Arbeiten in Themenfeld 3 dar. Dabei werden mit hohem technologischen Detailgrad denkbare Transformationspfade für die Industrie in Richtung Treibhausgasneutralität bis 2050 dargestellt und modelliert, wobei die Industriestandorte in NRW und Deutschland auch örtlich explizit im Modell berücksichtigt werden. Neben dem Industriesektor werden für die Szenarien auch die weiteren Energienachfragesektoren sowie die Energieangebotsseite modelliert, wodurch Wechselwirkungen zwischen den Sektoren berücksichtigt und Aussagen über die Herkunft der im Industriesektor benötigten Energieträger getroffen werden können.

Im 1. Forschungsintervall wurde zunächst das am WI verwendete Modellinstrumentarium zur Erstellung von Energieszenarien weiterentwickelt. So ist das Energieangebotsmodell infolge der Weiterentwicklung in der Lage, einzelne europäische Länder oder auch Regionen in beliebiger Aufteilung zu betrachten („Modularisierung“), was je nach Forschungsfrage bedeutsame Vorteile in der Anwendung mit sich bringt. Zudem wurde das vormals v. a. das Stromsystem abbildende Angebotsmodell dahingehend erweitert, dass nun auch gleichzeitig die Erdgas- sowie Wasserstoffversorgung (inkl. Elektrolyseure) detailliert abgebildet werden kann. Schließlich wurde eine Funktion zur Modellierung der Kapazitätserweiterung entwickelt (sog. „capacity expansion model“), mit der neben dem kostenoptimalen Einsatz vorhandener Kapazitäten auch ein kostenoptimaler Zubau neuer Kapazitäten bestimmt werden kann. Auf der Nachfrageseite wurde ein Investitions- und Einsatzmodell für die europäische Petrochemie entwickelt, das unter vorgegebenen Randbedingungen (CO₂-Preis, Rohstoffpreise, Kunststoffnachfrage, Pipelineverfügbarkeit) einen kostenoptimalen (Re-)Investitionspfad für konkrete Anlagen der petrochemischen Industrie in Europa (standortscharf) bestimmen kann. Dieses Modell wurde bereits erfolgreich zur Szenarienerstellung eingesetzt. Zudem wurde eine detailliertere Darstellung von industriellen CCS-Anlagen und deren Infrastruktur im Nachfragemodell ermöglicht.

Ausführlichere Beschreibung der Modellweiterentwicklungen wie auch Kurzbeschreibungen der beiden eingesetzten Modelle (Energienachfrage- sowie Energieangebotsmodell) finden sich im Anhang dieses Berichtes.

Auf Grundlage des verbesserten Modellierungsinstrumentariums wird aktuell ein erstes Szenario erarbeitet. Dieses erste Szenario dient als Grundlage für detaillierte Diskussionen mit Vertreterinnen und Vertretern der verschiedenen Industriebranchen. Diese Diskussionen werden dabei insbesondere in den bereits bestehenden Strukturen der Initiative IN4climate.NRW stattfinden und dienen dazu, dass sich die Industrie und die an SCI4climate.NRW beteiligten wissenschaftlichen Institute in einer

strukturierten Form zu verschiedenen relevanten Themen über denkbar alternative Entwicklungen in Richtung einer (weitgehend) klimaneutralen Industrie austauschen. Im Laufe des zweiten Forschungsintervalls werden dann im Rahmen von Themenfeld 3 weitere Szenarien bzw. Szenario-Varianten erarbeitet. Diese werden die auf Grundlage der Diskussionen mit der Industrie abgeleiteten alternativen Transformationspfade in quantitativer Form darstellen. Die verschiedenen Szenarien stellen anschließend – spätestens im Verlauf des dritten Forschungsintervalls – eine wichtige Grundlage für eine tiefergehende Analyse und Diskussion der Vor- und Nachteile alternativer Transformationspfade dar.

Im Laufe des ersten Forschungsintervalls wurden zentrale Annahmen und die wesentliche Storyline des ersten Szenarios (Arbeitstitel „Basis-Klimaschutzszenario“) erarbeitet, die im Folgenden dargestellt werden:

Klimaschutz-Zielniveau für das Jahr 2050

- Im „Basis-Klimaschutzszenario“ wird das von der EU-Kommissionspräsidentin ausgegebene und von nahezu allen EU-Staaten – inklusive der Bundesregierung – unterstützte Ziel der Klimaneutralität bis 2050 erreicht. NRW und seine Industrie stellen sich auf diese Zielsetzung frühzeitig ein, um „stranded investments“ zu vermeiden.

Grundlegende sozioökonomische Entwicklungen

- Die Bevölkerung in NRW entwickelt sich bis Mitte des Jahrhunderts gemäß der aktuellen Fortschreibung des Statistischen Landesamtes IT.NRW.
- Produktion und Wertschöpfung in den Grundstoffindustrien verändern sich in Zukunft etwa entsprechend der Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit: Die physische Produktion bleibt ungefähr konstant, positive Wertschöpfungseffekte ergeben sich jedoch durch die Erzeugung höherwertiger Produkte (z. B. mehr Qualitätsstahl und Spezial-Polymere).¹⁰

Entwicklungen in der Energiewirtschaft und zukünftige Rolle von Wasserstoff

- Die Bruttostromerzeugung in Deutschland besteht im Jahr 2050 zu 100 % aus erneuerbaren Energien.
- Der Kohleausstieg in Deutschland ist im Zeitraum 2035 bis 2038 abgeschlossen (entsprechend der Empfehlungen der „Kohle-Kommission“ aus dem Jahr 2019).
- Die Entwicklung der Energiewirtschaft in den europäischen Nachbarländern folgt einem Transformationsverlauf, der mit dem EU-Ziel der Klimaneutralität bis 2050 kompatibel ist.
- Der zukünftige Wasserstoffbedarf in NRW wird durch einen Mix aus regionaler Versorgung und Importen gedeckt.
- Ab 2025 findet eine Umwidmung von Erdgas-Transportpipelines zu Wasserstoffpipelines statt, um über Seehäfen (potenziell Antwerpen, Rotterdam, Emden und Wilhelmshaven) Wasserstoff nach NRW transportieren zu können.
- Durch den Infrastrukturausbau erhalten die Industrieunternehmen ausreichende Sicherheit, um ab 2025 in Wasserstoff-Technologien im industriellen Maßstab zu investieren.

¹⁰ Ökonomischen Auswirkungen der SARS-CoV-2-Pandemie werden in dem Szenario noch nicht berücksichtigt.

- Es handelt sich jedoch nicht um ein Wasserstoff-Maximierungsszenario, d. h. nicht sämtliche potenziell mit Wasserstoff bedienbare Nachfragesegmente in der Industrie, dem Verkehr und dem Gebäudesektor werden auch tatsächlich mit Wasserstoff gedeckt. In vielen Fällen wird auf die i. d. R. effizientere direktelektrische Versorgung gesetzt.

5 Ergebnisse Rahmenbedingungen

5.1 Forschungsfragen des 1. Forschungsintervalls

Im Themenfeld Rahmenbedingungen werden Maßnahmen und Handlungsstrategien sowie komplementäre politische Rahmenbedingungen kriteriengeleitet geprüft, die grundlegende Innovationen zum einen anregen und zum anderen deren Umsetzung am Standort NRW begünstigen.

Betrachtet werden zudem ökonomische Rahmenbedingungen, also die Wettbewerbsfähigkeit und das Aufzeigen neuer unternehmerischer Chancen und Möglichkeiten bzw. tragfähiger Geschäftsmodelle sowie gesellschaftliche Rahmenbedingungen (insbesondere Akzeptanz). Hierzu gehören insbesondere auch die Berücksichtigung und Betrachtung der Investitions- und Innovationszyklen der Unternehmen in den verschiedenen Branchen.

Im ersten Forschungsintervall wurden dazu die folgenden einleitenden Fragestellungen untersucht:

- Welche Instrumente sind geeignet, um Klimaschutz voranzutreiben und gleichzeitig der Grundstoffindustrie in NRW Perspektiven zu eröffnen?
- Wodurch werden innovative Geschäftsmodelle erfolgreich?
- Wie ist die Grundstoffindustrie in NRW aufgestellt?
- Welche Rahmenbedingungen zum industriellen Klimaschutz existieren aktuell in NRW?
- Welche Erkenntnisse zur Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft können aus anderen Ländern gewonnen werden?
- Was zeichnet erfolgreiche Strukturwandelprozesse aus?

5.2 Ergebnisse Vergleich von Politikinstrumenten

Welche Instrumente sind geeignet, um Klimaschutz voranzutreiben und gleichzeitig der Grundstoffindustrie in NRW Perspektiven zu eröffnen?

Politikinstrumente können unter anderem mit ordnungsrechtlichen Vorgaben oder finanziellen Anreizen in Richtung politischer Ziele wirken, sowie die infrastrukturellen, sozialen und regulatorischen Rahmenbedingungen beeinflussen. In der Regel werden verschiedene Politikinstrumente kombiniert. Ordnungsrecht, das einen Grenzwert vorgibt, kann hierbei wie zum Beispiel beim Emissionshandel mit marktlichen Elementen verknüpft werden. Durch das Preissignal, das sich aus dem Handel der Emissionsberechtigungen ergibt, soll die politisch vorgegebene Obergrenze für Emissionen möglichst effizient erreicht werden. Zusätzliche Instrumente wie beispielsweise die Förderung der Entwicklung klimafreundlicher Technologien können ein solches Leitinstrument flankieren und beispielsweise Lernkurveneffekte und Investitionshürden adressieren. Zudem ist der Staat für die Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur zuständig.

Neben dem Klimaschutzziel stehen weitere Ziele wie die Beibehaltung der Wettbewerbsfähigkeit der im Inland ansässigen Unternehmen und der damit verbundenen Beschäftigung und Wertschöpfung. Mehrere Instrumente zahlen damit auf mehrere Ziele ein, es kommt zu Überschneidungen und Inkonsistenzen. Deshalb stellt sich nicht nur die Frage, wie ein einzelnes Instrument auf das damit intendierte Ziel einzahlt, sondern auch welche Wechselwirkungen sich mit anderen Zielen und Instrumenten ergeben und welcher Instrumentenmix am ehesten geeignet erscheint, um die verschiedenen Ziele in Einklang zu bringen.

Ergebnisse:

1. Matrix-Tool advanced/einfach

Um die zwei Dimensionen Instrument/Maßnahmenpaket und Bewertungskriterien abbilden zu können, wurde ein Matrix-Tool entwickelt, das eine Gesamtbewertung von Maßnahmenbündeln erlaubt. Das Tool kann zudem Kontextszenarien berücksichtigen, indem die Kriterien in unterschiedlicher Weise gewichtet werden.

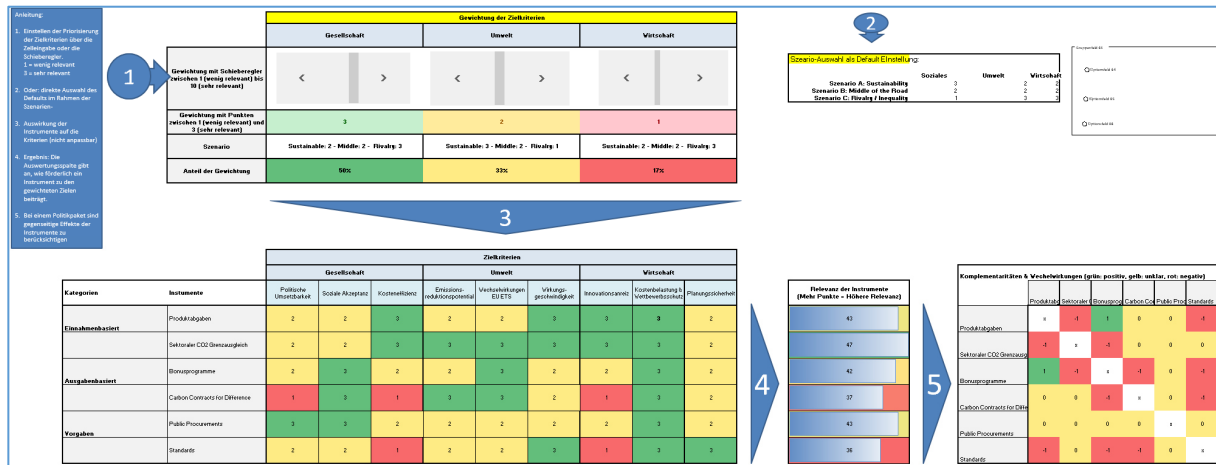


Abbildung 17: Matrix Tool zum Arbeitspaket 4.1

2. Kriterienschema zur Bewertung von Politikinstrumenten und Maßnahmenbündeln

Zur Bewertung der einzelnen Politikinstrumenten wird ein umfassender Ansatz verfolgt, sodass Kriterien aus gesellschaftlicher, ökonomischer, ökologischer und politischer Perspektive herangezogen werden (siehe Abbildung 18).

Zu jeder der vier Perspektiven werden mehrere Kriterien begutachtet, aus denen sich dann die Gesamtschätzung ergibt. Zu Beginn des Projekts hat die wissenschaftliche Begleitung in SCI4climate.NRW einen vielfältigen Kriterienkatalog aufgestellt. In einem Filter- und Sortierungsprozess wurde dann eine möglichst breite und differenzierte Umfassung von Kriterien erarbeitet, die gleichzeitig geringstmögliche Überschneidungen aufweisen. Für jedes Kriterium wird zunächst definiert, inwiefern der zu erwartende Effekt als eher positiv, neutral oder negativ – im Vergleich zu den jeweils anderen vorgestellten Instrumenten - zu bewerten sein könnte.



Abbildung 18: Die vier Perspektiven zur Bewertung von Politikinstrumenten

3. Charakterisierung von Politikinstrumenten

Sechs Instrumente zur Motivation von Klimaschutzanstrengungen vor Ort wurden einer eingehenderen Untersuchung unterzogen. Bei den im Folgenden skizzierten Instrumenten sind jeweils mehrere Ausgestaltungsvarianten denkbar, die entscheidenden Einfluss auf die Wirkung des Instruments haben können.

- Produktabgaben:** Produktabgaben verfolgen das Ziel, Produkte je nach ihrer CO₂-Intensität entlang der Wertschöpfungskette zu bepreisen. Dieses geschieht nicht bei der Produktion, sondern beim Verkauf der Produkte. Der Treibhausgaspreis wird damit weitergegeben. Die eingenommenen Gelder könnte in einen nationalen Treuhandfonds eingezahlt werden und als Ressource, z.B. für Demonstrationsprojekte eingesetzt werden (Neuhoff et al. 2016). Ein Ziel ist es, CO₂-armen und innovativen Produkten am Markt einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen.
- Sektoraler CO₂-Grenzausgleich:** Durch den CO₂-Grenzausgleich werden die Ausgaben für die CO₂-Steuer an Unternehmen zurückerstattet, die ihre Produkte im Ausland verkaufen und Importe von Produkten mit hohem „CO₂-Gehalt“ werden mit der heimischen CO₂-Steuer belastet. Dies soll zur Vermeidung von Wettbewerbsnachteilen der heimischen Industrien beitragen. Der Grenzausgleich entfällt automatisch beim Handel mit Ländern, die einen eigenen CO₂-Preis in vergleichbarer Höhe haben.
- Carbon Contracts for Difference:** CO₂-Differenzverträge legen zwischen zwei Parteien, dem Staat bzw. einer Durchführungsorganisation und einem Industrieunternehmen, einen Vertragspreis für vermiedene CO₂-Emissionen in hochinnovativen und emissionsarmen

Projekten über eine Laufzeit fest. Der Vertragspreis garantiert Industrieunternehmen einen langfristigen CO₂-Preis in Abhängigkeit eines bestehenden THG-Bepreisungsmechanismus - in Deutschland ist dies der EU ETS. Die Differenz zwischen Vertragspreis und durchschnittlichen Kosten für EUAs definiert die Auszahlung. Das Ziel von CCfDs ist es, durch eine erhöhte Planungssicherheit klimafreundliche Investitionen anzureizen und durch mögliche Betriebskostenzuschüsse entsprechende Produkte marktfähig zu machen.

- **Bonusprogramme:** In der Grundstoffindustrie können Bonuszahlungen für die Herstellung klimafreundlicher Güter wie Stahl oder Zement geleistet werden (Wyns, Khandekar, Axelson, Sartor, & Neuhoff, 2019). Die Preisdifferenz zwischen einem Produkt aus klimafreundlicher Fertigung und aus konventioneller Fertigung liefert eine Berechnungsgrundlage für die Bonuszahlungen. Durch die Zahlung einer finanziellen Prämie, soll somit ein Anreiz geschaffen werden, auf freiwilliger Basis Produktionsprozesse klimafreundlicher zu gestalten. Hierdurch besteht ein Anreiz, Güter möglichst klimafreundlich herzustellen. Höhere OPEX (Material Economics, 2019) werden kompensiert, sodass diese nicht an Kunden weitergegeben werden müssen. Hierdurch wird die Konkurrenzfähigkeit von klimafreundlichen Grundstoffen gegenüber konventionell hergestellten Gütern sichergestellt.
- **Green Public Procurement:** Um die Marktmacht der öffentlichen Beschaffung zu nutzen und den Absatz von umweltfreundlichen Produkten zu erhöhen, können Nachhaltigkeitskriterien, wie z.B. CO₂-arme Produkte, in die Beschaffungsrichtlinien integriert werden oder Beschaffungsstandards eingeführt werden. Das Ziel ist es, eine hohe Nachfrage und damit eine Lenkungswirkung in Richtung nachhaltiger Produkte zu schaffen. Durch das hohe Marktvolumen des öffentlichen Sektors können Marktentwicklungen beeinflusst und bei entsprechenden Vorgaben Innovationen gefördert werden (McKinsey 2008).
- **Quoten:** Quoten und Standards sind ein wirkungsvolles Instrument, da die Vorgaben in der Regel direkt umgesetzt und von allen Marktteilnehmern eingehalten werden müssen. Bislang setzen Standards insbesondere bei Sicherheitsaspekten und der Funktionalität an, Umweltstandards werden in der Industrie bislang kaum umgesetzt (Wyns et al. 2019). Das Ziel ist es, ein Level Playing Field für alle Marktteilnehmer zu schaffen und gleichzeitig ein Minimum an Umwelanforderungen umzusetzen. Unter Standards fällt nach unserer Definition auch eine verbindliche Quote für bestimmte Produkteigenschaften, wie verpflichtende Vorgaben für Unternehmen, (bei Endprodukten) einen bestimmten Anteil an CO₂-freien oder Recycling-Materialien zu verwenden.

4. Bewertung der Politikinstrumente anhand der zuvor entwickelten Kriterien

Kriterien		Grenzausgleich + freie Allokation	Produktabgaben	CCfD	Bonus	Standard / Quote	Green Procurement
Gesellschaft	Sozialverträglichkeit						
	Volkswirtschaftliche. Kosteneffizienz						
Umwelt	Emissionsminderungspotential						
	Wirkungsgeschwindigkeit						
	Umweltverträglichkeit						
Wirtschaft	Wettbewerbsfähigkeit	*	*				
	Planungssicherheit						
	Dynamischer Innovationsanreiz	*					
Politik & Institutionen	Politische Durchsetzbarkeit						
	Administrative Praktikabilität						

Die vorläufige Instrumentenbewertung gibt einen ersten Eindruck über die Komplexität der Evaluation von Politikinstrumenten und sind in starkem Maße abhängig von der jeweiligen Ausgestaltung.

5. Kombinierbarkeit von Politikinstrumenten

Die Bewertung anhand der Kriterien kann sich verändern, wenn mehrere Instrumente zusammenwirken. Zusätzlich zur Bewertung der einzelnen Instrumente ist deshalb eine Analyse möglicher Maßnahmenbündel sinnvoll (noch in Arbeit).

6. Ausblick

Im 2. Forschungsintervall soll das Kriterienraster angewendet und im Hinblick auf Politikstrategien konkretisiert werden, zum einen technologiespezifisch (z.B. H2-Strategie), zum anderen branchenspezifisch. Zudem soll ein Instrumentenmix zur Umsetzung der Basisstrategie aus TF3 entwickelt werden.

5.3 Ergebnisse Expertenbefragung zu Geschäftsmodellen

Wodurch werden innovative Geschäftsmodelle erfolgreich?

Zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen ist es für Unternehmen erforderlich, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, die einhergehen mit dem Ziel der industriellen Klimaneutralität. Ob sich diese erfolgreich etablieren können, hängt nicht zuletzt von den regulatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab. Bestehende Beschränkungen des Regulierungsrahmens können Hemmnisse für innovative Technologien und Verfahren darstellen und Geschäftsmodelle unrentabel machen. Andere

Geschäftsmodelle werden dank der geltenden Regulierung erst möglich, setzen diese aber auch voraus. Zusätzlich können sich Faktoren wie der Forschungs- und Entwicklungsbedarf oder hohe Kosten auf ein Geschäftsmodell auswirken und dessen gewinnbringenden Umsetzung entgegenstehen. Um den Zusammenhang zwischen den bestehenden oder neuen Rahmenbedingungen und der Entwicklung tragfähiger, klimafreundlicher Geschäftsmodelle zu untersuchen, wurde dieser Frage in einem zweidimensionalen Ansatz nachgegangen.

Um aus der betrieblichen Praxis direkte Erkenntnisse zu dieser Fragestellung zu erhalten, wurden zuerst Experteninterviews mit Unternehmensvertretern energieintensiver Branchen durchgeführt. Zur Identifikation potenzieller Interviewpartner wurde eine breit angelegte Internetrecherche durchgeführt. Über das Screening diverser Datenbanken, Gründungspreise, Firmenhomepages, Verbandsseiten, Innovationsforen und bereitgestellten Informationen aus der übergeordneten Initiative IN4climate.NRW wurde eine Übersicht zu geplanten, laufenden oder bereits beendeten Klimaschutzaktivitäten von Industrie- oder industrienahen Unternehmen erstellt. Der Fokus lag dabei vordergründig auf nationalen Projekten und sollte sowohl Aktivitäten großer Konzerne als auch kleiner und mittlerer Unternehmen (KMUs) sowie Start-ups umfassen. Im Mittelpunkt stand zudem ein diversifizierter Technologie- und Branchenmix. In einem nächsten Schritt erfolgte die Konzeption des Gesprächsleitfadens, welcher als Grundlage für die stattfindenden semi-strukturierten Experteninterviews diente und aus den vier Themenblöcken „Unternehmensinformationen“, „Unternehmerische Klimaschutzaktivitäten“, „Bestehendes Geschäftsmodell“ und „Umfeldfaktoren und Entwicklungsmöglichkeiten“ unterteilt ist. So wurden sieben Vertreter der Energie-, Papier- und Aluminiumindustrie interviewt, deren Klimaneutralität von verschiedenen Technologiepfaden, insbesondere Wasserstoff und erneuerbarem Strom, abhängt. Die Auswertung der Antworten erfolgte mittels einer qualitativen Inhaltsanalyse und eines zuvor erstellten Kategoriensystems. Ergänzt wurden die Interviews durch gezielte und themenspezifische Literaturrecherchen zu den beiden priorisierten Technologiepfaden „CO₂-freier Wasserstoff“ und „Erneuerbarer Strom“, um die Interviewaussagen besser einordnen und die Herausforderung für die einzelnen Branchen wissenschaftlich fundiert bewerten zu können.

Die Ergebnisse der Interviews zeigen, dass zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen für viele Unternehmen weitreichende Anpassungen ihrer Aktivitäten und Geschäftsmodelle notwendig sind. Insgesamt zeigte sich, dass das Thema Klimaschutz unternehmens- und branchenübergreifend an Bedeutung gewinnt und alle interviewten Unternehmen Klimaschutzanstrengungen vermehrt in ihr Geschäftsmodell integrieren, wenn auch aus unterschiedlichen Gründen. Diese reichen von der Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit in Deutschland und auf dem Weltmarkt, Imagegewinnen bis hin zur Steigerung der Attraktivität für Mitarbeitende in Zeiten des Fachkräftemangels. Der Anstoß, sich mit dem Thema Klimaschutz auseinanderzusetzen, kam in den meisten Unternehmen durch die sich ändernden politischen Rahmenbedingungen und Marktgegebenheiten. Die Notwendigkeit, sich anzupassen, um weiterhin wettbewerbsfähig agieren zu können, führte in den meisten Fällen zur Eingliederung einzelner nachhaltiger und klimafreundlicher Produktions- und Prozessabläufe in die traditionellen Unternehmensstrukturen. Unternehmensübergreifend hat sich die Wahrnehmung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsaktivitäten in den letzten Jahren daher stark gewandelt und wird heutzutage mehrheitlich als unternehmerische Chance angesehen, mit der neue Technologien und Innovationen vorangetrieben und in die bestehenden Geschäftsaktivitäten eingebunden werden können.

Interessanterweise haben dabei alle Interviewpartner ein beinahe identisches Verständnis ihres Geschäftsmodells gezeigt, welches sich darüber definiert, mit dem eigenen Produkt- und Dienstleistungsangebot ausreichend Geld zu erwirtschaften. In einzelnen Fällen werden als zusätzliche Kriterien noch

Nachhaltigkeit oder Stakeholderzufriedenheit als Bestandteile des Geschäftsmodells erfasst. Weitere Dimensionen, die in der einschlägigen Literatur als Geschäftsmodellbestandteile gesehen werden, wie beispielsweise Kanäle, die die Kommunikations- und Distributionsformen zum und vom Kunden festlegen, wurden von den Interviewpartnern auf einer nachgelagerten Ebene angeordnet. Zudem zeigte sich, dass abhängig von der Branchenzugehörigkeit und Technologieverwendung der existierende regulatorische Rahmen maßgeblich beeinflusst, wie wirtschaftlich die Unternehmen agieren können.

Während die spezifischen Regulierungen von Branche zu Branche und teilweise auch von Unternehmen zu Unternehmen innerhalb einer Branche variieren, sind sich alle Unternehmen über die Wichtigkeit stabiler und langfristig vorhersehbarer Rahmenbedingungen und frühzeitiger politischer Anreize einig. Nur so lassen sich Geschäftsaktivitäten auf lange Sicht planen und Investitionen zielgerichtet durchführen. Dabei wird die fehlende Planungssicherheit von den Interviewpartnern in vielen Fällen sogar höher gewichtet als die konkrete Ausgestaltung der Regularien. Weiteren externen Faktoren, die sich vor dem Hintergrund der Klimadiskussion auf das Geschäftsmodell auswirken können, wie das makroökonomische Umfeld (z. B. Verfügbarkeit von notwendigen Rohstoffen, Finanzierungsmöglichkeiten am Kapitalmarkt, globale Marktkonditionen) oder Branchenfaktoren (z. B. neue Marktakteure entlang der Wertschöpfungskette, Existenz von Substitutionsgütern und -leistungen) wird in diesem Fall nicht dieselbe Wichtigkeit beigemessen, wie den politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen auf nationaler und europäischer Ebene.

Die Bedeutung der strategischen Geschäftsmodellentwicklung ist in allen Unternehmen groß. Teilweise wird die Belegschaft in den Prozess einbezogenen, andernorts wird die Diskussion vorrangig im Rahmen der Vorstandssitzungen geführt. Grundsätzlich sehen alle Unternehmen, insbesondere die großen, die Möglichkeit, Klimaschutzziele und -maßnahmen zukünftig verstärkt in das Geschäftsmodell mit einzubeziehen und dieses entsprechend weiterzuentwickeln. Dies wird jedoch vorrangig auf lange Sicht angestrebt und lässt sich auch nicht in allen Zielmärkten umsetzen. Bei den interviewten Start-ups ist das Entwicklungspotenzial tendenziell geringer, da ihre Geschäftsmodelle bereits zu großen Teilen auf diesen Vorgaben beruhen. Nichtsdestotrotz können dort neue politische und gesellschaftliche Entwicklungen schneller in die Unternehmensaktivitäten und das Geschäftsmodell aufgenommen werden.

Eine weitere Verallgemeinerung der Interviewaussagen über Branchen hinweg erwies sich aufgrund der spezifischen Bedürfnisse als schwierig. Aus diesem Grund wurde auch die ursprünglich geplante Unternehmensbefragung in Anschluss an die Interviews bis auf weiteres verschoben. Branchenspezifisch konnten mit CO₂-neutralem Wasserstoff und erneuerbarem Strom jedoch zwei Technologiepfade identifiziert werden, von deren Verfügbarkeit große Teile der industriellen Transformationsprozesse und die Entwicklung tragfähiger klimafreundlicher Geschäftsmodelle abhängen. Um den Einsatz fossiler Energieträger und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen zu reduzieren, werden in den nächsten Jahren große Teile der gegenwärtigen Produktion auf den direkten (Elektrifizierung) beziehungsweise indirekten (Erzeugung von Wasserstoff) Einsatz von erneuerbarem Strom umgestellt werden müssen. Bisher stehen der wirtschaftlichen Verwendung dieser beiden Energieträger insbesondere die folgenden Hemmnisse im Wege:

CO ₂ -freier Wasserstoff
<ul style="list-style-type: none">▪ Transparente und verlässliche Rahmenbedingungen▪ Hohe Produktions- und Distributionskosten▪ Wasserstoffinfrastruktur und -transport▪ Schaffung von Nachfrage und Absatzmärkten
Erneuerbarer Strom
<ul style="list-style-type: none">▪ Zubau Erneuerbarer Energien und Gewährleistung der Versorgungssicherheit▪ Wettbewerbsfähige Strompreise

Abbildung 19: Bestehende Hemmnisse, die die Umsetzung eines auf CO₂-freien Wasserstoff oder erneuerbaren Strom basierendes Geschäftsmodell in vielen Fällen bisher nicht rentabel machen

Eine gezielte Literaturrecherche ergänzte die Aussagen der Interviews zu den genannten Hemmnissen. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte hervorgehoben.

Geschäftsmodell hemmende Faktoren: CO₂-freier Wasserstoff

1. *Transparente und verlässliche Rahmenbedingungen*

Als Grundvoraussetzung für die Einführung innovativer Wasserstofftechnologien werden in den Interviews unternehmensübergreifend langfristige und verlässliche Rahmenbedingungen genannt. Insbesondere vor dem Hintergrund langer Investitionszyklen und hoher Investitionsbeträge, stellen abrupte regulatorische Richtungswechsel und fehlende Anreize ein nicht kalkulierbares Unternehmensrisiko dar. Als konkretes Beispiel für bisherige Versäumnisse bei der Schaffung passender Rahmenbedingungen wird die bis jetzt nicht in nationales Recht umgesetzte europäische Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED II (2018/2011/EU) genannt. Eine Umsetzung der RED II würde nicht nur einen Beitrag zur Etablierung eines passenden Rechtsrahmens für Raffinerien und Kraftstoffhersteller – und somit für den Verkehrssektor – liefern, sondern auch einen ersten großen Absatzmarkt für klimaneutralen Wasserstoff schaffen und dessen Handel lukrativ gestalten.

2. *Hohe Produktions- und Distributionskosten*

Die Wirtschaftlichkeit der Erzeugung von grünem Wasserstoff hängt in erster Linie von den Strombezugskosten ab, die zwischen 45 und 95 Prozent der Gestehungskosten ausmachen (NOW 2018). Durch die hohe Belastung des Strompreises mit Steuern und Umlagen ist ein wettbewerbsfähiger Einsatz von regenerativem Strom zur Erzeugung von Wasserstoff derzeit noch nicht gegeben, obwohl bereits Ausnahmeregelungen für Elektrolyseure bestehen, wie beispielsweise der Anspruch auf verringerte individuelle Netzentgelte (EnWG §118 Abs. 6) und eine mögliche (branchenabhängige) Befreiung von der Stromsteuer (StromStG §9 Abs. 1). Ein aktueller Kostenvergleich zeigt, dass die Produktionskosten von Wasserstoff, der mittels Wasserelektrolyse hergestellt wird, im Idealfall bei 3 bis 6 Euro pro Kilogramm (€/kg_{H2}) liegen, während die Kosten bei der Herstellung mittels Dampfreformierung von Erdgas lediglich 2 €/kg_{H2} betragen.

3. Wasserstoffinfrastruktur und -transport

Um die industriellen Zentren in Deutschland zukünftig mit CO₂-freiem Wasserstoff aus Gegenden mit günstigeren Produktionsbedingungen – das heißt aus Regionen mit einem hohen Angebot erneuerbarer Ressourcen wie Wind und Sonne – zu versorgen, bedarf es des Aufbaus einer geeigneten Wasserstoffinfrastruktur. Diese muss sowohl auf einen nationalen Transport als auch auf den europäischen und weltweiten Import von klimaneutralem Wasserstoff ausgerichtet werden, denn die hohe Nachfrage wird nicht allein mit in Deutschland erzeugtem Wasserstoff zu decken sein. Zur vollständigen Versorgung mit Wasserstoff bietet sich neben dem Neubau von Leitungen auch die Umstellung bestehender Erdgas- und Speicherinfrastrukturen auf Wasserstoff an. Anfang 2020 veröffentlichten die Betreiber der Gas-Fernleitungen einen ersten Entwurf für ein knapp 6.000 km langes Wasserstoffnetz, das zu 90 Prozent auf dem existierenden Erdgasnetz basieren würde.

4. Schaffung von Nachfrage und Absatzmärkten

Um das Henne-Ei-Problem im Zusammenhang mit CO₂-freiem Wasserstoff zu lösen, werden entsprechende Anreize zur Nutzung von Wasserstoff auf der Abnehmerseite benötigt. Eine Maßnahme wäre hier die bereits oben beschriebene Umsetzung der RED II in deutsches Recht. Dies würde einer Quote für Kraftstoffhersteller ähneln. Eine generelle Quote für die Lieferanten von Industriegas wird als weiterer Vorschlag in den Experteninterviews genannt, auch wenn dies in der laufenden Diskussion auf nationaler Ebene als weniger wahrscheinlich gilt. Über verschiedene Marktanzreizprogramme, wie zum Beispiel die viel diskutierten Carbon Contracts for Difference, für welche die Bundesregierung in den nächsten Wochen und Monaten einen Gesetzentwurf für die Stahl-, Zement- und Chemiebranche plant, könne ein verbindlicher Investitionsrahmen geschaffen werden.

Geschäftsmodell hemmende Faktoren: Erneuerbarer Strom

1. Zubau Erneuerbarer Energien und Gewährleistung der Versorgungssicherheit

Durch die Elektrifizierung industrieller Prozesse wird es zu einem Anstieg des industriellen Strombedarfs bis zum Jahr 2050 kommen. Um die prognostizierten Mehrbedarfe zu berücksichtigen, gilt es daher, den derzeitigen Anteil von 42,1 Prozent erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung weiter auszubauen. Um einen steigenden Anteil volatiler Erzeugungskapazitäten zu integrieren, sind außerdem Anpassungen und Optimierungen beim Strommarktdesign und der Netzregulierung notwendig. Durch eine Flexibilisierung von Angebot und Nachfrage, beispielsweise durch den Einsatz von Speichern und Sektorenkopplung, können passende Rahmenbedingungen geschaffen werden, um auch bei einem hohen Anteil Erneuerbarer Energien Versorgungsengpässe zu vermeiden. Die energieintensive Industrie selbst kann einen großen Beitrag zur Netzintegration volatiler regenerativer Stromerzeugung liefern, indem sie ihre Stromnachfrage im Rahmen der technischen Möglichkeiten flexibel an das Stromangebot anpasst und so Netzengpässen und Stromüberschüssen entgegenwirkt. Dafür bedarf es allerdings der nötigen Rentabilität derartiger Anpassungen im Strombezug, um die Unternehmen für den zusätzlichen Aufwand und die Flexibilisierung ihrer Prozesskapazitäten zu entschädigen. Bisher fehlt es – vor allem für Großverbraucher – an entsprechenden Anreizen, den eigenen Strombezug an die volatile Einspeisung der Erneuerbaren Energien anzupassen.

2. Wettbewerbsfähige Strompreise

Stromkosten stellen für viele energieintensive Unternehmen einen der Hauptkostenbestandteile dar und die Unsicherheit über deren zukünftige Preisentwicklung hat enorme Bedeutung für anstehende Investitionsentscheidungen. Damit die Unternehmen global erfolgreich agieren können, werden stromintensiven Unternehmen Ausnahmeregelungen gewährt, um so die Umlagen- und Abgabenlast durch die staatlich induzierten Strompreisbestandteile zu reduzieren. Eine Studie des Fraunhofer ISI und des Beratungsunternehmens Ecofys verwies bereits 2015 auf die zentrale Bedeutung der Ausnahmeregelungen für die Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven Industrien, insbesondere der Aluminium- und Chemiebranche. So würde sich „ohne die besondere Ausgleichsregelung die Produktion dieser Güter in Deutschland nicht lohnen und über kurz oder lang eingestellt“. Vor diesem Hintergrund erscheint es von zentraler Bedeutung, dass betroffene Unternehmen sich langfristig auf stabile und wettbewerbsfähige Strombezugskosten verlassen können. Kurzbericht zu Rahmenbedingungen in NRW

Welche Rahmenbedingungen zum industriellen Klimaschutz existieren aktuell in NRW?

Die bevorstehende Transformation in Richtung einer (weitgehend) klimaneutralen Industrie in NRW startet nicht auf der grünen Wiese, sondern unter bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen. Ein umfangreiches Geflecht aus Regulierung und Ordnungsrecht, sowie Abgaben und Förderungen hegt schon im Status quo unternehmerische Aktivitäten ein. Deshalb reicht es nicht aus, nur die im Zielzustand angestrebten Rahmenbedingungen zu bestimmen, sondern auch den dazu notwendigen Transformationspfad auf dem Weg dorthin zu beschreiben, der notwendigerweise am heute gegebenen Regulierungsrahmen ansetzen muss. Dafür ist eine entsprechende Bestandsaufnahme Voraussetzung. Im ersten Forschungsintervall stand das Thema **Wasserstoff** im Mittelpunkt des Themenfeldes. Aus diesem Grund wurde ein erstes Factsheet zur Bestandsaufnahme der regulatorischen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen für (grünen) Wasserstoff erstellt. Soweit möglich, wurde dabei auf die NRW-spezifischen Gegebenheiten eingegangen. Das Factsheet gliedert sich in die drei Oberbereiche *Erzeugung*, *Transport* und *Anwendung* und stellt für diese jeweils die aktuellen Regulierungen sowie die vorherrschende infrastrukturelle Lage dar. Eine Auswahl der wichtigsten Erkenntnisse wird im Folgenden zusammengefasst.

1. Erzeugung

Bestehende Regulierungen:

- **Erzeugungskosten:** Die Erzeugungskosten der Elektrolyse liegen gegenwärtig zwischen 8 ct/kWh (Agora Energiewende 2018) beziehungsweise 18 ct/kWh ($\approx 3 - 6 \text{ €/kgH}_2$) (Energy Brainpool 2018), während die Kosten der Erdgasdampfpreformierung bei etwa 4 ct/kWh liegen ($\approx 1,30 \text{ €/kgH}_2$) (Energy Brainpool 2018). Bloomberg New Energy Finance (2020) geht davon aus, dass grüner Wasserstoff bis zum Jahr 2030 zu Kosten von unter 2 €/kgH₂ und bis 2050 unter 1 €/kgH₂ produzierbar sein wird. Agora Energiewende sieht Preise von 4 €/kgH₂ (2030) beziehungsweise 2,80 €/kgH₂ (2050) als realistisch (Greenpeace Energy 2020). Wesentliche Kostentreiber der Wasserstoffherstellung sind neben den Umwandlungsverlusten, der Auslastung und den Investitionskosten der Anlagen die Strombezugskosten (Agora Verkehrswende und Agora Energiewende 2018). Ein Großteil davon entfällt dabei unter aktuellen Rahmenbedingungen bei Netzstrombezug auf Steuern, Abgaben und Umlagen – auch

weil Elektrolyseure gemäß Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) als Letzt-verbraucher definiert werden.

- **Ausnahmeregelungen für Elektrolyseure bei Netzstrombezug:** Elektrolyseure sind nach § 118 Abs. 6 S. 7 EnWG für 20 Jahre von Netzentgelten befreit. Eine besondere Befreiung von der EEG-Umlage für Elektrolyseure ist nicht gegeben, da das EEG nur eine Befreiung von Speichern mit dem Zweck der Zwischenspeicherung vorsieht. Eine Reduzierung um bis zu 20 Prozent für bestimmte stromkostenintensive Unternehmen § 64 EEG 2017 ist laut dena (2018) in den meisten Fällen nicht anwendbar. Eine Stromsteuerbefreiung des für die Elektrolyse bezogenen Stroms kann für Unternehmen des produzierenden Gewerbes gemäß StromStG § 9a Abs. 1 erfolgen.
- **Ausnahmeregelung für Elektrolyseure bei Eigenstromversorgung:** Bei der Eigenversorgung ist lediglich die EEG-Umlage zu entrichten. Eine (teilweise) Befreiung von der EEG-Umlage nach §§ 61 – 61e EEG 2017 ist unter Umständen zusätzlich möglich.

Bestehende Infrastruktur:

- **Elektrolysekapazitäten:** Im Jahr 2018 wurden 99 Prozent des weltweit verwendeten Wasserstoffs auf Basis fossiler Energien erzeugt (Bloomberg New Energy Finance 2020), die Wasserelektrolyse hat gegenwärtig einen vernachlässigbaren Anteil an der Wasserstoffproduktion. Die Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE (2019) gehen von einem Elektrolysebedarf in Deutschland von 4 bis 20 GW bis zum Jahr 2030, beziehungsweise 50 bis 80 GW bis 2050 aus. Im Jahr 2019 waren circa 35 Pilot- und Demonstrationsanlagen mit einer Leistung von 30 MW in Deutschland in Betrieb.
- **Elektrolyseverfahren:** Derzeit gibt es vor allem drei Verfahren, die sich sowohl im Stand der Technik (Technology Readiness Level, TRL) als auch bei den Investitionskosten (CAPEX) deutlich unterscheiden: *Alkalische Elektrolyse* (CAPEX: 800-1.500 €/kW, TLR: 9), *PEM-Elektrolyse* (CAPEX: 900-1.850 €/kW, TLR: 6-8), *Festoxid-Elektrolyse* (CAPEX: 2.200-6.500 €/kW, TLR: 4-6)

2. Transport

Bestehende Regulierungen:

- **Regulatorische Weichenstellung für Umwidmung und reine H₂-Leitungen:** Damit energieintensive Unternehmen, beispielsweise der Stahl- und Chemiebranche, ihre Prozesse schrittweise auf klimaneutralen Wasserstoff umstellen können, muss auf regulatorischer Seite die Basis für den Aufbau einer Transports- und Handelsinfrastrukturen geschaffen werden. Gemäß dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW 2019b), kann Wasserstoff bereits heute bis zu 10 Prozent in das bestehende Gasnetz eingespeist werden. Bis zum Jahr 2030 soll dies ohne Einschränkungen regulatorisch verbindlich gelten. Eine Beimischung von 20 Prozent gilt des Weiteren als technisch machbar und wird als Zielgröße verfolgt (DVGW 2019b). Ein gemeinsamer Verbändevorschlag (FNB GAS et al. 2020) zur Anpassung des Rechtsrahmens für Wasserstoffnetze im April 2020 forderte unter anderem die Einführung einer eigenen Definition für reine Wasserstoffnetze und Anpassungen im Energiewirtschaftsgesetz und der Gasnetzverordnung, um den Betrieb von reinen

Wasserstoffnetzen mit separater Bilanzierung zu ermöglichen sowie die Ermöglichung einer sortenreinen Einspeisung von Gasen (z.B. Wasserstoff), in das jeweilige Netz, um eine sortenreine Versorgung der Kunden zu gewährleisten.

- **Anpassungen zum grenzüberschreitenden Handel:** Der DVGW (2019a) kritisiert in einem Positionspapier zur Nationalen Wasserstoffstrategie, dass der aktuelle Rechtsrahmen „keinen grenzüberschreitenden Handel und Transport von erneuerbaren Gasen“ erlaube, „De-karbonisierte und teildekarbonisierte Gase nicht anerkannt“ und unterschiedliche Definitionen für erneuerbare Gase im nationalen und europäischen Rechtsrahmen existierten.

Bestehende Infrastruktur:

- **Nutzung vorhandener Gasinfrastruktur:** Derzeit werden nur 5 Prozent des weltweit erzeugten Wasserstoffs gehandelt (Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE 2019), weshalb es bisher keinen signifikanten Wasserstofftransport gibt. Für den schnellen Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft wird eine Nutzung des bestehenden Erdgasnetzes angeregt, entweder durch die anteilige Beimischung von Wasserstoff oder durch die Umwidmung von Gas- zu Wasserstoffnetzen. Dadurch kann zunächst auch ohne größere Zusatzinvestitionen und eine sich erst entwickelnde Wasserstoffnachfrage, eine Transportinfrastruktur geschaffen werden. Gleichzeitig wird so auf die durch Klimaschutzmaßnahmen erwartete, rückläufige Erdgasnachfrage und damit verbundene frei werdende Leitungskapazitäten reagiert (MWIDE 2019). Um auf nationaler Ebene einen großflächigen Netzausbau zu ermöglichen, veröffentlichten die Gasfernleitungsbetreiber (FNB) Anfang 2020 einen ersten Entwurf für ein knapp 6.000 km langes Wasserstoffnetz, das zu 90 Prozent auf dem existierenden Erdgasnetz basiert (Handelsblatt 2020).
- **H₂-Netz in NRW:** Das existierende Wasserstoffpipelinennetz der Air Liquide GmbH in NRW umfasst im Rhein-Ruhr-Gebiet eine Gesamtlänge von rund 240 km und beliefert industrielle Großabnehmer (EnergieAgentur.NRW 2017; UBA 2016). Damit gehört das Ruhrgebiet zu einem der drei großen industriellen Wasserstoffcluster, die derzeit mit grauem Wasserstoff versorgt werden. Im Netzentwicklungsplan Gas 2020 – 2030 wurde das Ruhrgebiet, aufgrund der hohen Anzahl relevanter Industrieanlagen, bereits als „attraktives Zielgebiet für Wasserstoff“ vermerkt (FNB GAS 2019).

3. Anwendung

Bestehende Regulierungen:

- **Umsetzung REDII:** Im Dezember 2018 trat die überarbeitete europäische Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED II (2018/2011/EU) in Kraft. Kraftstoffanbieter werden darin verpflichtet, bis 2030 einen Mindestanteil an erneuerbaren Energien von 14 Prozent am Endenergieverbrauch vorzuweisen. Durch die Novellierung in deutsches Recht können dabei nicht mehr nur Kraftstoffe biogenen Ursprungs, sondern auch gasförmige Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien auf die Treibhausgas-minderungsquote im Kraftstoffsektor angerechnet werden, sofern diese als Zwischenprodukt zur Herstellung konventioneller Kraftstoffe Verwendung finden (Europäische Union 2018).

- **Politikinstrumente zur Nachfrageschaffung:** Um der Industrie den Umstieg auf grünen Wasserstoff zu ermöglichen, werden in der politischen Diskussion verschiedene Instrumente diskutiert, mit denen die derzeitigen Mehrkosten gegenüber fossilen Energieträgern ausgeglichen (Contracts for Difference, Steuer- und Umlagenbefreiung) beziehungsweise die Nachfrage erhöht werden soll (Grüngas-Quote, Förderprogramme).

Bestehende Infrastruktur:

- **Einsatzgebiete:** Etwa 60 TWh Wasserstoff pro Jahr werden derzeit vor allem für die Anwendung in der Stahl- und Chemieindustrie sowie in Raffinerieprozessen eingesetzt (DVGW 2019b), NRW hat dabei mit etwa 40 Prozent den höchsten Anteil (FZ Jülich 2019). Um die Emissionen in diesen Branchen zu senken, wird der gegenwärtig eingesetzte fossile Wasserstoff sukzessive durch klimaneutralen Wasserstoff ersetzt werden müssen. Gleichzeitig wird Wasserstoff auch überall dort Anwendung finden, wo eine Elektrifizierung allein nicht oder nur unter sehr großem Mehraufwand möglich wäre. Für Deutschland wird im Jahr 2050 eine Wasserstoffnachfrage von 250 bis 800 TWh erwartet (Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE 2018).

5.4 Strukturwandelanalyse

Was zeichnet erfolgreiche Strukturwandelprozesse aus?

Der fortschreitende Klimawandel macht eine Dekarbonisierung der Weltwirtschaft unabdingbar. Dadurch stehen etablierte Industrieregionen wie Nordrhein-Westfalen (NRW) vor gewaltigen strukturellen Herausforderungen. Um den notwendigen Transformationsprozess erfolgreich zu gestalten, kann auf die Erfahrungen zahlreicher Strukturwandelprozesse altindustrieller Räume zurückgegriffen werden. Durch die Analyse von 16 nationaler und internationaler Fallbeispiele wurden Einflussfaktoren regionaler Transformationsprozesse abgeleitet und Bezüge zu NRW und IN4climate.NRW hergestellt.

Für die Identifizierung von Einflussfaktoren industrieller Strukturwandelprozesse wurde eine breit angelegte Metaanalyse durchgeführt. Im Rahmen einer Desk Research wurden unterschiedliche Studien analysiert, die sich mit den Dynamiken und Wirkungsmechanismen von regionalen Wandlungsprozessen der Industriestruktur beschäftigen. Der Schwerpunkt lag dabei auf regionalen Transformationen in alt-industriellen Räumen. Es wurden sowohl nationale (beispielsweise Bitterfeld-Wolfen, Leipzig-Halle-Jena, Ostwestfalen-Lippe) als auch internationale Vergleichsregionen (beispielsweise Baskenland, Spanien; Pittsburgh, USA; Randstad, Niederlande) einbezogen, um ein breites Spektrum an räumlich-strukturellen Rahmenbedingungen für Industrietransformationen und deren Einflussfaktoren zu erhalten. Es wurden unter anderem Fallbeispiele im Bereich der Chemie-, Papier- und Stahlindustrie ausgewählt, also in Industriesektoren, die zu großen Teilen in NRW ansässig sind und eine erhebliche Bedeutung für die regionale Wertschöpfung haben. In einem nächsten Schritt wurden die aus den unterschiedlichen Studien identifizierten regionalen Einflussfaktoren für Strukturwandelprozesse zusammengefasst. In mehreren internen Projektworkshops wurde daraus eine übergreifende Systematik entwickelt. Darin werden die vier Oberkategorien „Technisch-infrastrukturelle Grundlagen“, „Cluster und Akteurskonstellationen“, „Institutionelle Rahmenbedingungen“ und „Gesellschaftliche Umfeldfaktoren“ unterschieden. Diesen lassen sich jeweils Unterkategorien beziehungsweise -aspekten zuordnen, wie folgt dargestellt.

Technisch-infrastrukturelle Grundlagen	Cluster und Akteurskonstellationen
<ul style="list-style-type: none"> • Öffentliche Infrastruktur (Breitbandausbau, Energieversorgung etc.) • Infrastrukturen und Technologien für einen möglichen Energie- und Ressourcenaustausch zwischen Unternehmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Regionale Konzentration von Unternehmen • Unternehmensübergreifende Verflechtungsprozesse • Neue Akteurskonstellationen zwischen Wirtschaft und Wissenschaft • Inter- und intrakommunale Zusammenarbeit
Institutionelle Rahmenbedingungen	Gesellschaftliche Umfeldfaktoren
<ul style="list-style-type: none"> • (Regionale) Industrie- und Innovationspolitik • Politische Richtungssicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Standortattraktivität und Arbeitsmarkt • Gesellschaftliche Beteiligung und Akzeptanz für neue Infrastrukturen und Technologien

Abbildung 20: Zusammenfassung der identifizierten Einflussfaktoren regionaler Transformationsprozesse

Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass die avisierte regionale Transformation einer fossilbasierten Grundstoffindustrie zur Klimaneutralität in NRW nur schwer vergleichbar mit anderen Regionen ist. Einige der untersuchten Fallbeispiele wie beispielsweise Manchester/Liverpool, Gauteng oder Randstad haben sich in ihrem Transformationsprozess nachhaltigen Zielen verschrieben und diese in Leitlinien, Strategien und Visionen integriert. Die bevorstehende Transformation in NRW mit ihrem Umfang und Intensität stellt jedoch ein weltweit bisher einzigartiges Beispiel dar. Zum anderen wird deutlich, dass die Einbindung aller Akteursgruppen, inklusive gesellschaftlicher Stakeholder und das Vorhandensein von steuernden Intermediären eine zentrale Voraussetzung für erfolgreiche Strukturwandelprozesse darstellt. Zudem wird die Bedeutung einer reaktiven Industriepolitik deutlich, die gezielt Innovationen fördert und die Bildung neuer Technologiecluster ermöglicht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden drei Fokusthemen ausgewählt, die im Hinblick auf ihre Relevanz für NRW näher betrachtet werden. Dazu zählen „Cluster und Akteurskonstellationen“, „Institutionelle Rahmenbedingungen“ und „Gesellschaftliche Umfeldfaktoren“. Aufgrund der Projektstruktur lag der Fokus dieser Arbeit auf der gesellschaftlichen Perspektive, weshalb eine nähere Betrachtung der infrastrukturellen und technischen Voraussetzungen nicht erfolgt, zumal diese Themen bereits zentraler Bestandteil weiterer Aktivitäten in SCI4- und IN4climate.NRW darstellen. Einer kurzen theoretischen Einordnung der drei genannten Fokusthemen folgt im Bericht jeweils eine Untersuchung der vorherrschenden Situation in NRW. Im Anschluss wurden aus den erfolgten Betrachtungen relevante Bezüge zu IN4climate.NRW herausgearbeitet, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

Cluster und Akteurskonstellationen

Aus regionalbasierten Verflechtungen zwischen Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik können positive Netzwerkeffekte für gemeinsame Lern- und Innovationsprozesse resultieren und damit auch die Innovativität und Wirtschaftsentwicklung einer Region unterstützt werden. Vor diesem Hintergrund kann IN4climate.NRW als ein strukturpolitisches Instrument für eine brancheninterne Transformation der energieintensiven Grundstoffindustrie gesehen werden. Als zentraler Intermediär zwischen der Industrie, Forschungseinrichtungen sowie dem Land NRW werden die interorganisationalen Beziehungen durch formalisierte Gremien und Projekte geschaffen und die

akteursübergreifende Zusammenarbeit gefördert. Einer großen Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang auch wissenschaftlichen Akteuren wie SCI4climate.NRW zu, die Forschungsergebnisse bereitstellen und für eine Diffusion neuer Erkenntnisse beitragen. Als zentrale Austauschplattform trägt die Initiative zu einem Wissenstransfer zwischen den Akteuren bei und unterstützt den Aufbau von vertrauensvollen Beziehungen. Als „weiche“ Standortfaktoren können diese Faktoren eine wichtige Grundlage für konkrete Umsetzungsmaßnahmen und weitere Projektkooperationen durch die beteiligten Unternehmen sein. Über eine langfristige Etablierung der Strukturen von IN4climate.NRW, die Realisierung von konkreten Projekten und eine fortgeschrittene Transformation zu einer dekarbonisierten Industriestruktur, können neben Wissenstransfer langfristig auch weitere Netzwerkvorteile wie der Austausch von Ressourcen, Fachkräften und damit insgesamt eine Erhöhung der regionalen Innovativität und Wettbewerbsfähigkeit des Standorts NRW befördert werden.

Institutionelle Rahmenbedingungen

Die Förderung der intermediären Funktion von IN4climate.NRW bildet einen zentralen Kern im strukturellen Wandlungsprozess. Durch die Vernetzung aller beteiligten Akteure kann eine gezielte Ausrichtung der Industrie- und Innovationspolitik an den regionalen Bedürfnissen geschaffen werden. Dadurch werden nicht nur einzelne Unternehmensprojekte gefördert, sondern auch über die Grundstoffindustrien hinweg die gemeinsame Technologie- und Innovationsforschung unterstützt und Synergien erfolgreich genutzt. Dieser offene Dialog ermöglicht zum einen den Austausch zwischen den beteiligten Akteuren, zum anderen aber auch konkrete Maßnahmen, wie zum Beispiel die Veröffentlichung gemeinsamer Positionspapiere der Initiative. Zudem übernimmt In4climate.NRW die Koordination von unternehmens- und branchenübergreifende Förderprogramme auf nationaler und europäischer Ebene und ermöglicht dadurch zusätzliche (finanzielle) Möglichkeiten. Eine gezielte Ausrichtung der politischen Handlungen und eine gemeinsame, langfristige Vision des Wandlungsprozesses stellen ausschlaggebende Faktoren für eine erfolgreiche Transformation dar. Es ist anzunehmen, dass IN4climate.NRW auch in Zukunft eine unterstützende Rolle in diesem Prozess zukommt und als Austauschplattform eines regional basierten Innovationsprogramms fungieren kann.

Gesellschaftliche Umfeldfaktoren

Zu den aus der Metaanalyse herausgearbeiteten Erfolgsfaktoren gesellschaftlicher Umfeldfaktoren zählen neben der gesellschaftlichen Akzeptanz, die Schaffung von Bildungs- und Qualifizierungsmöglichkeiten, das kulturelle Angebot sowie Stadtentwicklungs- und Erneuerungsmaßnahmen. Es zeigt sich, dass NRW in vielen dieser Bereiche bereits gut aufgestellt ist. Dazu tragen vor allem die öffentliche Verkehrsanbindung, die vorherrschende Hochschul- und Forschungslandschaft sowie die Möglichkeit von Informations- und Beteiligungsformaten für die Bürger bei. Dennoch existiert in allen Bereichen nach wie vor Verbesserungspotenzial. Insbesondere beim Breitbandausbau und der Verbesserung der Lebensqualität in ländlichen und abgehängten Gebieten hat NRW Aufholbedarf. Über den geplanten Austausch mit zivilgesellschaftlichen Stakeholdern in IN4climate.NRW soll eine weitere Akteurssicht in den initiierten Dialogprozess integriert werden, die vermehrt gesellschaftliche Standpunkte vertritt und für diese eintreten kann.

Aus diesen Ergebnissen ließen sich eine Vielzahl offener Forschungsfragen ableiten. In einer gemeinsamen Diskussionsrunde mit den in IN4climate.NRW beteiligten Akteuren, soll zu Beginn des 2. Forschungsintervalls eine Auswahl möglicher Forschungsfragen getroffen werden, die im Verlauf des Intervalls von SCI4climate.NRW wissenschaftlich aufgearbeitet werden sollen. Als Resultat ist die gemeinsame Ableitung von Handlungsempfehlungen für den Transformationsprozess in NRW und der

Funktion von IN4climate.NRW in diesem Prozess wünschenswert. Die offenen Forschungsfragen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen.

Auswahl offener Forschungsfragen (zusammengefasst), die für das 2. Forschungsintervall für SCI4climate.NRW zur Diskussion stehen:

- Welche Anhaltspunkte gibt es für die Etablierung eines Clusters für die Industriedekarbonisierung durch IN4climate.NRW? Welche Berührungspunkte gibt es mit anderen Netzwerk-/ Cluster-Strukturen der Industrie in NRW und wie können gemeinsame Synergien genutzt werden?
- Welche intermediären Funktionen erfüllt und sollte IN4climate.NRW zukünftig für die beteiligten Akteure erfüllen (Austauschplattform, Außenkommunikation, Interessensvertretung etc.)?
- Welche Innovationspotenziale können durch die Arbeit von IN4climate.NRW für die Grundstoffindustrien gehoben werden? Welche regionalen Bedürfnisse ergeben sich daraus in Bezug auf (zusätzliche) Förder- und Innovationsprogramme?
- Welche Rolle spielen Start-ups und innovative Kleinunternehmen für strukturelle Veränderungen der Industrielandschaft in NRW? Inwieweit kann IN4climate.NRW hier als Bindeglied zwischen Industrieunternehmen und Innovationszentren (beispielsweise Start-up Hubs) fungieren?
- Inwiefern ist die Integration der Gesellschaft als vierte Akteursgruppe im IN4climate.NRW-Prozess erwünscht? Welche Partizipationsmöglichkeiten werden hierbei gesehen?

Abbildung 21: Auswahl offener Forschungsfragen für A 4.5 im 2. Forschungsintervall

5.5 Forschungsfragen für das 2. Forschungsintervall

Im 2. Forschungsintervall erfolgt eine Konkretisierung der bislang abstrakt analysierten Politikmaßnahmen und Prozessschritte. Deshalb orientiert sich die Evaluation von Maßnahmen zum einen verstärkt an der aktuellen politischen Entwicklung und begleitet zum anderen das in Themenfeld 3 entwickelte Klimaschutzszenario, das einen Transformationspfad in Richtung Treibhausgasneutralität für NRW beschreibt. Dazu passend soll die Ausgestaltung von adäquaten Politikmaßnahmen geprüft und mögliche Maßnahmenpakete entwickelt werden. In ähnlicher Weise wird sich auch die Analyse des Transformationsprozesses stärker an diesem Szenario orientieren und die im 1. Forschungsintervall gewonnenen Erkenntnisse in Anwendung bringen sowie hinterfragen, welchen Beitrag IN4climate.NRW dazu leisten kann. Ebenfalls konkreter sollen zentrale Einflussfaktoren für innovative Geschäftsmodelle analysiert werden. Dazu erfolgt eine Untersuchung der Forschungs- und Entwicklungslandschaft in NRW sowie der entsprechenden Aktivitäten auf Unternehmensseite. Weitere Themen sind Fachkräfte- und Qualifikationsbedarfe und das Thema Digitalisierung.

6 Anhang

Tabelle 5: Szenarien der Sortierselektivität bzw. Effizienz¹¹

Sortierfraktion [<i>pot. Substitution</i>]	SQ	BAT	max	Pyrolyse
Folie [<i>PE-LD</i>]	6,7%	8,5%	13,0%	8,5%
Mix Polyolefin (MPO, flex) [<i>PE-HD&PP</i>]	-	10,2%	12,0%	10,2%*
Polypropylen (rigid) [<i>PP</i>]	4,0%	6,0%	9,0%	6,0%
PET [<i>PET</i>]	2,0%	2,0%	6,0%	2,0%
Polyethylen (rigid) [<i>PE-HD</i>]	2,0%	2,5%	5,0%	2,5%
MKS (Mischkunststoffe) [<i>PE-HD&PP</i>]	4,0%	-	-	-
PS [<i>PS</i>]	0,4%	1,0%	1,5%	1,0%
Weißblech	11,0%	10,2%	12,0%	10,2%
Aluminium	2,8%	3,0%	3,0%	3,0%
Getränkekarton	5,6%	6,0%	8,5%	6,0%
PPK	2,2%	5,0%	7,0%	5,0%
MKS für EBS (LHV hoch) [<i>Lignit</i>]	3,8%	15,7%	-	15,7%*
Sortierreste (EBS – LHV niedrig) [<i>Lignit</i>]	55,5%	29,9%	23,0%	29,9%

* Fraktion zur Pyrolyse

Substitution – Pyrolyse Produkte: Erdgas, Naphtha, Diesel, Heizöl, Koks

¹¹ Szenarien der Sortierselektivität bzw. Effizienz, Anteil den Sortierfraktionen in Massenprozent (M.%): Status quo (SQ), beste erreichbare technologiebedingte Ergebnis (BAT) theoretisches Maximum nach Abfallzusammensetzung (max); Die potenziell substituierbaren Primärmaterialien sind nach dem Namen der Sortierfraktion in Klammern aufgeführt (z.B.: „Folie [PE-LD]“).