

SCI4climate.NRW 2018-2022: Forschung für eine klimaneutrale und zukunftsfähige Industrie

Abschlussbericht

SCI4climate.NRW ist ein vom Land Nordrhein-Westfalen gefördertes Forschungsprojekt zur Unterstützung der Entwicklung einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Industrie bis spätestens zum Jahr 2045. Das Projekt ist innerhalb der Initiative IN4climate.NRW unter dem Dach der Landesgesellschaft NRW.Energy4Climate verankert und repräsentiert die Seite der Wissenschaft. Das Projekt erforscht die technologischen, ökologischen, ökonomischen, institutionellen und infrastrukturellen Systemherausforderungen für produzierende Unternehmen in Nordrhein-Westfalen. Im Rahmen des Projekts werden in einem transdisziplinären Prozess gemeinsam mit Partner*innen aus Industrie und Wissenschaft mögliche Pfade und deren Auswirkungen hin zu einer klimaneutralen Industrie erforscht.

Bibliographische Angaben

Herausgeber: SCI4climate.NRW
Veröffentlicht: Oktober 2023
Autor:innen (jeweils alphabetische Reihenfolge): **BFI:** Theresa Overbeck, Gerald Stubbe
Fraunhofer UMSICHT: Christoph Glasner, Torsten Müller, Ulrich Seifert
Institut der deutschen Wirtschaft: Andreas Fischer, Malte Küper, Sarah Lichtenthäler, Thilo Schaefer, Finn Arnd Wendland
RWTH Aachen: Ali Abdelshafy, Rainer Radloff, Christiane Reinert, Grit Walther, Christian Zibunas
VDZ: Sebastian Palm, Johannes Ruppert
Wuppertal Institut: Thomas Adisorn, Dagmar Kiyar, Katharina Knoop, Stefan Lechtenböhmer, Anna Leipprand, Frank Merten, Lea Pattberg, Sascha Samadi, Sören Steger, Lena Tholen
Kontakt: anna.leipprand@wupperinst.org
Bitte zitieren als: SCI4climate.NRW 2023: SCI4climate.NRW 2018-2022: Forschung für eine klimaneutrale und zukunftsfähige Industrie. Abschlussbericht. Aachen, Düsseldorf, Köln, Oberhausen, Wuppertal.

Inhaltsverzeichnis

1	Transformation der Industrie zur Klimaneutralität: Der Beitrag von SCI4climate.NRW	9
1.1	Die Rolle der Industrietransformation für die Klimaschutzziele.....	9
1.2	SCI4climate.NRW 2018-2022: Ziele und Aufbau des Projekts.....	11
1.3	Zusammenarbeit mit IN4climate.NRW	13
1.4	Die Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW 2018-2022 im Überblick.....	13
2	Technologien und Infrastrukturen (Themenfeld 1)	18
2.1	Ziele, Themen und Forschungsfragen	18
2.2	Technologien.....	20
2.3	Wasserstoff	22
2.4	Kohlendioxid.....	27
2.5	Circular Economy.....	29
2.6	Wärme.....	29
2.7	Planungs- und zulassungsrechtliche Rahmenbedingungen	31
2.8	Optimierung von Energiesystemen	33
2.9	Literaturverzeichnis inklusive Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW.....	36
3	Produkte und Wertschöpfungsketten (Themenfeld 2).....	37
3.1	Ziele, Themen und Forschungsfragen	37
3.2	Die industrielle Transformation in der Kunststoffbranche.....	38
3.2.1	Kunststoffe und chemisches Recycling (WI und OM).....	38
3.2.2	Analyse des Potenzials der Kreislaufschließung aus Produktperspektive: Beispiel Expandiertes Polystyrol (EPS) aus der Gebäudedämmung (OM).....	40
3.3	Kreislaufwirtschaft im Bausektor	45
3.3.1	Modellierung der Material- und Abfallmengen des Wohngebäudebestandes (WI)	45
3.3.2	Modellierung der Wohnungsbestandsentwicklung (OM, Abdelshafy und Walther 2023)	48
3.3.3	Kopplung von CO ₂ -Abscheidung und -Nutzung mit der Bauindustrie (OM, Abdelshafy und Walther 2022a)	49
3.4	Auswirkungen der industriellen Transformation im Stahlsektor auf Material- und Energieflüsse (OM, Radloff/Abdelshafy/Walther 2023).....	51
3.5	Intersektionale Interdependenzen der Materialflüsse von Stahl-, Zement- und Bauindustrie in NRW (OM, Abdelshafy und Walther 2022b)	54
3.6	Technologiebasierte Potenziale für Treibhausgasreduktionen in NRWs energieintensiven Prozessindustrien und zugehörige Ressourcenbedarfe (LTT).....	56
3.6.1	Carbon Capture and Utilization in NRWs Chemieindustrie (Zibunas et al. 2020)	57
3.6.2	Direkte und indirekte Elektrifizierung energieintensiver Industrien (SCI4climate.NRW 2021b)	60

3.6.3	Elektrifizierung, Biomassenutzung, und Steigerung von Recyclingquoten (Bühner 2022)	61
3.7	Die Rolle der Designphase bei der Schaffung nachhaltiger Produkte (Beispiele: Kunststoffe und Konstruktion) (WI)	63
3.8	Weitere Arbeiten im Themenfeld	67
3.9	Literaturübersicht inklusive Vorträge und Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW	68
4	Szenarien und Transformationspfade (Themenfeld 3).....	72
4.1	Ziele, Themen und Forschungsfragen	72
4.2	Entwicklung eines Klimaschutzszenarios für Deutschland mit einem Fokus auf die Grundstoffindustrie.....	73
4.2.1	Transformation der Stahlindustrie im Szenario S4C-KN.....	73
4.2.2	Transformation der chemischen Industrie im Szenario S4C-KN.....	75
4.2.3	Transformation der Zementindustrie im Szenario S4C-KN	78
4.3	Vergleich der in verschiedenen vorliegenden Klimaschutzszenarien beschriebenen Transformationspfade für den Industriesektor	82
4.4	Renewables Pull – Analysen zu möglichen zukünftigen Verlagerungen industrieller Produktion aufgrund regional abweichender Bedingungen für erneuerbare Energien.....	83
4.4.1	Einführung in den Renewables-Pull-Effekt.....	83
4.4.2	Mögliche Auslöser des Renewables-Pull-Effekts.....	85
4.4.3	Veranschaulichung des Renewables-Pull-Effekts in einem Zwei-Länder-Modell.....	85
4.4.4	Eigenschaften industrieller Produktion als Indikatoren für die zukünftige Relevanz von Renewables Pull	88
4.4.5	Identifizierter weiterer Forschungsbedarf zu Renewables Pull	89
4.5	Modellierung des europäischen Produktionssystems der Petrochemie.....	89
4.6	Literaturverzeichnis inklusive Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW.....	91
5	Rahmenbedingungen (Themenfeld 4)	93
5.1	Ziele, Themen und Forschungsfragen	93
5.2	Politikinstrumente und Handlungsoptionen	96
5.3	Innovationen und Geschäftsmodelle	101
5.4	Gesellschaft und Strukturwandel	112
5.5	Beschleunigung von Genehmigungsverfahren.....	119
5.6	Literaturverzeichnis inklusive Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW.....	119
6	Veranstaltungen und Vernetzung	122
6.1	Konferenzreihe „Wissenschaft trifft Wirtschaft“	122
6.1.1	Wissenschaft trifft Wirtschaft I, 2020: Forschung für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Grundstoffindustrie	122
6.1.2	Wissenschaft trifft Wirtschaft II, 2021: Forschung für eine klimaneutrale Zukunft	125
6.1.3	Wissenschaft trifft Wirtschaft III, 2022: Industriewandel gestalten, Klimaneutralität beschleunigen	126

6.2	Projektübergreifender Workshop zum Thema CO ₂ -Infrastruktur in NRW	128
6.3	Internes Austauschformat „Scientific Academy“	129
6.4	Promotionsvorhaben in SCI4climate.NRW und Promotionskolleg	130
6.5	Lehrveranstaltungen	134
6.5.1	Projektmodul „Carbon Management Consulting: Entwicklung eines Konzepts für regionale Klimaneutralität“ an der RWTH Aachen	134
6.5.2	Leonardo-Vorlesung „Transformation zu einer klimaneutralen Industrie“ an der RWTH Aachen	135
6.6	Literaturverzeichnis inklusive Vorträge und Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW .	135

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Tätigkeitsschwerpunkte der Projektpartner von SCI4climate.NRW in den Themenfeldern	12
Abbildung 2-1: Bedarf an neuen EE-Erzeugungskapazitäten in Deutschland zur Deckung der unteren Nachfrageerwartung laut Nationaler Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030 (Egenolf-Jonkmanns et al. 2021)	24
Abbildung 2-2: Stromerzeugung und -bedarf in Spanien für die Jahre 2014, 2018 und 2030, mögliche resultierende H ₂ -Produktionsmenge in 2030 sowie langfristige technische Potenziale für die EE-Strom und H ₂ -Erzeugung. (SC4climate.NRW 2021a)	25
Abbildung 2-3: Bewertung der Transportoptionen hinsichtlich der generellen Machbarkeit für einen großskaligen Wasserstoffimport in 2030 (Quelle: eigene Darstellung)	26
Abbildung 2-4: 4-Stufen-Modell einer klimaneutralen Prozesswärmeversorgung (©IN4climate.NRW)	30
Abbildung 2-5: Mögliche Technologiepfade für eine erneuerbare Prozesswärmebereitstellung oberhalb von 100 °C	31
Abbildung 2-6: Anwendung des SecMOD-Frameworks in vier Schritten (basierend auf Reinert et al. (2022)).	34
Abbildung 3-1: Sankey-Diagramm Aufkommen von Kunststoffabfällen, Verwertungswege und Einsatzgebiet des Re-Granulats (Quelle: In4climate.NRW 2020a).....	39
Abbildung 3-2: Teilergebnisse der durchgeführten Abfallmassenprognose	42
Abbildung 3-3: Abstrahierende Abbildung der Verwertungspfade (Prozesskette) von Recycling- und Verwertungsoptionen für EPS-basierte WDVS und EPS aus anderen EoL Stoffströmen (Abbildung basiert auf Schleier et al. (2022)).....	43
Abbildung 3-4: Mögliche standortoptimierte Netzwerkkonfigurationen für das Recycling von EPS-basierten WDVS EoL Stoffströmen bei einer angenommenen Kapazität der Recyclinganlagen von 10 kt/a in (a) und 3,3 kt/a in (b).....	44
Abbildung 3-5: Altersverteilung des Wohngebäudebestandes in NRW	46
Abbildung 3-6: Kumulierte Materialmassen und -zusammensetzung durch Abriss und Zubau (2022-2060).....	47
Abbildung 3-7: Exemplarische Ergebnisse (Abdelshafy und Walther 2023)	49
Abbildung 3-8: Beispiel für die Geodatenanalyse (Standorte und Kapazitäten) der Produzenten und Recycler (Abdelshafy und Walther 2022a)	50
Abbildung 3-9: Ergebnisse der Location-Allocation-Modelle (Abdelshafy und Walther 2022a)	51

Abbildung 3-10: Vereinfachtes Schema des Prozessmodells der auf H ₂ -DR umgestellten Primärstahlerzeugung nach Plänen von thyssenkrupp mit den wesentlichen Stoffströmen und benötigten elektrischen Leistungen Pi (Radloff, R.; Abdelshafy, A; Walther, G. 2023)	52
Abbildung 3-11: Ein Beispiel für die Szenarioanalyse (Szenario High-H2 2045) (Radloff, R.; Abdelshafy, A; Walther, G. 2023)	54
Abbildung 3-12: Stoff- und Energieströme der Stahlindustrie in NRW (Abdelshafy und Walther 2022b)	55
Abbildung 3-13: Stoff- und Energieströme der Zement- und Bauindustrie sowie der Stein- und Braunkohlekraftwerke in NRW (Abdelshafy und Walther 2022b).....	56
Abbildung 3-14: Treibhausgasemission der Chemieindustrie über den gesamten Lebenszyklus (cradle to grave) für die gesamte Jahresproduktion der betrachteten Chemikalien und Kunststoffe in Nordrhein-Westfalen	58
Abbildung 3-15: Treibhausgasemission der Chemieindustrie über den gesamten Lebenszyklus (cradle to grave) für die gesamte Jahresproduktion der betrachteten Chemikalien und Kunststoffe in Nordrhein-Westfalen	60
Abbildung 3-16: Aufteilung des jährlichen Strombedarfs für NRWs Chemie-, Stahl-, und Zementindustrie bei Einsatz von Elektrifizierungstechnologien für Produktionsvolumina in 2020.	61
Abbildung 3-17: Jährliche Treibhausgasemissionen der Chemie-, Stahl-, und Zementindustrie in NRW in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Biomasse und erneuerbarem Strom.....	62
Abbildung 4-1: Entwicklung der Eisen- und Stahl-Kapazitäten im Szenario S4C-KN.....	74
Abbildung 4-2: Entwicklung des Primär- und Endenergieeinsatzes in der Stahlindustrie	75
Abbildung 4-3: Endenergiebedarf und Dampfbereitstellung nach Energieträgern in der chemischen Industrie.....	76
Abbildung 4-4: Direkte THG-Emissionen der chemischen Industrie in Deutschland („Scope 1“).....	77
Abbildung 4-5: Produktion von High-Value Chemicals (HVC) nach Routen.....	78
Abbildung 4-6: Entwicklung der Zementbestandteile (ohne neue Bindemittel). Die angegebenen Prozentwerte beziehen sich auf den durchschnittlichen Klinkeranteil im Zementmix.	80
Abbildung 4-7: Entwicklung der CO ₂ -Mengen in der Zementindustrie	82
Abbildung 4-8: Schematische Darstellung des Renewables-Pull-Effekts	86
Abbildung 4-9: Marginale Bereitstellungskosten für high-value chemicals (HVC) in einem beispielhaften Szenario	90
Abbildung 4-10: Simuliertes Produktionsnetzwerk der chemischen Industrie.....	91
Abbildung 5-1: Die vier Perspektiven zur Bewertung von Politikinstrumenten	96
Abbildung 5-2: Weitere mögliche Ansätze für den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft.....	99

Abbildung 5-3: Vor- und Nachteile des Green Public Procurement (GPP) anhand verschiedener Kriterien (Fischer und Küper 2021).....	101
Abbildung 5-4: Abfallaufkommen der Kategorie Siedlungsabfälle (Statistisches Bundesamt, 2020b)	104
Abbildung 5-5: Klimaschutzpatentanmeldungen 2010-2018 (absolute und relative Entwicklung) (Küper et al. 2021)	106
Abbildung 5-6: Klimaschutzpatentanmeldungen nach Technologiebereichen (Küper et al. 2021)....	106
Abbildung 5-7: Akteurskonstellation im Bereich F&E	107
Abbildung 5-8: Relevanz der Forschungsbedingungen in NRW	108
Abbildung 5-9: Expositionsmatrix: EU-Taxonomie, Branchen und Berufe (Wendland 2022).....	111
Abbildung 5-10: Zusammenfassung der identifizierten Einflussfaktoren regionaler Transformationsprozesse	114
Abbildung 5-11: Auswahl offener Forschungsfragen für A 4.5 im 2. Forschungsintervall.....	116
Abbildung 5-12: Die Rolle der Kommune bei der Industrietransformation (Tholen et al. 2022)	118
Abbildung 5-13: Eckpunkte zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren (IN4climate.NRW 2022a)	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW 2018-2022.....	14
Tabelle 1-2: Unter Mitarbeit von SCI4climate.NRW entstandene Veröffentlichungen von IN4climate.NRW 2018-2022	17
Tabelle 3-1: Allgemeine Ansatzpunkte für kreislauforientiertes Produktdesign	64
Tabelle 3-2: Designszenarien für innovative Lebensmittellogistik- und Verpackungssysteme	65
Tabelle 3-3: Designimpulse und Interventionspunkte für den Umbau von Bestandsgebäuden - 3 Designszenarien.....	67
Tabelle 5-1: Bewertung der Politikinstrumente anhand zuvor entwickelter Kriterien.....	98
Tabelle 5-2: Mittel aus den EU-Forschungsprogramm Horizon 2020.....	107
Tabelle 5-3: Unterschiede zwischen Industrieforschung und (außer-)universitärer Forschung.....	109

1 Transformation der Industrie zur Klimaneutralität: Der Beitrag von SCI4climate.NRW

1.1 Die Rolle der Industrietransformation für die Klimaschutzziele

Mit dem Pariser Abkommen haben sich die Vereinten Nationen zum Ziel gesetzt, den Anstieg der Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Laut Weltklimarat (IPCC) ist hierfür eine schnelle und tiefgreifende Senkung der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren notwendig; global müssen die Treibhausgasemissionen bis Anfang der 2050er Jahre (1,5 Grad) bzw. bis Anfang der 2070er Jahre (2 Grad) auf netto Null sinken.

Das deutsche Klimaschutzgesetz zielt vor diesem Hintergrund auf Klimaneutralität bis 2045 und auf eine Senkung der Emissionen von 65 Prozent bis 2030. Nordrhein-Westfalen hat sich mit seinem Klimaschutzgesetz 2021 ebenfalls die Klimaneutralität bis 2045 zum Ziel gesetzt. Auf europäischer Ebene ist das Erreichen von Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 das Ziel; es soll durch die Maßnahmen des Fit-for-55-Pakets umgesetzt werden.

Der Industrietransformation kommt bei der Zielerreichung eine zentrale Rolle zu, da die Industrie für einen großen Teil der Gesamtemissionen verantwortlich ist und maßgeblich zum Klimawandel beiträgt. In Deutschland machten die Emissionen aus der Industrie im Jahr 2021 knapp ein Viertel der Gesamtemissionen aus; davon stammen rund zwei Drittel aus der der Stahl-, Chemie- und Zementproduktion. Die Industrietransformation bietet damit einen großen Hebel, um Klimaneutralität zu erreichen. Außerdem ist sie notwendig, um langfristig international wettbewerbsfähig zu bleiben.

Entsprechend hat die Industrietransformation in den letzten Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Politisch wird sie auf verschiedenen Ebenen, etwa durch den European Green Deal, das Fit-for-55-Paket und den Green Deal Industrial Plan der EU, aber auch auf nationaler Ebene durch Förderprogramme, Gesetzgebung und die Entwicklung nationaler Strategien etwa zu Wasserstoff, Industrie, Kreislaufwirtschaft und Kohlenstoffmanagement, vorangetrieben. Die Verschärfung der politischen Klimaschutzziele erhöht dabei den Handlungsdruck. Die Transformation muss auf allen Ebenen (technisch, planerisch und organisatorisch, politisch, gesellschaftlich) beschleunigt werden, um den Umstieg auf vollständig klimaneutrale Verfahren rechtzeitig zu ermöglichen. Ein Großteil der industriellen Anlagen, welche in der Regel eine lange Lebensdauer haben, müssen bis 2030 erneuert werden. Anlagen, die in den kommenden Jahren neu gebaut werden, müssen bereits klimaneutral produzieren oder langfristig auf klimaneutrale Produktion umgestellt werden können, da andernfalls Emissionen erneut auf lange Sicht festgelegt werden.

Viele technische Lösungen für die Industrietransformation sind bereits verfügbar oder sind nicht mehr weit von der Marktreife entfernt. Sie müssen in den kommenden Jahren im industriellen Maßstab eingesetzt werden, um die CO₂-Emissionen zu senken. Zu den Lösungen gehören ein intensiver Ausbau

der Kreislaufwirtschaft, der effizientere Umgang mit Energie, und der Ersatz von fossiler Energie durch erneuerbar produzierten Strom im Rahmen direkter Elektrifizierung oder durch mit erneuerbaren Energien produzierten Wasserstoff. CO₂-Mengen, deren Entstehung nicht gänzlich vermieden werden kann, lassen sich auffangen, weiterverwenden (Kohlenstoffdioxidabscheidung und -nutzung, CCU) oder dauerhaft unterirdisch einlagern (Kohlenstoffdioxidabscheidung und -speicherung, CCS). Mit den genannten Strategien und Lösungen können energieintensive Prozesse wie die Produktion von Stahl, Zement und Chemikalien ganz oder weitestgehend klimaneutral werden. Die Umsetzung dieser Strategien erfordert jedoch tiefgreifende Veränderungen, welche weitreichende Effekte auf Wertschöpfungsketten nach sich ziehen können. Auch die Faktoren, die Standortentscheidungen von Unternehmen prägen, können sich im Zuge der Transformation verändern.

Viele Industrieunternehmen entwickeln bereits Strategien für eine zukünftige Klimaneutralität und planen die Umsetzung und Investitionen in neue Technologien. Sie können der Politik zunehmend widerspiegeln, wo sie Unterstützung benötigen, und werden damit auch zum Treiber politischer Reformen. Gleichzeitig stellt die Transformation zur Klimaneutralität eine große Herausforderung für die Industrie dar. Ein Technologiewechsel auf klimaneutrale Verfahren ist häufig sehr kostenintensiv. Um die Unternehmen zu unterstützen und Arbeitsplätze zu sichern, muss die Politik frühzeitig Rahmenbedingungen schaffen, die Investitionen in klimafreundliche Anlagen ermöglichen.

Dabei werden die Voraussetzungen und Rahmenbedingungen auch von globalen und geopolitischen Entwicklungen beeinflusst, sodass Strategien angepasst und neu ausgerichtet werden müssen. So haben etwa die Corona-Pandemie, vor allem aber der Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine weitreichende Konsequenzen nach sich gezogen. Gestiegene Preise für Energie und Rohstoffe führen zu zusätzlichen Kosten für die Unternehmen. Um von russischen Energieimporten unabhängig zu werden und eine Gasmangellage zu vermeiden, muss der Erdgasverbrauch auch in der Industrie reduziert werden. Erdgas spielt in vielen Transformationsszenarien für die Industrie in den kommenden Jahren noch eine große Rolle als Übergangslösung. In der Stahlindustrie wird der Erdgasverbrauch im Zuge der Transformation voraussichtlich übergangsweise zunehmen. Gleichzeitig erzeugt der Krieg jedoch Handlungsdruck für einen insgesamt schnelleren Gasausstieg. Es müssen einerseits kurzfristig Alternativen zum Einsatz von Erdgas gefunden werden, um die Versorgungssicherheit weiterhin gewährleisten zu können. Andererseits dürfen die Lösungen für die Energiekrise nicht dauerhaft zu Lasten der Klimaschutzziele gehen, wie es durch das Ausweichen auf Kohle oder Öl der Fall wäre. Für die Industrie geht es in dieser Situation darum, kurzfristig die akute Krise zu bewältigen, aber trotzdem die Weichen für die Transformation hin zur Klimaneutralität zu stellen.

Die große Herausforderung der Industrietransformation ist von besonderer Bedeutung für Nordrhein-Westfalen als eine der wichtigsten Industrieregionen Deutschlands und Europas, in der etwa die Hälfte der Anlagen der energieintensiven Grundstoffindustrie Deutschlands verortet sind und in der die industrielle Produktion wirtschaftlich eine besonders große Rolle spielt. Gleichzeitig kann eine gelingende Transformation der Industrie in NRW als Blaupause für andere Regionen dienen. Der

vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse des Forschungsprojekts SCI4climate.NRW 2018-2022 dar, welches die Industrietransformation in NRW wissenschaftlich begleitet und untersucht hat.

1.2 SCI4climate.NRW 2018-2022: Ziele und Aufbau des Projekts

SCI4climate.NRW 2018-2022 war ein dialogorientiertes Forschungsprojekt, das im Rahmen der Initiative IN4climate.NRW (siehe Abschnitt 1.3) in enger Zusammenarbeit mit Unternehmen aus der energieintensiven Grundstoffindustrie in Nordrhein-Westfalen Wege hin zu einer treibhausgasneutralen Zukunft untersucht hat. Beteiligt waren das Wuppertal Institut, das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, das Institut der deutschen Wirtschaft (IW Köln), die RWTH Aachen (Lehrstühle Operations Management OM und Technische Thermodynamik LTT), die VDZ Technology gGmbH (VDZ) und die VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI). Im Rahmen von SCI4climate.NRW 2022-2025 wird diese Forschung mit neuen Themenschwerpunkten und in etwas veränderter formaler Konstruktion auch nach 2022 weitergeführt.

Das Ziel von SCI4climate.NRW 2018-2022 war die wissenschaftliche Betrachtung der Systemherausforderungen, die sich für das Land Nordrhein-Westfalen mit seinem hohen Anteil an Unternehmen der energieintensiven Grundstoffindustrie bei einer Transformation hin zu einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Industrie ergeben. Die wissenschaftlichen Arbeiten und erstellten Studien sollten 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. Das Projekt leistete Beiträge für eine branchenübergreifende Forschung für technische, infrastrukturelle oder organisatorische Innovationen. Weitere Beiträge waren die enge Interaktion mit Expert*innen der Industrie, die Bereitstellung interdisziplinärer Kompetenzen und die Vernetzung und Verknüpfung verschiedener relevanter Forschungs- und Analysestränge sowie eine intensive Zusammenarbeit mit dem Innovationsteam und den Arbeitsgruppen aus IN4climate.NRW.

Während der Projektlaufzeit 2018 bis 2022 von SCI4climate.NRW haben sich die Fachdiskussion zur Industrietransformation sowie die Präsenz des Themas in der Presse und in der allgemeinen öffentlichen Debatte erheblich intensiviert. SCI4climate.NRW hat dabei gemeinsam mit IN4climate.NRW (siehe Abschnitt 1.3) dazu beigetragen, die Transformation in NRW proaktiv vorzudenken und damit auch die dynamische Entwicklung der Debatte auf Bundesebene mit vorangetrieben.

SCI4climate.NRW 2018-2022 war ein Verbund aus sechs Forschungsvorhaben, die zeitlich parallel liefen und inhaltlich eng aufeinander bezogen waren. Abbildung 1-1 verdeutlicht die Struktur. Horizontal sind die sechs Forschungsvorhaben gekennzeichnet, die jeweils an einen der sechs Forschungspartner vergeben wurden. Die Zusammenarbeit der sechs Vorhaben war in einem organisatorisch und vier inhaltlich ausgerichteten Themenfeldern organisiert, die vertikal dargestellt

sind. Alle Themenfelder waren interdisziplinär aufgestellt und zeichneten sich jeweils durch eine spezifische Herangehensweise an die Thematik der Industrietransformation aus.

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

- Themenfeld 0 wurde vom Wuppertal Institut geleitet, Fraunhofer UMSICHT war beteiligt. Sein Gegenstand war zum einen der aktive Dialog mit den Akteuren aus Industrie und Politik in IN4climate.NRW und eine enge Zusammenarbeit mit der Geschäftsstelle von IN4climate.NRW. Zum anderen diente dieses Themenfeld der Interaktion und Koordination der Forschungspartner und der Forschungsfelder. In dieses Themenfeld waren zudem formal die Forschungsbeiträge des BFI und des VDZ integriert.
- Themenfeld 1 wurde von Fraunhofer UMSICHT geleitet, die RWTH Aachen und das Wuppertal Institut waren beteiligt. Es widmet sich vor allem Technologie- und Infrastrukturfragestellungen.
- Themenfeld 2 wurde von der RWTH Aachen geleitet, das Wuppertal Institut war beteiligt. Dieses Themenfeld widmete sich der Thematik von der Nachfrageseite und berücksichtigte hierbei insbesondere zirkuläre Wertschöpfungsketten.
- Themenfeld 3 wurde vom Wuppertal Institut geleitet, das IW Köln war beteiligt. Hier wurden primär gesamtsystemische Aspekte und die Verbindung zum Energiesystem bearbeitet. Aufgrund seiner Perspektive nahm das Themenfeld eine inhaltlich verbindende Stellung innerhalb der Forschungsfelder von SCI4climate.NRW ein.
- Themenfeld 4 wurde vom IW Köln geleitet, das Wuppertal Institut war beteiligt. Es beschäftigte sich mit den (politischen) Rahmenbedingungen für eine Transformation der Grundstoffindustrie in NRW.

Die Forschungsaktivitäten von SCI4climate.NRW waren zeitlich in drei Forschungsintervalle strukturiert (Forschungsintervall I: etwa bis Ende 2020; Forschungsintervall II: etwa bis Ende 2021, Forschungsintervall III: etwa bis Ende 2022). Diese zeitliche Strukturierung ermöglichte es den Wissenschaftler*innen im Projekt unter anderem, die inhaltliche Planung für das jeweils nächste Forschungsintervall unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen zu aktualisieren, und flexibel auf Hinweise und Forschungsfragen zu reagieren, die sich aus dem Dialog mit den Industrieakteuren ergaben.

1.3 Zusammenarbeit mit IN4climate.NRW

SCI4climate.NRW 2018-2022 arbeitete eng mit der Plattform IN4climate.NRW zusammen. IN4climate.NRW ist seit 2022 Teil der Landesgesellschaft NRW.Energy4Climate. Als Wissens-, Dialog- und Arbeitsplattform, auf der Politik, Industrie und Wissenschaft zusammenarbeiten, bietet IN4climate.NRW einen Raum, um innovative Strategien für eine klimaneutrale Industrie zu erarbeiten. Rund 40 Unternehmen aus den Bereichen Stahl und Metalle, Chemie, Zement und Kalk, Glas, Papier und Baustoffe beteiligen sich an der Initiative.

Das Innovationsteam diskutiert und entwickelt gemeinsam mit Arbeitsgruppen Ideen und Maßnahmen für eine klimaneutrale Industrie. Aktuell liegen die Schwerpunkte der gleichnamigen Arbeitsgruppen auf den Themen Wasserstoff, industrielle Prozesswärme, Kohlendioxidwirtschaft, Circular Economy, politische Rahmenbedingungen und Beschleunigung von Genehmigungsverfahren. In diesen arbeiten Industrievertreter*innen, Wissenschaftler*innen aus SCI4climate.NRW, die Geschäftsstelle IN4climate.NRW und Vertreter*innen der Landesregierung miteinander an branchenübergreifenden Dialogen zu Zukunftsvisionen, Innovationen und weiteren Themen mit der Zielrichtung einer treibhausgasneutralen Produktion und der Herstellung klimafreundlicher Produkte. In den Gremien von IN4climate.NRW werden Herausforderungen und Lösungsansätze diskutiert. Sie dienen damit als wesentliche Quellen für neuartige, relevante Aspekte. Den in diesen Gremien aufgekommenen Forschungsfragen wurde im Rahmen von SCI4climate.NRW 2018-2022 Rechnung getragen. Die Wissenschaftler*innen aus SCI4climate.NRW unterstützten den Dialogprozess, indem sie ihre Forschungserkenntnisse in die Gremien trugen und die Gremien nutzten, um zusätzliche Erkenntnisse aus der Industrie zu erlangen und den Diskussionsprozess fachlich zu strukturieren. Die Wissenschaftler*innen aus SCI4climate.NRW haben maßgeblich zu den Veröffentlichungen von IN4climate.NRW im Zeitraum 2018-2022 beigetragen (siehe Tabelle 1-2).

1.4 Die Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW 2018-2022 im Überblick

Im Projekt SCI4climate.NRW 2018-2022 wurden zu vielen zentralen Fragen der Transformation neue Erkenntnisse gewonnen und in politische und gesellschaftliche Prozesse eingespeist. Die Ergebnisse sind in etwa 70 Veröffentlichungen festgehalten, die in Tabelle 1-1 vollständig aufgelistet sind. Von SCI4climate.NRW herausgegebene Berichte sind durch ein vorangestelltes „[SCI4climate.NRW]“ gekennzeichnet, sie werden hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit unter Nennung der

Autor*innen alphabetisch aufgelistet und auch in den folgenden Kapiteln entsprechend zitiert. Zudem sind 14 Veröffentlichungen von IN4climate.NRW in diesem Zeitraum unter Mitarbeit von SCI4climate.NRW entstanden (Tabelle 1-2).

Dieser Bericht gibt einen Überblick über einige zentrale Ergebnisse aus den vier Jahren Forschungsarbeit und den zahlreichen Veröffentlichungen in den vier inhaltlichen Themenfeldern 1 bis 4 (Kapitel 2 bis 5). Dabei wird jeweils für detailliertere Informationen auf die entsprechenden Berichte und Artikel verwiesen. Die meisten Veröffentlichungen aus dem Projekt SCI4climate.NRW sind auf der Webseite der NRW.Energy4Climate.NRW zu finden (<https://www.energy4climate.nrw/industrieproduktion/in4climatenrw/ergebnisse-des-thinktanks>). Der vorliegende Bericht fasst zudem die Inhalte zentraler Veranstaltungen und Vernetzungsaktivitäten aus dem Projekt zusammen, die teilweise von Themenfeld 0, teilweise von den inhaltlichen Themenfeldern koordiniert wurden (Kapitel 6).

Tabelle 1-1: Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW 2018-2022

- Abdelshafy, A., Franzen, D., Mohaupt, A., Nellessen, J., Bührig-Polaczek, A., & Walther, G. (2022). A Feasibility Study to Minimize the Carbon Footprint of Cast Iron Products while Maintaining the Technical Requirements. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 9, 249 – 265.
<https://doi.org/10.1007/s40831-022-00642-5>
- Abdelshafy, A., Lambert, M., & Walther, G. (2022). The role of CCUS in decarbonizing the cement industry: A German case study. *Energy Insight*, 115.
- [SCI4climate.NRW] Abdelshafy, A., Schleier, J., Simon, B., & Walther, G. (2020). Materialflüsse und Wertschöpfungskette der Stahl- und Zementindustrie in Nordrhein-Westfalen. SCI4climate.NRW.
- Abdelshafy, A., & Walther, G. (2021). Using the Urban Stock as A Carbon Sink: A Case Study from the German Federal State of North Rhine – Westphalia. *SINTEF Academic Press, SINTEF Proceedings*, 7, ISBN: 978-82-536-1714-5
- Abdelshafy, A., & Walther, G. (2022a). Coupling carbon capture and utilization with the construction industry: Opportunities in Western Germany. *Journal of CO2 Utilization*, 57, 101866.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101866>
- Abdelshafy, A., & Walther, G. (2022b). Exploring the effects of energy transition on the industrial value chains and alternative resources: A case study from the German federal state of North Rhine-Westphalia (NRW). *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105992.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105992>
- Abdelshafy, A., & Walther, G. (2023). Using Dynamic-Locational Material Flow Analysis to model the development of urban stock. *Building Research & Information*, 51(1), 5–20.
<https://doi.org/10.1080/09613218.2022.2142495>
- [SCI4climate.NRW] Adisorn, T., Fischer, A., Kiyar, D., Kube, R., Küper, M., Leipprand, A., Schaefer, T., & Tholen, L. (2021). Wasserstoffwirtschaft: Den Einstieg schaffen, Bestehende Herausforderungen und Lösungsansätze. SCI4climate.NRW.
- Bachmann, M., Zibunas, C., Hartmann, J. et al. (2023). Towards circular plastics within planetary boundaries. *Nature Sustainability*, <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01054-9>.
- [SCI4climate.NRW] Bendix, P., & Berg, H. (2020). Digitalisierung des Kunststoffrecyclings. SCI4climate.NRW.
- Bergmann, L., & Steger, S. (2023). Abschätzung der zukünftigen Stoffströme im Gebäudebestand— Abschätzung der zukünftigen Stoffströme im Gebäudebestand“. Kurzstudie des Themenfeldes 2 – Produkte und Wertschöpfungsketten SCI4climate.NRW (in Vorbereitung). SCI4climate.NRW.
- Beznoska, M., Kauder, B. & Wendland, F. A. (2022). Ausbau der erneuerbaren Energien in Kommunen: Einflussfaktoren der dezentralen Energiewende (IW-Trends Nr. 4/22). Institut der deutschen

Wirtschaft; SCI4climate.NRW.

- Bühner, Jonas (2022), Masterarbeit betreut durch Christian Zibunas (LTT RWTH Aachen): Greenhouse Gas Mitigation Scenarios for Energy-Intensive Process Industries in North Rhine-Westphalia.
- [SCI4climate.NRW] Doré, L., Fishedick, M., Fischer, A., Hanke, T., Holtz, G., Krüger, C., Lechtenböhrer, S., Samadi, S., Saurat, M., Schneider, C., & Tönjes, A. (2023). Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045—Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW. Wuppertal Institut; Institut der deutschen Wirtschaft.
- [SCI4climate.NRW] Egenolf-Jonkmanns, B., Glasner, C., Seifert, U., Küper, M., Schaefer, T., Merten, F., Scholz, A., & Taubitz, A. (2021). Wasserstoffimporte, Bewertung der Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030. SCI4climate.NRW.
- Finkewirth, L., Abdelshafy, A., & Walther, G. (2022). A comparative environmental assessment of the cast iron and steel melting technologies in Germany. *Energy Proceedings*, 29. <https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-10296>
- Fischer, A., & Küper, M. (2021). Green Public Procurement: Potenziale einer nachhaltigen Beschaffung—Emissionsvermeidungspotenziale einer nachhaltigen öffentlichen Beschaffung am Beispiel klimafreundlicher Baumaterialien auf Basis von grünem Wasserstoff (IW-Policy Paper Nr. 23/21; Aktuelle politische Debattenbeiträge). Institut der Deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Fluchs, S. (2021). Fact Sheet: Einführung in die Circular Economy. Teil 1 der Fact Sheet-Reihe zur Kreislaufwirtschaft. SCI4climate.NRW.
- Fluchs, S. & Schleicher, C. (2022). Der materielle Stoffwechsel Nordrhein-Westfalens. Materialflüsse und ihre Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft (IW-Report, Nr. 68/22). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Fluchs, S., Neligan, A., Schleicher, C., & Schmitz, E. (2022). Zirkuläre Geschäftsmodelle: Wie zirkulär sind Unternehmen? (IW-Report Nr. 27/2022). Institut der Deutschen Wirtschaft.
- [SCI4climate.NRW] Fluchs, S., & Schleicher, C. (2021). Fact Sheet: Abfallhierarchie – Die Stufen der Kreislaufwirtschaft. Teil 2 der Fact Sheet-Reihe zur Kreislaufwirtschaft. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Fluchs, S., Wendland, F., & Espert, V. (2021). IN4climate.NRW als „Intermediär“, Eine empirische Betrachtung der Funktionen von IN4climate.NRW bei der Transformation zur Klimaneutralität der Industrie in Nordrhein-Westfalen. SCI4climate.NRW.
- Friedrich, P., & Wendland, F. (2021). Ökologisch nachhaltig oder nicht? Die Einführung der EU Taxonomy for Sustainable Activities, Ein verbindliches Klassifikationssystem nachhaltiger Wirtschaftsaktivitäten in der EU (IW-Policy Paper Nr. 14/21; Aktuelle politische Debattenbeiträge). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Kube, R., & Wendland, F. (2021). Wie die EU die 2030-Klimaziele in den Sektoren Straßenverkehr und Gebäudewärme erreichen kann, Optionen einer konsistenten EU-weiten Regulierung im Verkehr und Gebäudesektor (IW-Policy Paper Nr. 13/21; Aktuelle politische Debattenbeiträge). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Küper, M. (2020). Fact Sheet—Grüner Wasserstoff, Bestandsaufnahme regulatorischer und infrastruktureller Rahmenbedingungen für die industrielle Transformation in Nordrhein-Westfalen. Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Küper, M., Koppel, O., & Kohlisch, E. (2021). Grüne Innovationen der Grundstoffindustrie in NRW. Eine Analyse der Patentanmeldungen aus den Jahren 2010 bis 2018 unter Berücksichtigung von branchen- und technologiespezifischen Schwerpunkten (IW-Report Nr. 40/21; Wirtschaftliche Untersuchungen, Berichte und Sachverhalte).
- Lechtenböhrer, S., Samadi, S., Leipprand, A., & Schneider, C. (2019). Grüner Wasserstoff, das dritte Standbein der Energiewende? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69(10), 10–13.
- [SCI4climate.NRW] Maier, S., Espert, V., & Theurich, S. (2020). Einflussfaktoren industrieller Strukturwandelprozesse. Eine Metaanalyse regionaler Fallstudien für die Transformation der nordrhein-westfälischen Grundstoffindustrie. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Maier, S., & Küper, M. (2020). (Neue) Geschäftsmodelle für eine klimafreundliche Industrie—Herausforderungen und Beispiele aus der Unternehmenspraxis. SCI4climate.NRW.

- Monsef, R., & Wendland, F. A. (2022). Beschäftigte im Bereich erneuerbare Energien: Renaissance der beruflichen Ausbildung? - Produktions- und Fertigungsberufe im Fokus der Energiewende (IW-Report Nr. 57/2022; Beschäftigung in der Energiewende). Institut der Deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Neligan, A., Lichtenthäler, S., & Schmitz, E. (2023). Produkte und Dienste für eine zirkuläre Wirtschaft. Ergebnisse aus dem IW-Zukunftspanel (IW-Report Nr. 16/23; Wirtschaftliche Untersuchungen, Berichte und Sachverhalte). Institut der Deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Reinert, C., Deutz, S., Minten, H., Dörpinghaus, L., Baumgärtner, N., & Bardow, A. (2020a). Environmental impacts of the future German energy system from integrated energy systems optimization and life cycle assessment. *Computer Aided Chemical Engineering*, *48*, 241–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50041-0>
- Reinert, C., Söhler, T., Baumgärtner, N. J., & Bardow, A. (2020b). Optimization of Regionally Resolved Energy Systems by Spatial Aggregation and Disaggregation (16. Symposium Energieinnovation).
- Reinert, C., Deutz, S., Minten, H., Dörpinghaus, L., von Pfingsten, S., Baumgärtner, N., & Bardow, A. (2021). Environmental impacts of the future German energy system from integrated energy systems optimization and dynamic life cycle assessment. *Computer Aided Chemical Engineering*, *153*, 107406.
- Reinert, C., Schellhas, L., Frohmann, J., Nolzen, N., Tillmanns, D., Baumgärtner, N., Deutz, S., & Bardow, A. (2022a). Combining optimization and life cycle assessment: Design of low-carbon multi-energy systems in the SecMOD framework. *Computer Aided Chemical Engineering* *51*, 1201–1206. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50201-0>
- Reinert, C., Schellhas, L., Mannhardt, J., Shu, D. Y., Kämper, A., Baumgaertner, N., Deutz, S., & Bardow, A. (2022b). SecMOD: An Open-Source Modular Framework Combining Multi-Sector System Optimization and Life-Cycle Assessment. *Frontiers in Energy Research*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.884525>
- Ruppert, J., et al. (2019). CO₂-Infrastruktur in NRW. Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Workshop am 22. August 2019 in Düsseldorf. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/veranstaltungen/co2-infrastruktur-in-nrw>
- [SCI4climate.NRW] Röhnelt, A., Samad, S., Scholz, A., & Taubitz, A. (2021). Metaanalyse von Klimaschutzszenarien für die Branchen Stahl, Zement und Chemie. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Samadi, S. (2022). Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland.
- Samadi, S., & Barthel, C. (2020). Meta-analysis of industry sector transformation strategies in German, European and global deep decarbonisation scenarios. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Samadi, S., Kobiela, G., & Zander, D. (2020). Kontextszenarien für das Forschungsprojekt SCI4climate.NRW. SCI4climate.NRW.
- Samadi, S., & Lechtenböhmer, S. (2022a). Klimaneutralität bis 2045 – Vergleich der Entwicklungen im Energiesystem in aktuellen Szenarien für Deutschland. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, *72*. Jg, Heft 3.
- Samadi, S., & Lechtenböhmer, S. (2022b). Wege zu einer klimaneutralen Industrie. *emw*, S1|22 (Sonderausgabe: Dekarbonisierung in der Industrie).
- [SCI4climate.NRW] Samadi, S., Lechtenböhmer, S., Viebahn, P., & Fischer, A. (2021a). Conceptualisation of the potential Renewables Pull Effect. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Samadi, S., Lechtenböhmer, S., Viebahn, P., & Fischer, A. (2021b). Konzeptualisierung des möglichen Renewables-Pull-Phänomens – Definition, Wirkmechanismen und Abgrenzung zu Carbon Leakage. SCI4climate.NRW.
- Samadi, S.; Fischer, A.; Lechtenböhmer, S. (2023): The Renewables Pull effect: How regional differences in renewable energy costs may influence future locations of industrial production, *Energy Research & Social Science* (im Review-Verfahren, Stand: April 2023).
- [SCI4climate.NRW] Schleier, J., Simon, B., & Walther, G. (2020). Auswahl von Gütern und den entsprechenden Stoffströmen aus Kunststoffen, Factsheet. SCI4climate.NRW.
- Schleier, J., Simons, M., Greiff, K., & Walther, G. (2022). End-of-life treatment of EPS-based building

- insulation material – An estimation of future waste and review of treatment options. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106603. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106603>
- Schneider, C., & Saurat, M. (2020). Simulating geographically distributed production networks of a climate neutral European petrochemical industry. *European Council for an Energy Efficient Economy*.
- [SCI4climate.NRW] Schoch, K., Bickel, M., & Liedtke, C. (2022). Mapping von Ansatzpunkten für nachhaltiges Produktdesign. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Schuster, S., Bickel, M., & Teubler, J. (2023). Nachfrageentwicklung in NRW. SCI4climate.NRW.
- SCI4climate.NRW. (2020a). Forschungsplan für das 2. Forschungsintervall von SCI4climate.NRW.
- SCI4climate.NRW. (2020b). Highlights des ersten Forschungsintervalls von SCI4climate.NRW.
- SCI4climate.NRW. (2021a). Forschungsplan für das 3. Forschungsintervall von SCI4climate.NRW.
- SCI4climate.NRW. (2021b). Highlights des zweiten Forschungsintervalls von SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Seifert, U. (2021). Planungs- und zulassungsrechtliche Aspekte für den Ferntransport von Wasserstoff und Kohlendioxid in Deutschland. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Simon, B., Schleier, J., & Walther, G. (2020a). Hotspot Ökobilanzierung von Güterbündeln. Verpackungskunststoffe im Dualen System Nordrhein-Westfalen. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Simon, B., Schleier, J., & Walther, G. (2020b). Kurzbericht zur Stoffstromanalyse von Kunststoffverpackungen. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Tholen, L., Adisorn, T., & Kiyar, D. (2021). Forschungslandschaft in NRW, Forschung und Innovation für die Industrietransformation. Wuppertal.
- [SCI4climate.NRW] Tholen, L., Kiyar, D., Espert, V., & Adisorn, T. (2022). Die Industrietransformation als kommunale Aufgabe. Handlungsmöglichkeiten, Herausforderungen und Perspektiven. Ein Ergebnis des Themenfeld 4 – Rahmenbedingungen des Forschungsprojekts SCI4climate.NRW. Wuppertal Institut.
- Tholen, L., Leipprand, A., Kiyar, D., Maier, S., Küper, M., Adisorn, T., & Fischer, A. (2021). The Green Hydrogen Puzzle: Towards a German Policy Framework for Industry. *Sustainability* 2021, 13(22), 12626. <https://doi.org/10.3390/su132212626>.
- Tönjes, A., Lechtenböhrer, T., Witte, K., Knoop, K., & Mölter, H. (2020). Dynamics of cross-industry low-carbon innovation in energy-intensive industries. *European Council for an Energy Efficient Economy*.
- Wendland, F. A. (2022). Identifikation von Schlüsselberufen der Transformation auf Basis der EU-Taxonomie (IW-Report, Nr. 22/22). Institut der deutschen Wirtschaft, SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Zander, D., & Zeiss, C. (2020). Transformation zu einer klimaneutralen Industrie – Hochschullandschaft Nordrhein-Westfalen, Institutionen und Lehrstühle mit thematischen Schwerpunkten zur klimaneutralen Industrie. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Zeiss, C., Holtz, G., Taubitz, A., & Zander, D. (2021). CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW, Impuls für eine Infrastrukturgestaltung. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Zibunas, C., Meys, R., & Bardow, A. (2020). Einsatz von CCU-Technologien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalens Chemieindustrie. Modellentwurf und Technologiealternativen. SCI4climate.NRW.
- Zibunas, C., Meys, R., Kätelhön, A., & Bardow, A. (2022). Cost-optimal pathways towards net-zero chemicals and plastics based on a circular carbon economy. *Computers & Chemical Engineering*. SCI4climate.NRW. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>.

Tabelle 1-2: Unter Mitarbeit von SCI4climate.NRW entstandene Veröffentlichungen von IN4climate.NRW 2018-2022

- IN4climate.NRW. (2019). Wasserstoff als Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende: Den Einstieg jetzt ermöglichen. Ein Diskussionsbeitrag der AG Wasserstoff von IN4climate.NRW zur Entwicklung der nationalen Wasserstoffstrategie.
- IN4climate.NRW. (2020a). Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy.
- IN4climate.NRW. (2020b). Industrezukunft konsequent gestalten: Ausbau Erneuerbarer Energien bei

wettbewerbsfähigen Strompreisen als wichtiger Faktor für Klimaneutralität. Positionspapier von IN4climate.NRW.

IN4climate.NRW. (2020c). Unvermeidbare CO₂ -Entstehung in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie NRW: Definition und Kriterien. Ein Diskussionsbeitrag der AG Kohlendioxidwirtschaft von IN4climate.NRW.

IN4climate.NRW. (2020d). Wege in eine klimaneutrale Industrie nach der Corona-Pandemie. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Politische Rahmenbedingungen.

IN4climate.NRW. (2021a). Chemisches Recycling – Eine Einordnung. Positionspapier von IN4climate.NRW. [ohne Mitarbeit von SCI4climate.NRW]

IN4climate.NRW. (2021b). Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy.

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

IN4climate.NRW. (2021d). Industrierwärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme.

IN4climate.NRW. (2021e). Klimaschutzverträge für eine beschleunigte Transformation der Industrie. Positionspapier von IN4climate.NRW.

IN4climate.NRW. (2021f). Rechtliche Rahmenbedingungen einer Kohlendioxidwirtschaft – Gutachten zu Fragestellungen aus der IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Erarbeitet im Auftrag von IN4climate.NRW GmbH. [beauftragte Studie ohne Mitarbeit von SCI4climate.NRW]

IN4climate.NRW. (2022a). 9 Eckpunkte zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren in der energieintensiven Grundstoffindustrie. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Genehmigungsverfahren.

IN4climate.NRW. (2022b). Impuls: Nationaler Planungsprozess für eine CO₂-Transportinfrastruktur. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft.

IN4climate.NRW. (2022c). Prozesswärme für eine klimaneutrale Industrie. Impulspapier der Initiative IN4climate.NRW.

2 Technologien und Infrastrukturen (Themenfeld 1)

2.1 Ziele, Themen und Forschungsfragen

In Themenfeld „Technologien und Infrastrukturen“ stand forschungsintervallübergreifend die folgende **übergeordnete Forschungsfrage** im Mittelpunkt:

Wie sehen Entwicklungslinien für zentrale Technologiefelder und Infrastrukturen aus, die geeignet sind, die angestrebte Treibhausgas (THG)-Neutralität der Grundstoffindustrie in NRW bis 2050 (bzw. 2045) zu erreichen?

Im intensiven Austausch mit den Partnern in SCI4climate.NRW sowie im Dialog mit den Vertretern der Industrie in den Arbeitsgruppen (AGs) von IN4climate.NRW wurden Antworten auf die Frage erarbeitet. Ein wesentlicher Teil der Arbeit war daher die inhaltliche Vor- und Nachbereitung der Treffen der Innovationsteams und Arbeitsgruppen in IN4climate.NRW.

Technologisch gibt es mit Carbon Direct Avoidance (CDA), Carbon Capture and Utilization (CCU) und Carbon Capture and Storage (CCS) drei wesentliche Lösungsansätze für die Grundstoffindustrie, um die Emission von Treibhausgasen (THG) senken zu können. Bestandteil der ersten Projektphase war aus diesem Grund die Zusammenstellung und Bewertung der möglichen Lösungswege für die einzelnen Branchen der Grundstoffindustrie. So wird derzeit beispielsweise in der Stahlindustrie an CDA- und CCU-Lösungen gearbeitet; die Zementindustrie hingegen prüft CCS- und CCU-Lösungen, da prozessbedingt die Entstehung von Treibhausgasen bei der Zementproduktion nicht mit CDA vermieden werden kann. Für die chemische Industrie ist der CCU-Ansatz eine Möglichkeit, die Defossilisierung ihrer Produktion voranzubringen.

Grundsätzlich sind Kombinationen der Lösungsoptionen erforderlich, um das Ziel der Treibhausgas-Neutralität in der Grundstoffindustrie erreichen zu können. An den jeweiligen Lösungsansatz gekoppelt, ergeben sich technologische Herausforderungen, die in einen zeitlichen Bezug hinsichtlich einer Umsetzung bis 2050 (bzw. 2045) 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 insgesamt durch einen hohen Energieeinsatz gekennzeichnet. Die fortschreitende Einbindung volatiler erneuerbarer Energien führt im Vergleich zu der bisher auf fossilen Energieträgern beruhenden Energiebereitstellung zu Schwankungen, die 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. Für einzelne Industriestandorte in NRW ist eine Analyse der Potenziale cross-industrieller Produktionsnetzwerke sowie einer Optimierung der geänderten Energiesysteme vorzunehmen. Für diese Konkretisierung der Betrachtung wurde ein geeignetes Framework zur Optimierung von Energiesystemen (siehe Abschnitt 2.8) entwickelt.

Im Zuge der Bearbeitung wurden für das Themenfeld „Technologien und Infrastrukturen“ aus der übergeordneten Forschungsfrage konkrete Forschungsfragen zu den folgenden Themen abgeleitet:

- Technologiefelder und Infrastrukturen: Wie sehen Entwicklungslinien für zentrale Technologiefelder und Infrastrukturen aus, die geeignet sind, im Rahmen der im Themenfeld Szenarien und Transformationspfade entwickelten Szenarien die angestrebte THG-Neutralität der Grundstoffindustrie in NRW zu erreichen?
- Wasserstoff-Bereitstellung: Welche Schritte zur Bereitstellung von Wasserstoff als stoffliche Schlüsselkomponente zur Transformation der Grundstoffindustrie in Richtung Treibhausgasneutralität sind erforderlich?

- Transportinfrastrukturen: Welche Schritte zum Aufbau hinreichend leistungsfähiger Transportinfrastrukturen für Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid sind erforderlich?
- Energiesituation: Welche elektrische und thermische Energie kann an betrachteten Standorten maximal bereitgestellt werden? Wie erfolgt die optimale Bereitstellung? Wie sieht die Rückkopplung mit der Netzstruktur aus? Welche Schlussfolgerungen ergeben sich hieraus für mögliche Infrastrukturbedarfe?
- Technik und Rahmenbedingungen: Wie gestaltet sich das Wechselspiel zwischen technischen Entwicklungen einerseits und planungs-/zulassungsrechtlichen Rahmenbedingungen andererseits?

Während der Laufzeit des Projekts SCI4climate.NRW haben sich die Randbedingungen für die Transformation der Grundstoffindustrie sowohl in NRW als auch auf nationaler und EU-Ebene dynamisch entwickelt. Dies lässt sich exemplarisch an der erfolgten Setzung rechtlicher Rahmenbedingungen für die Entwicklung einer (Rein-) Wasserstoffwirtschaft mit entsprechenden Versorgungsinfrastrukturen festmachen, ebenso an der Erarbeitung von Strategien für ein künftiges Kohlenstoff-Management auf NRW-Ebene („Carbon Management Strategie“) wie auch auf EU-Ebene („Sustainable Carbon Cycles“). In diesem Zusammenhang war die Mitwirkung in den Arbeitsgruppen der Initiative IN4climate.NRW und die Zuarbeit zu den Diskussionspapieren dieser Initiative ein hochgradig wirksamer Pfad, um die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den „Technologien und Infrastrukturen“ zielgerichtet und zeitnah für politische Entscheidungsprozesse verfügbar zu machen.

2.2 Technologien

Auf technologischer Basis sind derzeit keine direkten 1:1 Substitutionsmöglichkeiten erkennbar, die allein durch einen 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 andere bzw. neue An- und Herausforderungen, Chancen und Risiken als auch Abhängigkeiten.

Im Rahmen des Vorhabens wurden Daten zu den zentralen technischen Entwicklungslinien in der Grundstoffindustrie zusammengestellt. Beispiele hierfür sind in allen Bereichen in NRW zu finden. Die *Stahlindustrie* erwartet den größten Wandel mit der Direktreduktion von Eisen mittels Wasserstoff (DRI). Dazu sollen in den kommenden Jahren industrielle Direktreduktionsanlagen in Deutschland gebaut sowie intensiv an der Direktreduktion mit Wasserstoff geforscht werden. In Pilotanlagen wird der Einsatz von bis zu 100% Wasserstoff erforscht werden, um die Umstellung der industriellen Anlagen von Erdgas auf Wasserstoff vorzubereiten und zu begleiten. In dieser Übergangsphase wird an den laufenden Hochöfen sowie an den zunächst erdgasbetriebenen Direktreduktionsanlagen weiterhin CO₂ entstehen.

Zum Einschmelzen des in den Direktreduktionsanlagen erzeugten Eisenschwamms stehen zwei Technologieoptionen zur Verfügung: Der Elektrolichtbogenofen, in dem ein kohlenstoffarmer Rohstahl erzeugt wird, sowie ein spezieller elektrischer Einschmelzer zur Erzeugung eines kohlenstoffhaltigen Roheisens, welches über die vorhandene Konverter-Route zu Rohstahl weiterverarbeitet wird. Im letzteren Fall muss dem Prozess zunächst Kohlenstoff in der Direktreduktionsanlage und/ oder im Einschmelzer zugefügt werden. Dieser Kohlenstoff wird zum großen Teil als CO₂/CO-haltiges Prozessgas im Einschmelzer und Konverter freigesetzt und steht z.B. zur weiteren Kohlenstoffnutzung (CCU) oder als Reduktionsgas zur Verfügung. Auch im Elektrolichtbogenofen wird in geringerem Umfang Kohlenstoff in Form von Graphit für die Elektroden sowie für die erforderliche Schaum Schlackenfahrweise eingesetzt, wodurch auch an diesem Aggregat ein CO₂-haltiger Abgasstrom bestehen bleibt.

Es ist davon auszugehen, dass diese neuen Technologien den CO₂-Fußabdruck des Stahls in Relation zur konventionellen Hochofenroute deutlich reduzieren. Absehbar wird aber weiterhin in geringen Mengen CO₂ bei der Primärstahlproduktion entstehen.

Daher wird parallel an der stofflichen Nutzung (CCU) des bei der Stahlproduktion entstehenden CO₂ gearbeitet. Die Kopplung der Lösungsansätze bietet für die Gestaltung der Stahlproduktion enorme Möglichkeiten (WV Stahl, o.J.), um die Treibhausgas-Neutralität erreichen zu können. Die wesentliche Voraussetzung für die Transformation in der Stahlindustrie ist die Existenz einer funktionierenden Wasserstoffinfrastruktur.

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 reduzieren (Ruppert et al. 2020). Ein wichtiger Bestandteil der geplanten Maßnahmen auf dem Weg zur klimaneutralen Zementindustrie ist das Fassen und langfristige Speichern von CO₂. Aber auch die Bereitstellung des CO₂ für eine stoffliche Nutzung ist eine Option. Eine zentrale Voraussetzung hierfür ist der Aufbau einer geeigneten CO₂-Infrastruktur. Die vertiefte Diskussion dieser Themen erfolgte branchenübergreifend in einem durch VDZ, SCI4Climate.NRW und IN4climate.NRW ausgerichteten Workshop zum Thema „CO₂-Infrastruktur in NRW“ (Ruppert et al. 2019, siehe Kapitel 2.4 und 6.2).

Die *chemische Industrie* benötigt für ihre Produktion Kohlenstoff. Der Bedarf wird aktuell zu fast 90% aus fossilen Rohstoffen gedeckt. Für den Weg der chemischen Industrie zur klimaneutralen Produktion ist daher die Defossilisierung der entscheidende Baustein (Geres et al. 2019). Das Vorhandensein einer CO₂- und Wasserstoff-Infrastruktur ist eine wichtige Voraussetzung. Ergänzend bedarf es der notwendigen Technologien zur Etablierung einer kohlenstoffbasierten Circular Economy.

Eine übergreifende Herausforderung für alle Bereiche der Grundstoffindustrie ist die Bereitstellung benötigter Prozesswärme. Die Herausforderungen sind hierbei branchenabhängig sehr unterschiedlich. Inwieweit auch hier Wasserstoff die Lösung sein kann, ist in vielen Fällen noch zu evaluieren.

Die Daten zu Technologieoptionen bildeten die Grundlage für die Diskussion von Treibern und Hemmnissen in den Arbeitsgruppen mit der Industrie.

2.3 Wasserstoff

Sowohl stofflich als auch energetisch ist Wasserstoff für die Transformationsprozesse ein zentraler Baustein, der bei den meisten technischen Lösungsansätzen benötigt wird. Im Zuge der Projektbearbeitung konnten in den Arbeitsgruppen wesentliche Herausforderungen abgeleitet werden:

- Optimierung von Stromdichte, Wirkungsgrad und Lebensdauer der Verfahren zur Erzeugung des Wasserstoffs forcieren
- Ausbildung und Erhalt einer Technologienvielfalt 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, Wasserstoff-erzeugern 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

Ein wesentlicher Kern der Arbeiten war der Austausch und die Diskussion in der entsprechenden IN4climate.NRW-AG „Wasserstoff“ in IN4climate.NRW.

Der Austausch und die Zuarbeit zu der AG Wasserstoff begann mit der 1. Sitzung im April 2019 und dauerte bis zum Ende des Projekts an. Im April 2019 war Wasserstoff in Fachkreisen zwar schon als notwendiger zentraler Baustein in einer klimaneutralen Welt identifiziert worden, jedoch war die Wahrnehmung seiner Bedeutung auf gesellschaftlich breiter Ebene noch nicht sehr ausgeprägt. Die zunehmende Erkenntnis, dass Wasserstoff eine Schlüsselrolle in der Transformation einnimmt, warf Fragen auf, was technologisch, rechtlich, wirtschaftlich, gesellschaftlich und politisch geschehen

müsste, um die Erwartungshaltung an Wasserstoff in Jahr 2050 (bzw. 2045) zu erfüllen. Die Arbeitsgruppe Wasserstoff leistete und leistet immer noch ihren Beitrag, die jeweiligen Hürden beim Hochlauf von Wasserstoff zu identifizieren, mögliche Handlungsmaßnahmen bzw. Notwendigkeiten zu formulieren und diese Erkenntnisse für die weitere Entwicklung zu nutzen.

Fraunhofer UMSICHT hat maßgeblich dazu beigetragen, technologische Hürden und potenzielle Forschungsfelder zu identifizieren. Dazu gehörten: Elektrolyse, Verdichtung, Dichtungen, Infrastrukturen, Pipelines, H₂-Beimischung in Erdgas, Wasserstoffträgermaterialien, Speicherung und Fragen hinsichtlich der Wasserstoffqualität, die beim Endkunden vorliegen muss und die sich durch den Transport ggf. verändert.

In dem sehr frühen Stadium der AG hat Fraunhofer UMSICHT eine Übersicht über angekündigte Wasserstoffprojekte zusammengestellt und zusammen mit den Industriepartnern von IN4climate.NRW auf dieser Basis Wasserstoffbedarfe ermittelt. Die Informationen wurden zur Überführung in eine Kartendarstellung aggregiert. Zusätzlich wurden bestehende Kartendarstellungen zum Gasnetz, zum privaten Wasserstoffnetz und zu bekannten Power-to-Gas-Projekten zusammengestellt.

Alle diese Informationen und identifizierten Forschungslücken und Hemmnisse bildeten die Basis für ein Diskussionspapier, das in der AG Wasserstoff unter Beteiligung des Wuppertal Instituts und von Fraunhofer UMSICHT erstellt wurde und in das wissenschaftliche Erkenntnisse aus den Themenfeldern „Technologien und Infrastrukturen“ sowie „Szenarien und Transformationspfade“ (siehe Kapitel 4) einfließen. Das Diskussionspapier „Wasserstoff als Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende: Den Einstieg jetzt ermöglichen“ wurde im Oktober 2019 durch IN4climate.NRW veröffentlicht und hat die im Juni 2020 erschienene nationale Wasserstoffstrategie mit beeinflusst (IN4climate.NRW 2019).

Um den Jahreswechsel 2019/2020 wurde bekannt, dass es ein großes EU-Förderprogramm geben wird, das geeignet ist, international bedeutsame Strukturen aufzubauen: Important Projects of Common European Interest (IPCEI). Zahlreiche Teilnehmer*innen der AG Wasserstoff haben hier Interesse bekundet. Durch die Kenntnis der jeweiligen Einzelvorhaben und die Recherche zu bereits angekündigten Vorhaben (außerhalb der AG) (→ s. vorherige Ausführungen zur Kartendarstellung) erfolgten u.a. durch Fraunhofer UMSICHT Arbeiten, diese Vorhaben logisch miteinander zu verknüpfen, um daraus IPCEI-konforme Vorhaben zu machen, die einen Mehrwert für die Entwicklung eines zukünftigen Wasserstoffsystems haben. Diese Vorbereitung trug dazu bei, dass über 60 Vorhaben, 11 davon in NRW, einen Zuschlag in Zusammenhang mit der IPCEI-Förderung bekommen haben.

Gemäß der ursprünglichen Version der Nationalen Wasserstoffstrategie sollten in 2030 5 GW Leistung für die heimische Erzeugung von Wasserstoff installiert sein. Dieser Wert wurde im Nachgang nochmal auf 10 GW im Jahr 2030 angepasst. Gleichzeitig besteht in 2030 gemäß diverser Szenarien und auch der Nationalen Wasserstoffstrategie ein deutlich höherer Bedarf an nachhaltig erzeugtem Wasserstoff.

Je nach Prognose entspricht die zu importierende Menge im Jahr 2030 ca. dem 4- bis 6-fachen der heimischen Erzeugung. Der großskalige Import von Wasserstoff im Jahr 2030 ist demzufolge von zentraler Bedeutung zur Erreichung der nationalen Zielvorgaben, die notwendig sind, um den Wasserstoffhochlauf in Deutschland zu gewährleisten. Allerdings wirft dies die Frage auf, inwiefern der benötigte Wasserstoff bis 2030 ausreichend aus anderen Regionen bereitgestellt werden könnte. Dazu wurden die Implikationen und Voraussetzungen einer nationalen Produktion aufgezeigt, fünf aussichtsreiche Kandidaten in verschiedener Entfernung auf ihre Lieferpotenziale hin untersucht und die technologischen Optionen sowie regulatorischen Voraussetzungen für H₂-Importe bis 2030 dargestellt und bewertet. Die Ergebnisse haben das Institut der deutschen Wirtschaft, Fraunhofer UMSICHT und das Wuppertal Institut gemeinsam in einem Ergebnispapier zusammengestellt (Egenolf-Jonkmanns et al. 2021) und hinsichtlich der Realisierbarkeit bewertet (Küper et al. 2021).

Abbildung 2-1 zeigt die Herausforderung auf, wenn der erwartete Bedarf an grünem Wasserstoff von mindestens 90 TWh hierzulande mittels Elektrolyse und erneuerbarem Strom produziert werden soll. Die zusätzlich neu zu errichtenden EE-Stromerzeugungskapazitäten müssten zwischen ca. 32 GW_{el} (offshore Windkraft) und 129 GW_{el} (Photovoltaik) betragen und würden bezogen auf die Ziele des alten EEG 2021 die geplanten Leistungen für Windkraft offshore und Photovoltaik deutlich übersteigen. Da mit einer Übererfüllung der EE-Ausbauziele nicht zu rechnen ist, müsste der für 2030 erwartete H₂-Bedarf in 2030 in Deutschland maßgeblich durch H₂-Importe gedeckt werden.

UM 90 TWh/a GRÜNEN WASSERSTOFF ZU ERZEUGEN...



Abbildung 2-1: Bedarf an neuen EE-Erzeugungskapazitäten in Deutschland zur Deckung der unteren Nachfragerwartung laut Nationaler Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030 (Egenolf-Jonkmanns et al. 2021)

Für H₂-Importe kommen grundsätzlich eine Vielzahl an Ländern in unterschiedlichen Weltregionen mit sehr hohen und kostengünstigen EE-Stromerzeugungspotenzialen in Frage. Für die Frage, aus welchen

Ländern mit ausreichenden H₂-Mengen bis 2030 zu rechnen ist, wurden vier verschiedene Länder (Niederlande, Spanien, Marroko und Chile) in steigender Entfernung von Deutschland explorativ und multikriteriell untersucht. Eine qualitative SWOT¹-Analyse rundet die Perspektiven der untersuchten Lieferländer ab. Die Abbildung 2-2 zeigt ausgehend von der Entwicklung von Strombedarfen und EE-Erzeugung eine erwartbare Größenordnung an H₂-Produktion für einen Export auf (mittlere Säule). Demnach könnte selbst bei stark steigendem Strombedarf in Spanien zumindest die gleiche (Referenz-)Menge wie in Deutschland geplant erzeugt und exportiert werden. Wenn der Strombedarf dagegen nur moderat (wie zuletzt üblich) steigt, dann könnte rein rechnerisch auch die gesamte deutsche Deckungslücke durch Wasserstoff aus Spanien gedeckt werden. Aufgrund eigener H₂-Bedarfe und begrenzter, bestehender Pipelinekapazitäten ist jedoch in der Praxis mit deutlich niedrigeren H₂-Mengen aus Spanien zu rechnen. Hierbei ist auch die zeitliche Verfügbarkeit der H₂-Transportoptionen zu berücksichtigen (siehe Abbildung 2-3).

Die sehr hohen EE-Potenziale in Spanien machen das Land langfristig zu einem bedeutsamen europäischen H₂-Produzenten und -Lieferanten.

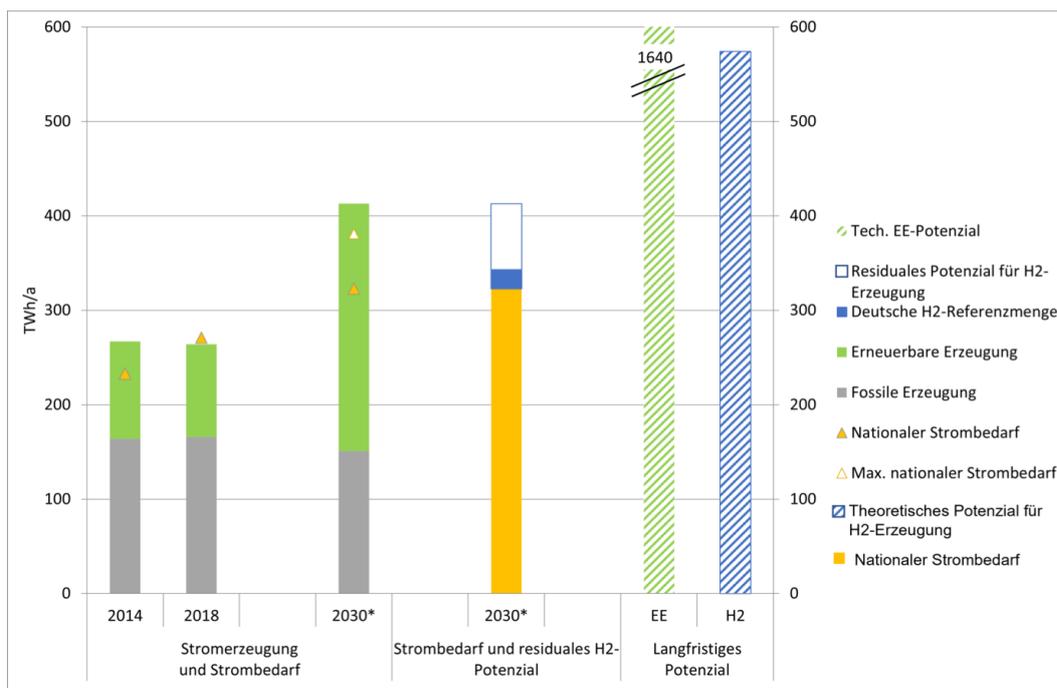


Abbildung 2-2: Stromerzeugung und -bedarf in Spanien für die Jahre 2014, 2018 und 2030, mögliche resultierende H₂-Produktionsmenge in 2030 sowie langfristige technische Potenziale für die EE-Strom und H₂-Erzeugung. (SC4climate.NRW 2021a)

¹ Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (aus dem Englischen).

Fraunhofer UMSICHT hat bei dieser Betrachtung die technischen Aspekte untersucht. Die zentralen Erkenntnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 2-3: Bewertung der Transportoptionen hinsichtlich der generellen Machbarkeit für einen großskaligen Wasserstoffimport in 2030 (Quelle: eigene Darstellung) zusammengefasst.

Bewertung der Transportoptionen für Wasserstoffimport





	Pipeline	Schiff	LKW
Beimischung		-	-
H₂ (g)	vereinzelt	-	
H₂ (l)	-		
LOHC	-		
Ammoniak	unwahrscheinlich		

-				
Option nicht betrachtet oder machbar	machbar	eingeschränkt machbar	unwahrscheinlich	nicht bis 2030 realisierbar

© Fraunhofer UMSICHT

Abbildung 2-3: Bewertung der Transportoptionen hinsichtlich der generellen Machbarkeit für einen großskaligen Wasserstoffimport in 2030 (Quelle: eigene Darstellung)

Abseits der technologischen Fragestellungen ist es von zentraler Bedeutung für die Wasserstoffwirtschaft, unter welchen Bedingungen erzeugter Wasserstoff als nachhaltig/grün eingestuft wird. Die zentrale Regelung dazu erfolgt in der RED-II bzw. konkret im delegierten Rechtsakt (delegated act = DA) zu Art. 27 Abs. 3. Als Zuarbeit zur AG Wasserstoff wurden im Zeitraum Q1-Q2/2022 die jeweils bekannten Ausführungen des DA 27.3 dargestellt und deren Auswirkungen hinsichtlich der Erzeugung von grünem Wasserstoff erläutert. Die Ausgestaltung des DA hat sich in diesem Zeitraum mehrfach geändert, bis letztlich eine Fassung der Europäischen Kommission zur Verabschiedung vorgelegt wurde. Zum Stand des Redaktionsschlusses zu Themenfeld 1 (Ende 2022) ist auch hier noch keine final abgestimmte Fassung verabschiedet. Im Zuge dieser Arbeiten wurde unter Federführung des Wuppertal Instituts und unter Mitarbeit von Fraunhofer UMSICHT eine interne Argumentensammlung ausgearbeitet, die zusammenfasst, welche Ausgestaltung einzelner Abschnitte des DA welche Auswirkungen auf die anvisierte Wasserstoffwirtschaft hat.

2.4 Kohlendioxid

Für die stoffliche Nutzung des CO₂ aus den Prozessgasen ergaben sich ähnlich wie beim Wasserstoff eine Liste an Fragen hinsichtlich:

- 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 durch den Aufbau einer CO₂-Infrastruktur in Verbindung mit einer H₂-Infrastruktur
- Setzen des regulatorischen Rahmens für die wettbewerbsfähige Produktion und die Klärung von Fragen im Zusammenhang mit der Nutzung von CO₂ aus Industrieprozessen

Als eine Schlüsseltechnologie zur Erreichung der THG-Neutralität in der Grundstoffindustrie wurde im Rahmen des Vorhabens der Umgang mit prozessbedingt weiterhin anfallendem Kohlendioxid identifiziert. Die Ergebnisse der Analysen fanden Eingang in mehrere Diskussionspapiere der IN4climate.NRW-AG „Kohlendioxidwirtschaft“.

Zum Diskussionspapier „Unvermeidbare CO₂-Entstehung in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie NRW – Definition und Kriterien“, September 2020 (IN4climate.NRW 2020c), wurden Vorschläge zur Definition entwickelt, um eine Abgrenzung insbesondere zu dem bei der Strom- und Wärmeproduktion aus fossilen Energieträgern anfallenden (und durch die Umstellung auf erneuerbare Energien grundsätzlich vermeidbaren) Kohlendioxid zu ermöglichen.

Der zukünftige Umgang mit weiterhin anfallenden CO₂ bzw. in der Transformationsphase erfordert einen geeigneten rechtlichen Rahmen. Die zukünftigen Mengen, die genutzt, transportiert und gespeichert werden müssen, machen andere Rahmenbedingungen notwendig als die derzeit geltenden. Beispielhaft sei hier der grenzüberschreitende Transport genannt. Zudem zeichnen sich Geschäftsmodelle ab, die aktuell nicht rechtssicher angelegt sind (Entnahme von CO₂ aus einer CO₂-Transportinfrastruktur für CCU-Zwecke). Diese und weitere rechtliche Probleme, die sich für die notwendige Transformation abzeichnen wurden von Fraunhofer UMSICHT und weiteren AG-Teilnehmern zusammengestellt. Zur Ausarbeitung konkreter rechtlicher Lösungsvorschläge wurde dann ein Gutachten von IN4climate.NRW in Auftrag gegeben (IN4climate.NRW 2021f).

Für das Diskussionspapier „CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW“, Dezember 2021 (IN4climate.NRW 2021c), welches sich vertieft mit Infrastrukturanforderungen für den Umgang mit weiterhin anfallendem Kohlendioxid

auseinandersetzt, wurden Darstellungen zur Abscheidung und Nutzung des Kohlendioxids erarbeitet. Die nötigen Voraussetzungen, um den niedrigen spezifischen Energiegehalt des Kohlendioxids im Fall einer Weiterverarbeitung zu spezifisch energiereichen Produkten auszugleichen, werden dabei ebenso behandelt wie spezifischen Merkmale der Prozesse und Produkte, bei denen Kohlendioxid unter der Bildung basischer Produkte aus Carbonatgestein angetrieben wird.

Weitergehende, in Themenfeld 1 erstellte Betrachtungen nehmen die Rolle von Kohlendioxid als Rohstoff und künftigen Kohlenstoffträger für Produktionsprozesse der (Petro-)Chemie in einer künftigen Grundstoffindustrie in den Fokus, die weitgehend auf fossile Kohlenstoffquellen in Form energiereicher Verbindungen wie Kohle, Erdöl und Erdgas verzichten muss. Verschiedene Optionen einer Deckung des künftigen Kohlenstoffbedarfs wurden dazu betrachtet, die auch die mögliche räumliche Trennung zwischen dem Ort des Anfalls und dem Ort der (chemischen) Nutzung von Kohlendioxid einbeziehen.

Im Hinblick auf einen künftigen diskriminierungsfreien, leitungsgebundenen Ferntransport von Kohlendioxid wurden die Konsequenzen aus der bisherigen Formulierung im Kohlendioxid-Speicherungsgesetz dargestellt und Optionen einer Erweiterung des Anwendungsbereichs dieses Gesetzes beschrieben. Hinsichtlich sicherheitstechnischer Anforderungen an ein derartiges Fernleitungsnetz wurden aus einem Vergleich mit technisch ähnlichen Infrastrukturen Hinweise auf eine denkbare Umsetzung abgeleitet (Seifert, 2021). Weitergehende Ausführungen hierzu sind dem Abschnitt „Planungs- und zulassungsrechtliche Rahmenbedingungen“ zu entnehmen.

Für den nicht-leitungsgebundenen Transport von Kohlendioxid existiert mit dem Gefahrgutbeförderungsgesetz, der dazugehörigen Verordnung (GGVSEB) und den darin in Bezug genommen internationalen Vereinbarungen für den Straßentransport (ADR), den Bahntransport (RID) sowie für den Transport auf Binnenschiffen (ADN) ein umfassendes supranationales Regelwerk, in dem Sicherheitsanforderungen sowohl an die Transportmittel als auch an die Behälter und Umschließungen festgelegt sind.

Anlagen zur Abscheidung von Kohlendioxid aus Prozessgasen oder Abgasen sowie zur Bereitstellung des Kohlendioxids in transportgeeigneter, verdichteter Form können, sofern sie in Verbindung mit nach dem BImSchG genehmigungsbedürftigen Anlagen betrieben werden, als Nebeneinrichtungen dieser Anlagen ebenfalls dem Genehmigungserfordernis unterliegen, § 1 Abs. 2 Nr. 2 der 4. BImSchV. Eigenständig betriebene Anlagen zur Abscheidung von Kohlendioxidströmen zum Zwecke der dauerhaften geologischen Speicherung fallen unter die Nr. 10.4 des Anhangs 1 zur 4. BImSchV, allerdings nur dann, wenn die Kohlendioxidströme aus Anlagen stammen, die ihrerseits genehmigungsbedürftig sind und unter die Industrieemissionsrichtlinie fallen. Für andere Arten von CO₂-Abscheidungsanlagen, beispielsweise Direct-Air-Capture(DAC)-Anlagen, besteht kein immissionsschutzrechtliches Genehmigungserfordernis.

Kohlendioxid fällt aufgrund seiner stofflichen Eigenschaften nicht in den Anwendungsbereich der Störfall-Verordnung. Sofern Anlagenteile (z. B. zur Abtrennung des Kohlendioxids aus Prozessgasen oder Abgasen) im Zusammenhang mit Betriebsbereichen im Sinne der StörfallV errichtet und betrieben werden und für die Verhinderung von Störfällen oder zur Begrenzung von deren Auswirkungen relevant sein können, ergäbe sich ggf. hierdurch eine Anwendbarkeit der StörfallV auf diese Anlagenteile.

2.5 Circular Economy

Die chemische Industrie benötigt für ihre Produktion Kohlenstoff. Der Bedarf wird bislang zu fast 90% aus fossilen Rohstoffen gedeckt. Für den Weg der chemischen Industrie zur klimaneutralen Produktion ist daher die Defossilisierung der entscheidende Baustein. Als technische Option bietet sich der Einsatz von CCU-Technologien an, die jedoch eine entsprechende H₂- und CO₂-Infrastruktur voraussetzen. Insgesamt bedarf es einer kohlenstoffbasierten Circular Economy, wie sie in SCI4climate.NRW betrachtet wurde. Hierfür sind die notwendigen Technologien bereitzustellen. Vorzugweise können mit diesen Technologien, wie dem chemischen Recycling, möglichst größere Kohlenstoffbausteine aus Produkten zurückgewonnen und für die Produktion neuer Produkte eingesetzt werden. Die Erkenntnisse aus den Betrachtungen sind u. a. in das Diskussionspapier „Potenziale und Entwicklungsperspektiven für das chemische Recycling von Kunststoffabfällen“ der IN4climate.NRW-AG „Circular Economy“, Juli 2020, eingeflossen (IN4climate.NRW 2020a) sowie in das Diskussionspapier „Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation“, Dezember 2021 (IN4climate.NRW 2021b).

2.6 Wärme

Unter dem Oberbegriff „Wärme“ ist hier die industrielle Prozesswärme zu verstehen. Während der Anteil der erneuerbaren Energieerzeugung für Strom in den letzten Jahren stetig zugenommen hat im Rahmen der Energiewende, so ist bei der Prozesswärmebereitstellung der Anteil an regenerativer Energie seit Jahren nahezu auf dem gleichen Niveau geblieben. Der industrielle Wärmebedarf in NRW beträgt allein ca. 180 TWh/a und macht damit ca. 1/3 des gesamtdeutschen industriellen Wärmebedarfs aus. Die prinzipielle Größenordnung dieses Bedarfs wird sich auch durch eine Transformation hin zu klimaneutralen Wirtschaftsweisen nicht grundsätzlich ändern. Dies zeigt die Bedeutung dieses Arbeitsgebietes.

Als Beitrag zur IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe „Industrielle Prozesswärme“ wurden vom Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der RWTH Aachen die Wärmebedarfe der Industrie in NRW nach Branchen und Temperaturniveaus abgeschätzt. Die Methode und Ergebnisse wurden am 18.11.2020 als Impulsvortrag in der IN4Climate.NRW-AG „Industrielle Prozesswärme“ vorgestellt und sind in das Impulspapier „Industriewärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation“ (IN4climate.NRW 2021d) mit eingeflossen.

Es zeigte sich, dass der industrielle Prozesswärmebedarf eine zentrale Bedeutung einnimmt, wenn (Grundstoff-)Industrien klimaneutral werden müssen und gleichzeitig, dass es nicht nur eine Lösung gibt, da es viele unterschiedliche Temperaturniveaus gibt, die unter dem Oberbegriff Prozesswärme gefasst werden. Außerdem gibt es eine Reihe von stofflichen Nebeneffekten (z. B. Aufkohlung im Gießereiprozess), die zu berücksichtigen sind. Fraunhofer UMSICHT und Wuppertal Institut haben ebenfalls maßgeblich an dem Impulspapier „Industriewärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation“ mitgearbeitet und waren an der Entwicklung des darin beschriebenen 4-Stufen-Modells beteiligt. Dieses Modell liefert eine Systematik, wie Unternehmen/Branchen die Transformation hin zu einer klimaneutralen Prozesswärmeversorgung gestalten sollten. Die Ausprägung der einzelnen Stufen wird je nach Branche und Unternehmen aber unterschiedlich ausgeprägt sein, dient aber als eine mögliche Herangehensweise einen fallspezifischen Transformationspfad zu beschreiten. Das 4-Stufen-Modell zeigt Abbildung 2-4.

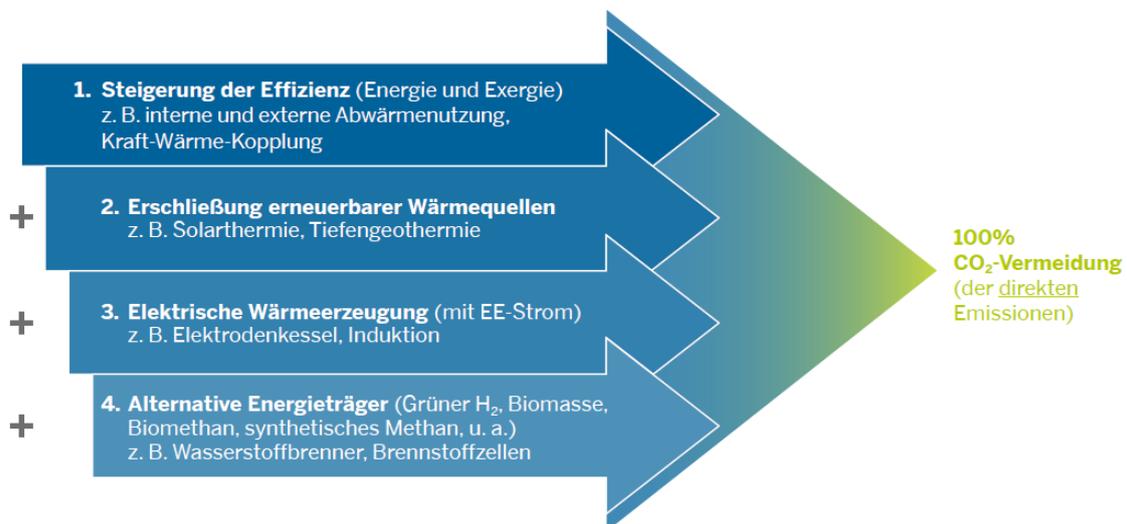


Abbildung 2-4: 4-Stufen-Modell einer klimaneutralen Prozesswärmeversorgung (©IN4climate.NRW)

Neben der Mitwirkung an der Erstellung des 4-Stufen-Modells haben die Arbeiten im Themenfeld „Technologien und Infrastrukturen“ von SCI4climate.NRW (Fraunhofer UMSICHT und Wuppertal Institut) im Rahmen des Papiers und der IN4climate.NRW-AG „Industrielle Prozesswärme“ auch an Übersichten zu heute verfügbaren und zukünftig benötigten Technologien zur Wärmebereitstellung beigetragen. Die Vorstellung dieser Übersicht erfolgte u. a. am 27.8.2020 im Rahmen der IN4climate.NRW-AG „Industrielle Prozesswärme“. Abbildung 2-5 fasst dabei die möglichen Technologiepfade zur erneuerbaren Wärmebereitstellung oberhalb von 100 °C zusammen. Die derzeitigen Limitierungen und Herausforderungen dieser Pfade wurden skizziert.

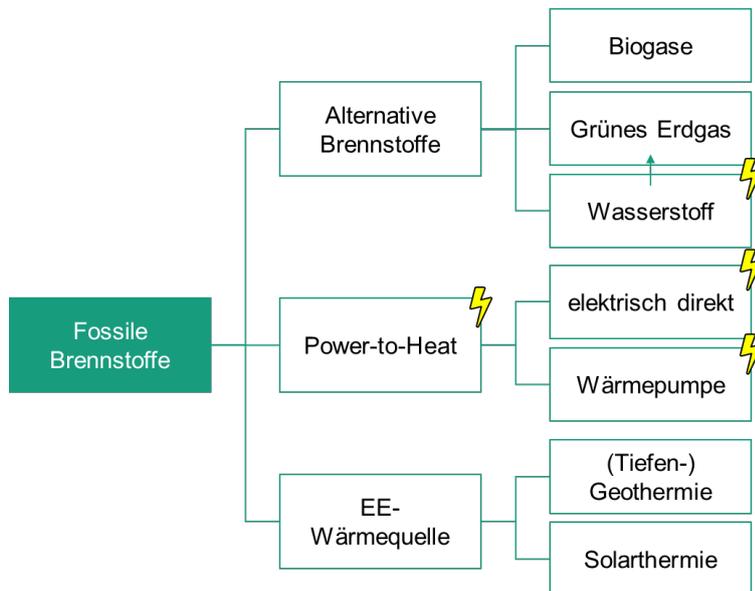


Abbildung 2-5: Mögliche Technologiepfade für eine erneuerbare Prozesswärmebereitstellung oberhalb von 100 °C

2.7 Planungs- und zulassungsrechtliche Rahmenbedingungen

Bezüglich der Rahmenbedingungen fokussiert das Themenfeld 1 auf die regulatorischen Grundlagen und Voraussetzungen für die Planung, Errichtung und Inbetriebnahme von industriellen Anlagen und technischen Infrastrukturen.

Der Ferntransport von (Rein-)Wasserstoff und von Kohlendioxid stellt im Zielbild einer treibhausgasneutralen Grundstoffindustrie in Nordrhein-Westfalen eine wesentliche infrastrukturelle Grundlage dar. Daher befassten sich mehrere (s.u.) im Themenfeld „Technologien und Infrastrukturen“ durchgeführte Arbeiten mit der Analyse der planungs- und zulassungsrechtlichen Voraussetzungen derartiger Transportinfrastrukturen.

Neben einem Bericht zu den Rechtsgrundlagen der Errichtung technischer Anlagen und Transportinfrastrukturen in Nordrhein-Westfalen wurde ein Bericht zu bestehenden Bedarfen und übertragbaren Lösungsansätzen im Hinblick auf die Überwindung zu erwartender planungs- und zulassungsrechtlicher Hemmnisse bei derartigen Transportinfrastrukturen erstellt (Seifert, 2021).

Im Ergebnis dieser Analyse war festzustellen, dass die Anforderungen an den Rohrfernleitungs-transport von Wasserstoff durch das bestehende Regelwerk bereits weitgehend abgedeckt sind (Stand November 2021), da durch die Novelle des Energiewirtschaftsgesetzes von August 2021 auch Fernleitungen für den Transport von reinem Wasserstoff in den Geltungsbereich des EnWG aufgenommen wurden. Soweit behördliche Zulassungen für die Errichtung, die Änderung oder den Betrieb einer Gasversorgungsleitung in ein Planfeststellungsverfahren integriert erteilt wurden, gelten diese auch als Zulassung für den Transport von Wasserstoff.

Diese Regelungen laufen darauf hinaus, dass unter den genannten Voraussetzungen die Umstellung des in einer Rohrfernleitung zu transportierenden Fluids von Erdgas auf Wasserstoff keine grundlegend neue Zulassung des Betriebs mit allen damit zusammenhängenden Beteiligungen von Trägern öffentlicher Belange zur Folge hat. Ferner behalten die für Energieanlagen gültigen Privilegien (Möglichkeit der Enteignung nach § 45 EnWG und der vorzeitigen Besitzeinweisung nach § 44b EnWG) ihre Gültigkeit. Auch im Hinblick auf das anzuwendende technische Regelwerk bestehen keine Unklarheiten, da sich die Zuständigkeit des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) unmittelbar aus dem EnWG ergibt.

Im Unterschied dazu besteht für Rohrfernleitungen zum Transport von Kohlendioxid weiterhin eine weniger klare Rechtslage. Die (vorgesehene) dauerhafte geologische Speicherung des Kohlendioxids (CCS) ist ein besonderes Merkmal, welches für die planungs- und zulassungsrechtliche Einordnung entsprechender Rohrfernleitungen grundsätzliche Bedeutung entfaltet. Im Fall des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes (KSpG) ergibt sich dies bereits aus der Zweckbestimmung des Gesetzes in seiner derzeitigen Form. Berücksichtigt man, dass in einer künftigen Kohlendioxidwirtschaft neben CCS auch die Nutzung von Kohlendioxid als Rohstoff (CCU) für die Produktion chemischer Produkte eine Bedeutung besitzen wird, insbesondere zur Herstellung von PtX-Produkten, und dass auch für diesen Zweck ein Ferntransport von Kohlendioxid notwendig werden kann, stellt sich die Frage, wie eine kombinierte Nutzung von CO₂-Fernleitungen anteilig auch für CCU-Zwecke planungs- und zulassungsrechtlich bewerkstelligt werden könnte. Ob die Regelungen des KSpG in seiner derzeitigen Form auf dauerhafte und kommerzielle Infrastrukturen zum Leitungstransport von Kohlendioxid anwendbar wären, ist vor dem Hintergrund der Beschränkung im KSpG auf den Transport für Speicherungszwecke einerseits und der Einschränkung der zulässigen Speicherungszwecke andererseits zweifelhaft. Eine Anpassung des KSpG an die infrastrukturellen Herausforderungen der Industrietransformation erscheint daher notwendig.

Im Hinblick auf den Aufbau eines Rohrfernleitungsnetzes für den künftigen Transport von Kohlendioxid erscheint es aus grundsätzlichen Erwägungen zweckmäßig, neben einer künftigen Rechtsverordnung gemäß § 4 Abs. 6 KSpG auch ein untergesetzliches Regelwerk („Technische Regeln“) für die Errichtung und den Betrieb derartiger Transportnetze zu schaffen. Durch Verweis auf § 49 Abs. 2 Nr. 2 des EnWG wird im KSpG dem DVGW eine entsprechende Rolle eingeräumt, ohne indes die Grundsätze und das Verfahren zur Einführung derartiger technischer Sicherheitsregeln näher zu regeln.

Im Zuge der dynamisch fortschreitenden Entwicklungen auf Landesebene wie auch auf nationaler und EU-Ebene zur Umsetzung großer Pilotvorhaben zur Industrietransformation wurde die Bedeutung von Planungs- und Zulassungsverfahren als rechtliche Voraussetzung, aber gleichzeitig auch als mögliches Hemmnis für eine zeitnahe Realisierung der Transformation identifiziert.

Vor diesem Hintergrund erfolgte innerhalb von Themenfeld 1 die intensive fachliche Beteiligung an der IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe „Genehmigungsverfahren“, die ihre Arbeit Ende 2021 aufnahm. Im Laufe des Jahres 2022 entstand ein Diskussionspapier (9 Eckpunkte zur Beschleunigung von

Genehmigungsverfahren in der energieintensiven Grundstoffindustrie; IN4climate.NRW 2022a). Dieses Papier basiert auf der Auswertung der von verschiedenen Seiten beigesteuerten Ansätze zur Verkürzung der Dauer von Genehmigungsverfahren (Initiativen in NRW und im Bund) sowie der für Schlüsseltechnologien (Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse, Abscheidung und Konditionierung von Kohlendioxid) identifizierten spezifischen Anforderungen. Die Anforderungen zu den letztgenannten Technologien wurden in fachlicher Abstimmung mit den IN4climate.NRW-Arbeitsgruppen „Wasserstoff“ und „Kohlendioxidwirtschaft“ erarbeitet.

2.8 Optimierung von Energiesystemen

Die Identifikation emissionsarmer und zugleich kosteneffizienter Energiesysteme ist komplex: Faktoren wie die zeitliche Dargebotsabhängigkeit von emissionsarmem Strom und die Elektrifizierung mithilfe von Sektorenkopplung beeinflussen die optimale Systemwahl. Mathematische Optimierung kann dabei unterstützen, optimale Systeme zu identifizieren und Trade-Offs aufzuzeigen. Jedoch ist die Anwendung mathematischer Modelle oft zeitaufwändig und erfordert hohe Expertise.

Im Rahmen von SCI4climate.NRW wurde das Energiesystemoptimierungsframework SecMOD entwickelt (Reinert et al., 2022a, 2022b). SecMOD erlaubt die Optimierung und ökologische Bewertung von Multi-Energiesystemen und ist als Open-Source Tool online über die Software-Plattform Git (<https://git-ce.rwth-aachen.de/ltt/secmod>) verfügbar. Multi-Energiesysteme sind Systeme, in denen verschiedene Energieträger ineinander umgewandelt werden können und daher besonders geeignet, um Sektorenkopplung zu modellieren. Unter Berücksichtigung potenzieller Sektorenkopplung kann eine mathematische Optimierung dann die beste Kombination aus verschiedenen Technologieoptionen identifizieren, um Endenergie- und Produktbedarfe zu decken.

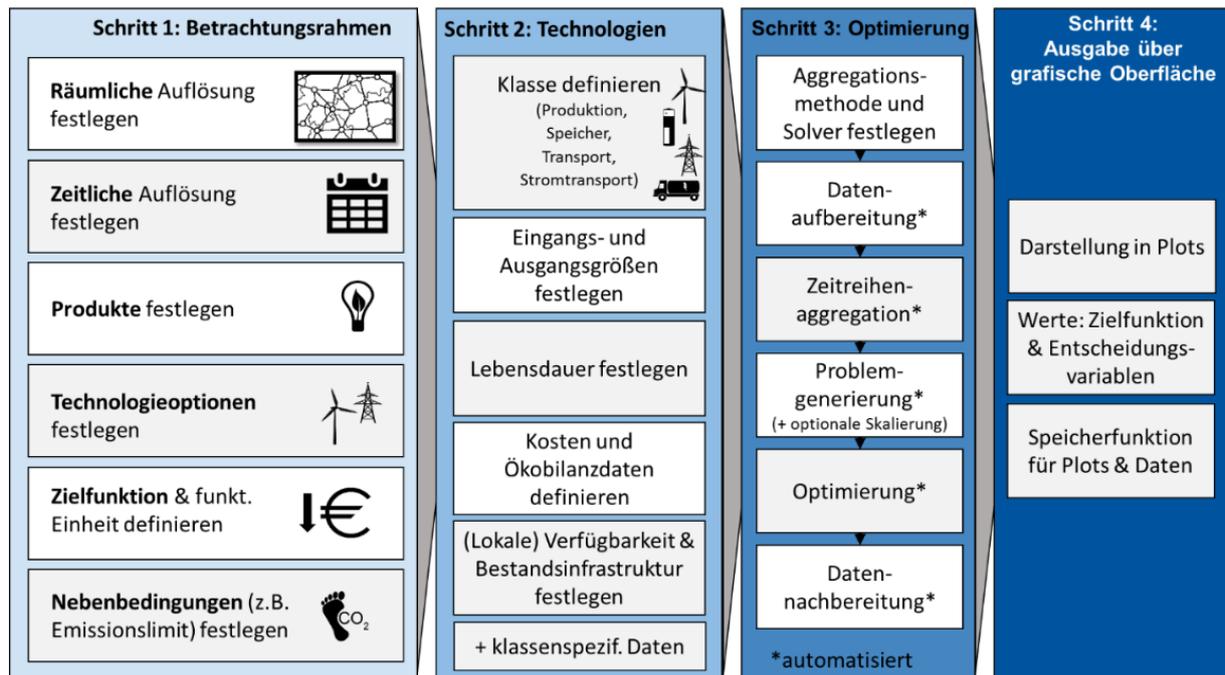


Abbildung 2-6: Anwendung des SecMOD-Frameworks in vier Schritten (basierend auf Reinert et al. (2022)).

Die Anwendung des Frameworks erfolgt in vier Schritten (Abbildung 2-6):

1. Betrachtungsrahmen:

Zunächst müssen die zeitliche und räumliche Auflösung des zu betrachtenden Systems definiert werden. Anschließend werden die Produkte (z.B. Strom, Wärme, Kälte, ...) und die zur Verfügung stehenden Technologieoptionen (z.B. Photovoltaikzellen, Kessel, ...) festgelegt. Die Zielfunktion und Nebenbedingungen können aus verschiedenen ökonomischen und ökologischen Indikatoren ausgewählt werden.

2. Technologien:

Anschließend müssen die zur Verfügung stehenden Technologien parametrisiert werden. Zu definierende Parameter umfassen die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Komponente (z.B. Brennstoffe als Eingangs- und spezifische Energiedienstleistungen als Ausgangsgröße), Lebensdauer und spezifische Parameter zur Bestimmung der Umweltwirkungen/ökologischen Indikatoren (ggf. mit Lernkurve). Ein weiterer Parameter ist die Verfügbarkeitszeitreihe für volatile Stromerzeuger. Die Komponenten sind in die Klassen Produktion, Speicherung, Transport und Stromtransport unterteilt, jede Prozessklasse folgt ihren eigenen Modellierungsgleichungen.

3. Optimierung:

Zur Optimierung des Problems wird ein Solver ausgewählt, beispielsweise Gurobi. In der linearen Optimierung wird ein globaloptimales Systemdesign identifiziert, also eine resultierende Infrastruktur und Betrieb, die im Rahmen der vorgegebenen Randbedingungen die Zielfunktion minimieren oder maximieren.

4. Auswertung:

Das resultierende Systemdesign wird ökonomisch und ökologisch bewertet. Über eine grafische Nutzeroberfläche können die Ergebnisse sowohl grafisch als auch numerisch angezeigt und analysiert werden.

Anhand mehrerer Fallstudien wurde die Anwendbarkeit von SecMOD zur Optimierung von Energiesystemen demonstriert: Die Ergebnisse zur integrierten Optimierung eines Stahlwerks und der zugehörigen Energieversorgung wurde am 04.12.2020 auf der ersten Konferenz „Wissenschaft trifft Wirtschaft“ präsentiert. In einer weiteren Fallstudie wurde ein sektorengesetztes industrielles Energieversorgungssystem mit gemischt-ganzzahliger Problemstruktur betrachtet. Gemischt-ganzzahlige Problemstrukturen ermöglichen es, das Teillastverhalten von Energiewandlern abzubilden und somit industrielle Energiesysteme noch genauer zu modellieren.

Die gemischt-ganzzahlige Fallstudie analysiert die potenzielle Rolle von Strom-Wärme-Stromspeichern zur Verbesserung der Sektorenkopplung und der Integration von emissionsarmem Strom. Dazu wurde ein industrielles Energieversorgungsmodell um eine Wärmepumpe, einen thermischen Speicher und einen Organic Rankine Cycle zur Rückverstromung erweitert. Anschließend wurde das System ökologisch und ökonomisch optimiert. Die Fallstudie wurde auf dem „European Symposium on Computer-Aided Process Engineering“ als Vortrag und am 15./16.09.2022 auf der Abschlusskonferenz von SCI4climate.NRW als Poster präsentiert (Reinert, 2022a).

Über die ursprünglichen Ziele des Arbeitspaketes hinaus wurden auch zwei weitere methodische Aspekte betrachtet. Eine räumliche Auflösung steigert die Komplexität von Energiesystemmodellen. Um Systeme mit gesteigerter Komplexität weiterhin lösen zu können, werden neue Algorithmen benötigt. Dafür wurde eine entsprechende Methode entwickelt (Reinert, 2020b). Die Methode ermöglicht eine hohe räumliche Auflösung von Energiesystemen auch bei begrenzter Rechenkapazität.

Die Umweltwirkungen von Energiesystemen hängen auch von der Energieversorgungsinfrastruktur ab (z. B. Produktion von Energieressourcen und -wandlern im Ausland). Es wird erwartet, dass sich Lieferketten langfristig ändern, da sich die Energieversorgung auch in anderen Regionen langfristig verändern wird. Daher wurde der Einfluss sich langfristig verändernder, emissionsarmer Lieferketten auf das kostenoptimale Design und die ökologische Bewertung von Energiesystemmodellen analysiert. Dafür wurde ein System ohne eine Lieferkettenänderung der Infrastruktur mit einem Energiesystem mit szenario-basierten, zukünftigen Lieferketten verglichen. Die Ergebnisse wurden auf einer Tagung vorgestellt (Reinert, 2020a) und auch in einem Journalbeitrag veröffentlicht (Reinert, 2021).

2.9 Literaturverzeichnis inklusive Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW

In diesem Abschnitt sind alle Veröffentlichungen aus dem Themenfeld 1 (Technologien und Infrastrukturen) von SCI4climate.NRW aufgelistet (blaue Schriftfarbe), zusammen mit weiteren Literaturquellen, die im Text zitiert sind (Standardschriftfarbe). Von SCI4climate.NRW herausgegebene Berichte sind durch ein vorangestelltes „[SCI4climate.NRW]“ gekennzeichnet, sie werden hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit unter Nennung der Autor*innen aufgelistet und auch entsprechend zitiert. Eine Gesamtübersicht aller Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW findet sich in Abschnitt 1.4. Alle SCI4climate.NRW-Berichte sowie die meisten weiteren im Rahmen von SCI4climate.NRW entstandenen Veröffentlichungen sind auf der Webseite von NRW.Energy4climate/IN4climate.NRW verfügbar (<https://www.energy4climate.nrw/industrie-produktion/in4climatenrw/ergebnisse-des-thinktanks>).

- [SCI4climate.NRW] Egenolf-Jonkmanns, B., Glasner, C., Seifert, U., Küper, M., Schaefer, T., Merten, F., Scholz, A., & Taubitz, A. (2021). Wasserstoffimporte - Bewertung der Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030. SCI4climate.NRW.
- Geres, R., Kohn, A., Lenz, S., Ausfelder, F., Bazzanella, A. M., Möller, A. (2019). Roadmap Chemie 2050. FutureCamp Climate GmbH; DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- IN4climate.NRW. (2019). Wasserstoff als Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende: Den Einstieg jetzt ermöglichen. Ein Diskussionsbeitrag der AG Wasserstoff von IN4climate.NRW zur Entwicklung der nationalen Wasserstoffstrategie.
- IN4climate.NRW. (2020a). Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy.
- IN4climate.NRW. (2020c). Unvermeidbare CO₂ -Entstehung in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie NRW: Definition und Kriterien. Ein Diskussionsbeitrag der AG Kohlendioxidwirtschaft von IN4climate.NRW.
- IN4climate.NRW. (2021b). Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy.
- IN4climate.NRW. (2021c). CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft.
- IN4climate.NRW. (2021d). Industrierwärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme.
- IN4climate.NRW. (2021f). Rechtliche Rahmenbedingungen einer Kohlendioxidwirtschaft – Gutachten zu Fragestellungen aus der IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Erarbeitet im Auftrag von IN4climate.NRW GmbH.
- IN4climate.NRW. (2022a). 9 Eckpunkte zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren in der energieintensiven Grundstoffindustrie. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Genehmigungsverfahren.
- IN4climate.NRW. (2022b). Impuls: Nationaler Planungsprozess für eine CO₂-Transportinfrastruktur. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft.
- IN4climate.NRW. (2022c). Prozesswärme für eine klimaneutrale Industrie. Impulspapier der Initiative IN4climate.NRW
- Küper M., Merten, F. & Glasner, C. (2021): Bereitstellung von Wasserstoff bis 2030: Zielpfad NWS; Ergebnisvortrag zu Egenolf-Jonkmanns et al. 2021, Sitzung der Wasserstoff AG; August 2021.

- Reinert, C., Deutz, S., Minten, H., Dörpinghaus, L., Baumgärtner, N., & Bardow, A. (2020a). Environmental impacts of the future German energy system from integrated energy systems optimization and life cycle assessment. *Computer Aided Chemical Engineering*, 48, 241–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50041-0>
- Reinert, C., Söhler, T., Baumgärtner, N. J., & Bardow, A. (2020b). Optimization of Regionally Resolved Energy Systems by Spatial Aggregation and Disaggregation (16. Symposium Energieinnovation).
- Reinert, C., Deutz, S., Minten, H., Dörpinghaus, L., von Pfingsten, S., Baumgärtner, N., & Bardow, A. (2021). Environmental impacts of the future German energy system from integrated energy systems optimization and dynamic life cycle assessment. *Computer Aided Chemical Engineering*, 153, 107406.
- Reinert, C., Schellhas, L., Frohmann, J., Nolzen, N., Tillmanns, D., Baumgärtner, N., Deutz, S., & Bardow, A. (2022a). Combining optimization and life cycle assessment: Design of low-carbon multi-energy systems in the SecMOD framework. *Computer Aided Chemical Engineering* 51, 1201–1206. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50201-0>
- Reinert, C., Schellhas, L., Mannhardt, J., Shu, D. Y., Kämper, A., Baumgaertner, N., Deutz, S., & Bardow, A. (2022b). SecMOD: An Open-Source Modular Framework Combining Multi-Sector System Optimization and Life-Cycle Assessment. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.884525>
- Ruppert, J., et al. (2019). CO₂-Infrastruktur in NRW. Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Workshop am 22. August 2019 in Düsseldorf. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/veranstaltungen/co2-infrastruktur-in-nrw>
- Ruppert, J., Wagener, C., Palm, S., Scheuer, W., Hoenig, V. (2020). Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie. Abschlussbericht, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [SCI4climate.NRW] Seifert, U. (2021). Planungs- und zulassungsrechtliche Aspekte für den Ferntransport von Wasserstoff und Kohlendioxid in Deutschland. SCI4climate.NRW
- WV Stahl (Wirtschaftsvereinigung Stahl) (o.J.). Perspektiven der Stahlproduktion in einer treibhausgasneutralen Wirtschaft. www.stahl-online.de, zuletzt besucht 29.11.2022

3 Produkte und Wertschöpfungsketten (Themenfeld 2)

3.1 Ziele, Themen und Forschungsfragen

Das Ziel des Themenfelds bestand in der Analyse nachfrageseitiger Maßnahmen für eine klimaneutrale Industrie und der Entwicklung ressourceneffizienter und zirkulärer nachfrageseitiger Wertschöpfungs-systeme. Das Themenfeld setzte dabei am Grundstoff an, analysierte und optimierte 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.

Als Teilziele waren daher definiert:

- Quantitative Abbildung der Grundstoffflüsse entlang der Lebenszyklen 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 resultierenden Handlungsalternativen
- Identifikation von neuen Ansätzen zum Produktdesign und von innovativen Geschäftsmodellen zur Befriedigung der der Güternachfrage zu Grunde liegenden Bedürfnisfelder

3.2 Die industrielle Transformation in der Kunststoffbranche

3.2.1 Kunststoffe und chemisches Recycling (WI und OM)

Innerhalb des ersten Forschungsintervalls war ein Schwerpunkt der Forschungen des Wuppertal Instituts innerhalb des Themenfelds 2 auf die Potenziale des Chemischen Recyclings gerichtet, und hier insbesondere auf die Pyrolyse zur Verwertung von gemischten Kunststoffabfällen in NRW, die nicht für höherwertiges werkstoffliches Recycling geeignet sind. Im Vordergrund der Analysen standen dabei

- die Beschreibung der wesentlichen Technologierouten und -optionen,
- eine erste Abschätzung ökologischer Wirkungen einer Umsetzung dieser Routen,
- sowie die Quantifizierung möglicher Massenströme und die Skizzierung möglicher Marktbedingungen.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten wurden in dem Diskussionspapier „Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven“ (IN4climate.NRW 2020a) der Arbeitsgruppe Circular Economy gebündelt und der Öffentlichkeit vorgestellt.

Die wesentlichen Ergebnisse der Analysen waren:

- Die technischen Grundlagen der Kunststoffpyrolyse sind vorhanden. Die Reinheitsansprüche der chemischen Verfahren sind geringer als für ein mechanisches Recycling. Gleichwohl sind zumindest für die Pyrolyse Kunststoffe mit Heteroatomen in ihrer Polymerstruktur wie Chlor, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel ab bestimmten Mengenanteilen problematisch. Dies betrifft z.B. PET oder PVC, die nur in bestimmten Konzentrationen Bestandteil der gemischten Kunststoffabfälle sein dürfen.
- Aus diesem Grund besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Verwendung verschiedener Kunststofffraktionen im industriellen Maßstab.
- Eine ökologische Bewertung der Pyrolyse von Kunststoffabfällen ist möglich, muss jedoch im Kontext sich langfristig verändernder Systembedingungen, vor allem bezüglich der Dekarbonisierung des Energiesystems, durchgeführt werden. Erste Ergebnisse der LCA-

Analysen von Raoul Meys zeigen robuste Indizien, dass bei gemischten Kunststoffabfällen die Pyrolyse im Vergleich zur energetischen Verwertung eine klimapolitische Alternative sein kann.

- Zusätzlich wurde für das Diskussionspapier zum Chemischen Recycling auch eine räumliche Karte der relevanten Akteure der Kunststoffherzeugung und -verarbeitung in NRW erstellt, um die verschiedenen Beziehungen darzustellen.
- Schließlich wurde die derzeitige Verfügbarkeit und die Verwertungswege von Kunststoffabfällen in NRW herausgearbeitet und in einem Sankey-Diagramm graphisch aufbereitet (Abbildung 3-1). Von den rund 2,4 Mio. t Kunststoffabfällen in NRW wurden demnach nur rund 0,5 Mio. einer werkstofflichen Verwertung zugeführt. Die restliche Menge wurde entweder direkt in der MVA beseitigt oder als Ersatzbrennstoffe (EBS) thermisch verwertet, z.B. im Zementwerk.

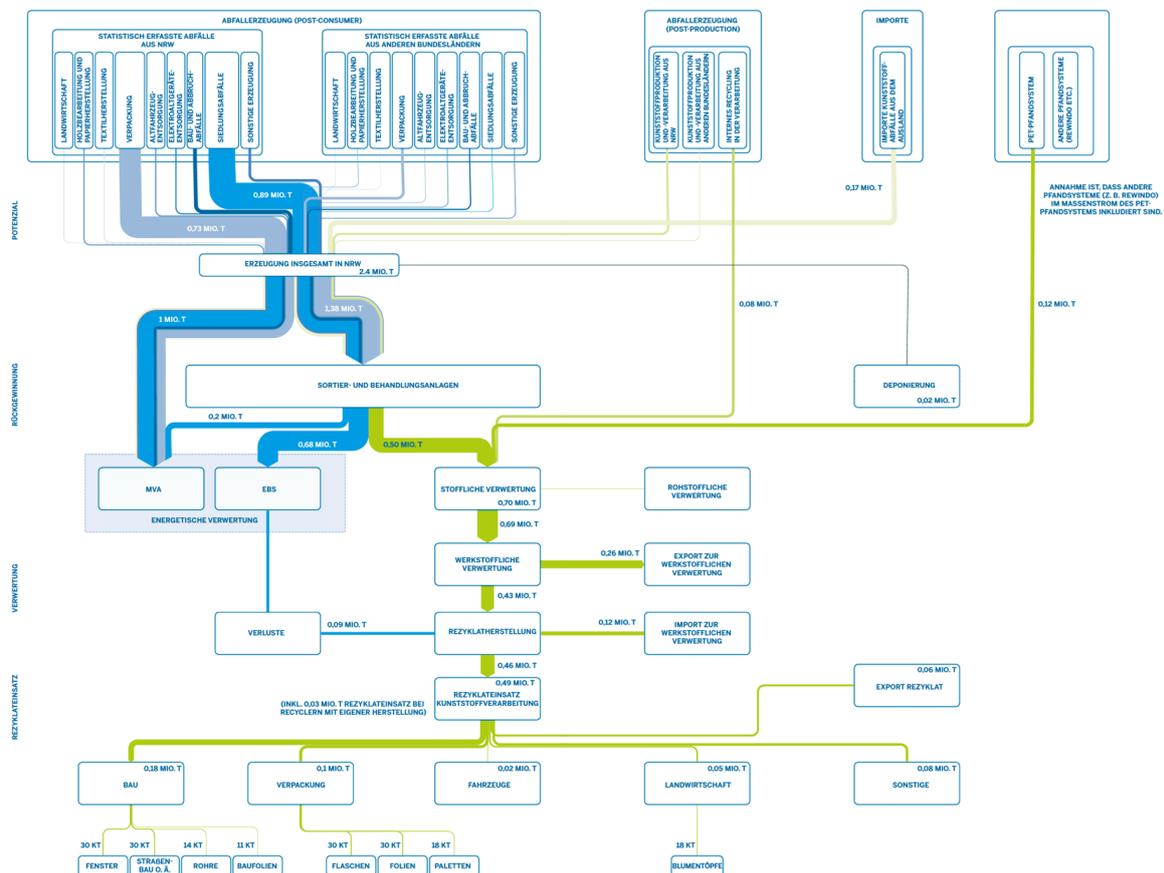


Abbildung 3-1: Sankey-Diagramm Aufkommen von Kunststoffabfällen, Verwertungswege und Einsatzgebiet des Re-Granulats (Quelle: In4climate.NRW 2020a)

Insgesamt konnte in den Analysen von SCI4climate.NRW herausgearbeitet werden, welche Potenziale durch die Implementierung des chemischen Recyclings im Kunststoffsektor entstehen. Um diese

Potenziale nutzen zu können, bedarf es in einem nächsten Schritt weiterer vertiefender Analysen. Als Empfehlung wurden daher im Diskussionspapier folgende Punkte genannt:

- Vertiefende Technologiebewertung mit dem Ziel prototypische Anlagenkonfigurationen herauszuarbeiten und relevante technische und ökonomische Kennzahlen abzuleiten
- Entwicklung von Szenarien, die die Verfügbarkeit und Zusammensetzung der Kunststoffabfälle in NRW in der Zukunft prognostizieren
- Eine Abschätzung der potentiellen Kosten und einer chemischen Verwertung von gemischten Kunststoffabfällen
- Eine vertiefende ökologische Bewertung, die noch spezifischer Substitutions- und Konkurrenzbeziehungen untersucht und die Parameter dynamisiert
- Analyse der politischen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen
- Erarbeitung einer strategischen Roadmap „Chemisches Kunststoffrecycling NRW“

Ein Teil dieser Empfehlungen wurde vom MWIKE aufgegriffen, die ersten vier Empfehlungen wurden in einem eigenen Projekt (NRW.zirkulär) im Zeitraum 01/2022 - 12/2022 (und somit parallel zum 3. Forschungsintervall) bearbeitet.

3.2.2 Analyse des Potenzials der Kreislaufschließung aus Produktperspektive: Beispiel Expandiertes Polystyrol (EPS) aus der Gebäudedämmung (OM)

Das Schließen von Stoffkreisläufen hat eine zentrale Bedeutung für die Transformation des Industriesektors hin zur Klimaneutralität, für die Reduktion negativer Umwelteinflüsse sowie für die Steigerung der Versorgungssicherheit in NRW. Für Kunststoffprodukte werden entsprechende nachfrageseitige Maßnahmen als besonders relevant eingestuft. In NRW werden schätzungsgemäß nur ca. 21 % der End-of-Life (EoL) Kunststoffe einer stofflichen Verwertung zugeführt (SCI4climate.NRW 2020b), der Rest wird größtenteils in Müllverbrennungsanlagen (MVA) oder in der Industrie energetisch verwertet. Entlang des Lebenszyklus von Kunststoffen entsteht knapp die Hälfte der assoziierten CO₂-Emissionen als produktionsseitige Emissionen, genauer, bei der Energie- und Rohmaterialbereitstellung in den Produktionsprozessen. Etwas mehr als die Hälfte entsteht während der End-of-Life-Phase. Bei den derzeitigen Standardverfahren der Abfallbehandlung, wie der Verbrennung, wird im Kunststoff gebundener Kohlenstoff freigesetzt (Material Economics 2020). Bei Nutzung alternativer Recycling- und Verwertungsoptionen können demnach sowohl ein Teil der produktionsseitigen Emissionen durch die Erschließung einer alternativen, nicht-fossilen Rohstoffbasis reduziert, als auch durch weniger energie-intensive Recyclingprozesse, EoL-seitige Emissionen gemindert werden. Das Schließen von Kunststoffkreisläufen führt so zu einem Minderungspotenzial der Treibhausgasemissionen, einer verbesserten Ressourceneffizienz und zu erhöhtem Potenzial, Umweltweinflüsse in weiteren Kategorien zu reduzieren (bspw. Meeresverschmutzung).

Die Potenziale der Schließung von Kunststoffkreisläufen in NRW wurden im Rahmen eines Anwendungsbeispiels - Gebäudedämmung aus expandiertem Polystyrol (EPS) - eingehender

untersucht (Schleier et al. 2022). Die Festlegung des Beispiels erfolgte im Einklang mit der Eingrenzung des Betrachtungsrahmens von Themenfeld 2 in den Forschungsintervallen I (Kunststoffe) und II (Bauindustrie). EPS wurde ab den 1970er Jahren in Deutschland zunehmend als Dämmmaterial in Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) eingesetzt. Aufgrund der langen Lebensdauer von WDVS (50 bis 60 Jahre), sind die Mengen EPS-basierter WDVS, die als EoL Stoffstrom anfallen, bislang gering und werden typischerweise in Müllverbrennungsanlagen entsorgt. Allerdings beginnt sich selbst bei den derzeitig noch geringen Rücklaufmengen eine Verwertungsproblematik abzuzeichnen. Der Stoffstrom wird aufgrund begrenzter Kapazitäten in Müllverbrennungsanlagen entweder nicht mehr oder nur zu hohen Annahmekosten akzeptiert. Alternative und gemäß Abfallhierarchie priorisierte Verwertungsoptionen, bspw. chemisches Recycling, haben sich aufgrund noch geringer Technologiereifegrade, nicht vorhandener ökonomischer Anreize sowie fehlender Rückführlogistiksysteme bisher in Deutschland nicht etabliert. Da die Menge an EPS-basierten WDVS zukünftig zunehmend steigen wird, muss der Aufbau verfügbarer alternativer Verwertungsoptionen ex-ante aus ökonomischer, ökologischer und regulatorischer Perspektive evaluiert werden. Netzwerkplanungsansätze eignen sich hierbei alle notwendigen vor- und nachgeschalteten Aufbereitungsprozesse der entstehenden Haupt- und Nebenprodukte, techno-ökonomische Interdependenzen sowie alle Transporte systematisch zu planen und die ökonomischen Auswirkungen des gesamten Verwertungssystems zu analysieren. In den durchgeführten Forschungsarbeiten wurde daher ein generisches Modell für die strategische Netzwerkplanung entwickelt und für die Analyse nachhaltiger Recycling- und Verwertungsoptionen für EPS-basierte EoL WDVS eingesetzt.

Die systematische Planung der Verwertungsoptionen innerhalb einer Region wie NRW erfordert Kenntnis über die regionale und zeitliche Verteilung zukünftiger Abfallmassen. Insbesondere für EPS-basierte WDVS, die als dezentrale EoL Abfallmassen anfallen und aufgrund der geringen Dichte des Dämmmaterials einen hohen Transportaufwand verursachen, ist diese Information in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung erforderlich. Für Deutschland sind solche Prognosen nur aggregiert auf Bundesebene verfügbar (Albrecht und Schwitalla 2015; Conversio 2020). Daher wurde als Grundlage für die folgenden Planungsansätze ein simulationsgestützter Prognoseansatz mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung entwickelt. Der Prognoseansatz beruht auf Erhebungen des Gebäudebestands in Deutschland (Zensus 2011) und Literaturdaten zur historisch verbauten Menge EPS-basierter WDVS in den unterschiedlichen Gebäudetypen des Bestands sowie zur Nutzungsdauer dieser Systeme. Mit diesem Ansatz wurden zukünftige Verteilungsszenarien für EPS-

basierte WDVS-Abfälle in Deutschland auf Kreisebene hergeleitet.

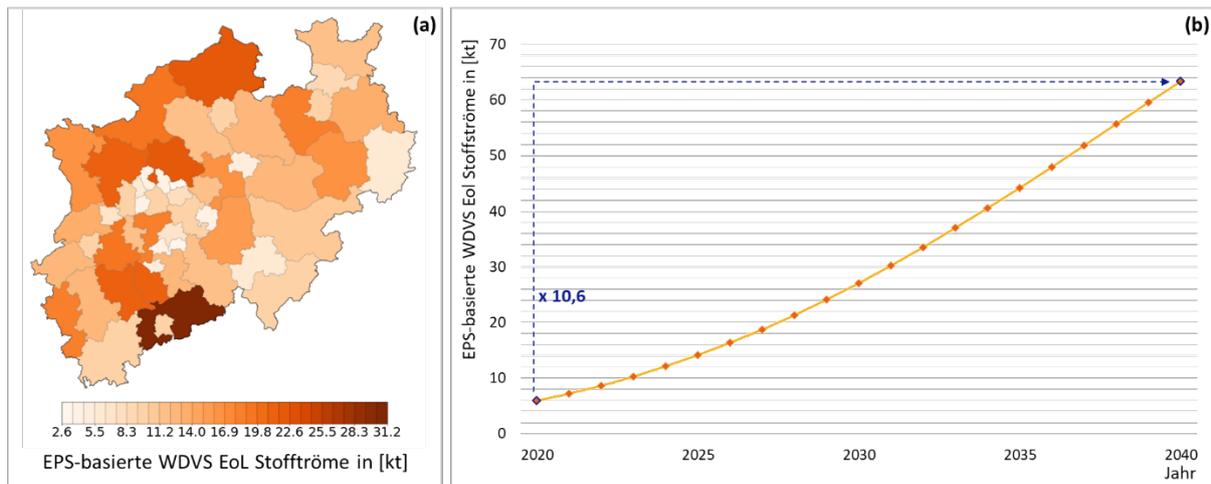


Abbildung 3-2: Teilergebnisse der durchgeführten Abfallmassenprognose. In Teil (a) ist die räumliche Verteilung EPS-basierter WDVS EoL Stoffströme kumuliert über die Jahre 2020-2040 in NRW dargestellt. In Teil (b) ist die zeitliche Verteilung der Gesamtmenge dargestellt.

In NRW steigt demnach die Gesamtmenge EPS-basierter WDVS von 6 kt in 2020 auf ca. 63 kt in 2040. Wie in Abbildung 3-2(a) dargestellt, weichen die absoluten EoL Massen in den einzelnen Kreisen und kreisfreien Städten innerhalb NRWs deutlich voneinander ab. Die EoL Massen nehmen in allen Kreisen im Prognosezeitraum jedoch stetig zu (vgl. Abbildung 3-2(b)). Dabei schwankt die Zunahme in den einzelnen Kreisen von 2020 bis 2040 zwischen dem Faktor 7,5 und 12,5. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse für NRW, dass sowohl bei den absoluten Mengen, als auch bei der Größenordnung des Anstiegs Unterschiede zwischen den Kreisen bestehen und somit aggregierte Analysen auf Landesebene für die detaillierte Planung der Infrastrukturen nicht ausreichend sind.

Für die Verwertung dieser dezentralen Stoffströme wurden durch Literaturanalyse und Expertengespräche theoretisch verfügbare, alternative Verwertungsoptionen identifiziert (siehe Abbildung 3-3). Diese Optionen sind potenziell geeignet die bestehende Verwertungsproblematik zu überwinden und bestehende Anforderungen hinsichtlich regulierter Additive (wie Flammschutzmittel Hexabromocyclododecan (HBCD)) während des Recyclings einzuhalten. Zudem sind sie potenziell mit geringeren Umweltbelastungen verbunden als die gegenwärtige energetische Verwertung in MVA.

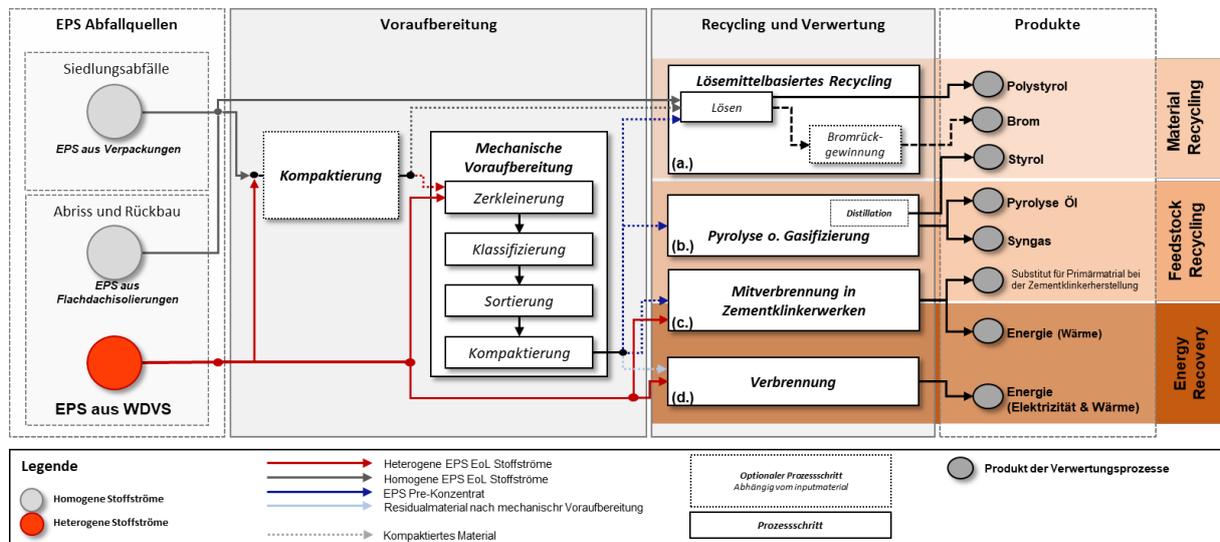


Abbildung 3-3: Abstrahierende Abbildung der Verwertungspfade (Prozesskette) von Recycling- und Verwertungsoptionen für EPS-basierte WDVS und EPS aus anderen EoL Stoffströmen (Abbildung basiert auf Schleier et al. (2022))

Die Analyse **techno-ökonomischer Indikatoren** der Recyclings- und Verwertungsprozesse (Investitionskosten, Betriebskosten, Ertrag) und der stoffspezifischen Kosten und Erlöse deutet darauf hin, dass sowohl das lösemittelbasierte Recycling zu Polystyrol, als auch die Pyrolyse mit Aufbereitung der Produkte zu Styrol aufgrund der hohen Preise für die hieraus resultierenden Stoffe ein höheres ökonomisches Potenzial als die anderen Verwertungsoptionen bieten. In dieser isolierten Kostenaufstellung sind potenziell einflussreiche Kostenpositionen, wie bspw. die notwendigen Transporte innerhalb der gesamten Prozesskette, die davon abhängig sind, ob eine zentrale oder dezentrale Netzwerkauslegung erfolgt, noch nicht berücksichtigt. Zudem beeinflussen Größendegressionseffekte die Wirtschaftlichkeit der Verwertungsoptionen und müssen daher in einem systematischen Netzwerkplanungsansatz durch Kapazitätsentscheidungen abgebildet werden.

Die Analyse **ökologischer Kennwerte** indiziert, dass das lösemittelbasierte Recycling von EPS gegenüber den etablierten und alternativen Verwertungsprozessen prinzipiell vorteilhaft ist. Allerdings fehlt eine Bewertung des Potenzials für einen bestimmten EoL Stoffstrom, wie EPS aus WDVS, welche nur auf Grundlage ganzheitlicher Lebenszyklusanalysen (LCA) ermittelt werden kann. Diese müssen im Kontext des zusammenhängenden Verwertungssystems durchgeführt und in die ökologische Bewertung zukünftiger Recyclingnetzwerke bei der Netzwerkplanung einfließen. Hierbei müssen zudem die Wechselwirkungen zwischen den Umwelteinflüssen der Prozesse sowie zwischen recycelten und substituierten Materialien berücksichtigt werden.

EPS-basierte WDVS treten beim Rückbau der Systeme und bei Gebäudeabriss primär als heterogener Stoffstrom auf. Sowohl lösemittelbasiertes Recycling, als auch thermo-chemisches Recycling mittels Pyrolyse (mit Aufbereitung des Pyrolyseöls zu Styrol) erfordern daher eine vorangestellte mechanische Aufbereitung. Die geographische Anordnung der Anlagen hat aufgrund der dort stattfindenden

Verdichtung des Materials einen erheblichen Einfluss auf die Transportkosten.

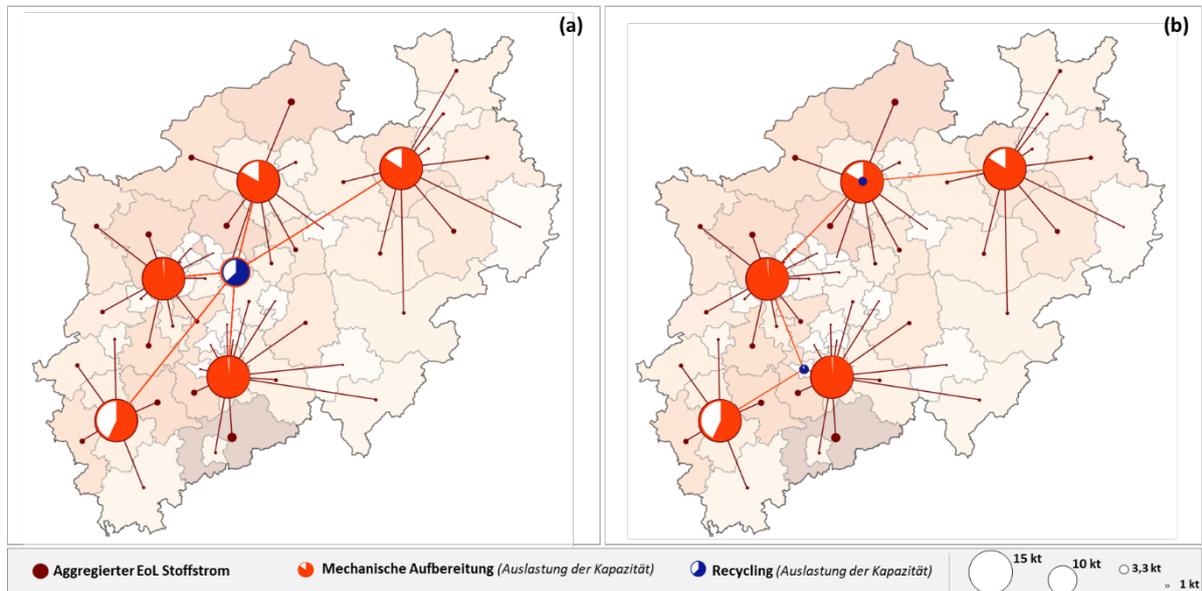


Abbildung 3-4: Mögliche standortoptimierte Netzwerkkonfigurationen für das Recycling von EPS-basierten WDVS EoL Stoffströmen bei einer angenommenen Kapazität der Recyclinganlagen von 10 kt/a in (a) und 3,3 kt/a in (b)

Abbildung 3-4 stellt einen Ausschnitt der Ergebnisse eines vereinfachten Netzwerkplanungsmodells für NRW dar. In dieser Betrachtung wurde die transportkostenoptimale Platzierung bei vollständiger Nutzung einer der alternativen Verwertungspfade angestrebt. Für die alleinige Verwertung des Gesamtaufkommens EPS-basierter EoL WDVS über diese Recyclingpfade wären im Jahr 2040, ausgehend von einer Kapazität der mechanischen Aufbereitungsanlagen von 15 kt/a, mindestens fünf dieser Anlagen in NRW nötig. Die optimalen Standorte dieser Anlagen sowie die Allokation der Abfallmassen aus den einzelnen Kreisen zu diesen Anlagen sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Da vergleichbare Eingangsmaterialanforderungen für die beiden alternativen Recyclingverfahren bestehen, wird hierbei nicht mehr zwischen dem lösemittelbasierten Recycling und der Pyrolyse zu Styrol unterschieden. Für das Recycling aufbereiteter EPS Massen ist eine Recyclinganlage mit einer Kapazität von 10 kt/a pro Jahr ausreichend. Da eine Recyclinganlage dieser Kapazität auch im Jahr 2040 nur zu ca. 65% ausgelastet werden könnte, ist in Abbildung 3-4(b) die optimale Platzierung kleiner dimensionierter Anlagen (3,3 kt/a) dargestellt. Diese entsprechen je einer Demonstrationsanlage für lösemittelbasiertes Recyclings im industriellen Maßstab (Demacsek et al. 2019).

Gegenüber der Errichtung alternativer Recyclingkapazitäten, die Transporte über weite Strecken inkludieren, könnte es sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoller sein, bestehende Infrastrukturen teilweise zu nutzen und kleinere, dezentrale EoL Mengen in nahegelegenen MVAs oder Zementklinkerwerken einer energetisch(-stofflichen) Verwertung zuzuführen. In Abhängigkeit der prozess- und transportbezogenen Kosten sowie Umwelteinflüsse muss bewertet werden, ob dezentralere oder zentrale Infrastrukturen dahingehend effizienter sind. Speziell für großskalige

Anlagen mit einer Kapazität von mehr als 10 kt sind diese Fragen nur unter Einbeziehung der EPS-basierten WDVS EoL Stoffströme der gesamten Bundesrepublik zu beantworten.

3.3 Kreislaufwirtschaft im Bausektor

3.3.1 Modellierung der Material- und Abfallmengen des Wohngebäudebestandes (WI)

Neben dem Kunststoffsektor, auf den in den vorangegangenen Abschnitten vertiefend eingegangen wurde, stellt außerdem der Gebäudesektor einen Bereich dar, der für das Erreichen einer Klimaneutralität in den Fokus genommen werden muss. So konnten im Jahr 2021 ungefähr ein Drittel der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland direkt oder indirekt dem Bausektor zugeordnet werden. Im Kontext von SCI4climate.NRW ist hierbei vor allem der Anteil an THG-Emissionen relevant, die durch den Materialbedarf dieses Sektors indirekt verursacht werden: Jährlich werden 517 Millionen Tonnen Material neu verbaut, was 90 % des gesamten inländischen mineralischen Rohstoffabbaus entspricht (Stand: 2021) (dena 2021). Außerdem fallen pro Jahr 230 Millionen Tonnen Bau- und Abbruchabfälle (Stand: 2020) an, was in etwa 55 % des gesamten Abfallaufkommens in Deutschland darstellt (Umweltbundesamt 2022). Ein relevanter Anteil davon stammt aus dem Abriss und der Modernisierung von Gebäuden. Für eine klimaneutrale Zukunft muss hier besonders auf das Schließen von Stoffkreisläufen abgezielt werden, um Abfälle als potenzielle Ressource weiter zu nutzen.

Ein entscheidender Faktor für die Planung und Umsetzung dieses Ziels stellt die Quantifizierung der aktuellen und zukünftigen Stoffströme im Gebäudesektor besonders auf Länderebene dar. Diese kleinräumigere Ebene ist besonders relevant, da sie ermöglicht Stoffkreisläufe regional zu schließen und entstehende Potenziale unter Vermeidung weiter Transportwege zu nutzen. Zudem wird sich die Zusammensetzung der zukünftigen Abfallströme aus den Bau- und Abbruchabfällen verändern (z.B. durch die zunehmende energetische Sanierung, siehe Abschnitt 3.3), für die es heute noch keine etablierte Aufbereitungsinfrastruktur gibt. Derzeit ist unklar, wo diese sinnvollerweise zukünftig entstehen sollte.

Das Wohngebäudebestandsmodell des Wuppertal Instituts kann helfen, die Datenlücken zu schließen. Es quantifiziert zudem für einen bestimmten Gebäudebestand die heutige und zukünftige Materialzusammensetzung und -menge. Im Rahmen von Sci4Climate.NRW konnte das bestehende Modell, das als Grundgerüst bereits vorhanden war, nicht nur auf den Gebäudebestand NRWs angewendet, sondern auch grundlegend weiterentwickelt werden. So kann nicht mehr nur die Materialzusammensetzung und -menge des aktuellen Gebäudebestands modelliert werden, sondern durch den Einbezug von prognostizierten Abriss- und Zubauraten auch eine Aussage darüber getroffen werden, mit welchen Stoffströmen bis zum Jahr 2060 voraussichtlich zu rechnen ist. Erst durch diese Erweiterung wird eine gezielte Strategieentwicklung für das Schließen bestehender und künftiger Stoffkreisläufe möglich. Die zentralen Ergebnisse werden im Paper „Abschätzung der zukünftigen Stoffströme im Gebäudebestand“ (Bergmann und Steger 2023) detailliert dargestellt.

Das Modell basiert auf der Gebäudetypologie der IWU Darmstadt (Loga et al. 2015). Diese definiert für verschiedene Alterscluster typische Gebäude innerhalb der Gebäudeklassen Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser (RH), Mehrfamilienhäuser (MFH), große Mehrfamilienhäuser (GMH) und Hochhäuser (HH). Für die generischen Gebäudetypen des IWU werden jeweils die verschiedenen Teile der Gebäudehülle modelliert. Anhand der U-Werte der Bauteile und der unterstellten Heiztechnik werden für jeden Gebäudetyp die Energieeffizienz abgeschätzt und verschiedenen Szenarien der energetischen Sanierung entwickelt sowie die damit verbundene Verbesserung zu ermitteln. Das Wohngebäudebestandsmodell verknüpft die Konstruktionsweisen der Gebäudetypen mit Materialdaten. Zudem werden die Gebäude im Vergleich zu den IWU-Daten um weitere Bauteile, wie z.B. Innenwände, ergänzt.

In SCI4climate.NRW wurde das Wohngebäudebestandsmodell mit Daten zum Wohngebäudebestand in NRW verknüpft. In NRW gibt es laut Statistischem Landesamt NRW rund 3,93 Mio. Wohngebäude. Davon sind 62 % oder 2,45 Mio. EFH und 17 % Gebäude mit zwei Wohneinheiten. Die restlichen 21 % (oder 825.000 Wohngebäude) bestehen aus drei oder mehr Wohnungen. Überträgt man die Altersverteilung der Wohngebäude aus der aktuellsten Zensus-Erhebung von 2011 auf 2021, ergibt sich daraus folgende Altersverteilung des Wohngebäudebestandes in NRW (Abbildung 3-5).

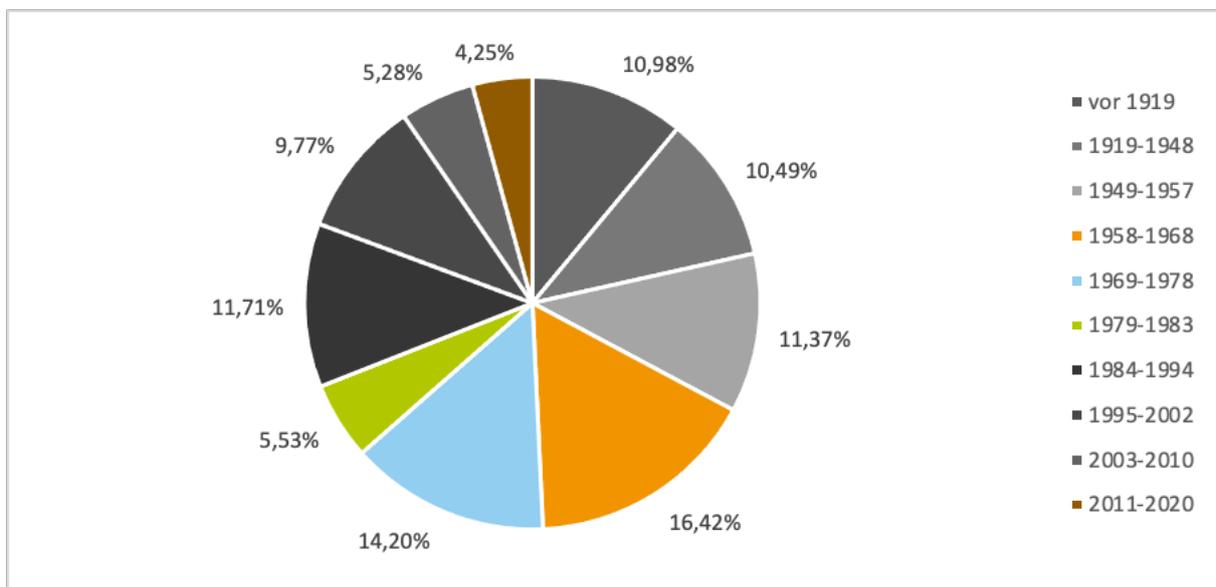


Abbildung 3-5: Altersverteilung des Wohngebäudebestandes in NRW

Verknüpft man diese Daten mit dem Modell, dann betrug im Jahr 2021 die Masse der verbauten Materialien in NRW ca. 4.423 Millionen Tonnen, die beiden Hauptbestandteile waren dabei (Stahl-) Beton mit über 55 % und Kalksandstein mit 15 %. Alle übrigen modellierten Materialgruppen, darunter Bimsbeton, Mörtel/Estrich/Putz, Ziegel und Holz, stellen jeweils prozentuale Anteile zwischen 3 und 6,5 %.

Über den Modellierungszeitraum bis 2060 wurden konstante Abbruchzahlen von rund 2.250 Gebäuden und eine sinkende Zubauzahlen von 17.000 Wohngebäuden (2022) bis 4.000 Wohngebäude (2060) prognostiziert (basierend auf prozentualen Prognosen des UBA in Bürger et al. 2017). Nach einem ersten vorläufigen Szenario, bei dem der Neubau in Massivbauweise erfolgt, steigen die verbauten Materialien im Gebäudebestand demnach bis 2060 auf 4.604 Millionen Tonne an, was einem Plus von rund 4 % gegenüber 2021 entspricht. Die Materialzusammensetzung ändert sich dahingehend, dass der Anteil an (Stahl-)Beton auf knapp 59 % und der Anteil an Bimsbeton auf 14 % ansteigt. Die übrigen, bereits benannten modellierten Materialien, tragen zwischen 2,5 und 6 % zur Gesamtmenge bei. Im Jahr 2022 beträgt der prognostizierte Bedarf noch knapp 14 Millionen Tonnen, er geht jedoch bis 2060 auf 3,3 Millionen Tonnen pro Jahr zurück. Im Abriss fallen über den Betrachtungszeitraum hinweg jährlich konstant knapp 4 Millionen Tonnen Material an, von denen 50 % Beton, 17 % Kalksandstein und 9 % Bimsbeton ist. Die Materialien, die die wichtigste Rolle im Neubau spielen, sind Beton mit 86 % und Mörtel/Putz/Estrich mit 12 %.

Einen Überblick über die insgesamt bis zum Jahr 2060 anfallenden Abfälle in diesem ersten vorläufigen Szenario im Bausektor NRW sowie die Gesamtmenge des benötigten Zubaumaterials ist Abbildung 3-6 zu entnehmen. Bis 2060 fallen so insgesamt rund 152 Millionen Tonnen Abfälle im Bausektor NRWs an, neu benötigt werden 333 Millionen Tonnen. Dabei unterscheiden sich die beiden akkumulierten Stoffströme nicht nur in ihrer Menge, sondern auch in ihrer Materialzusammensetzung.

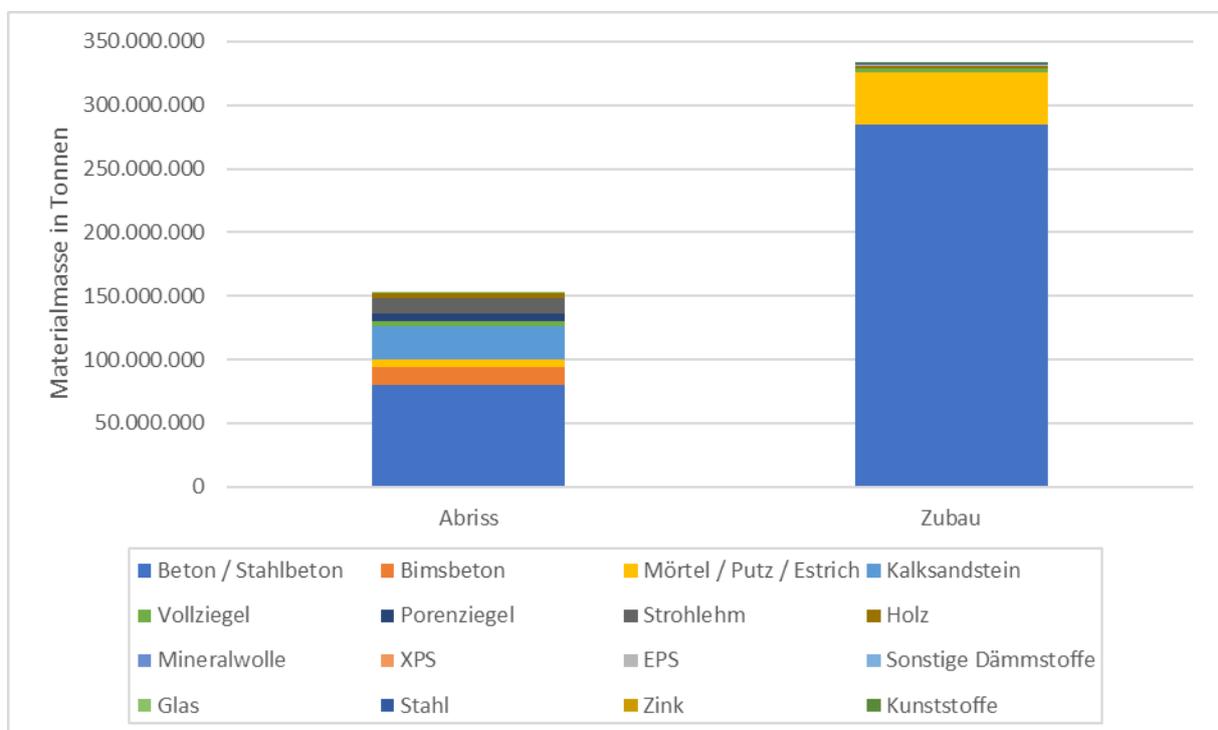


Abbildung 3-6: Kumulierte Materialmassen und -zusammensetzung durch Abriss und Zubau (2022-2060)

Das bisher vorliegende Szenario ist jedoch nur als vorläufiges Szenario zu interpretieren, da zum einen noch unterschiedliche Bauweisen, wie z.B. Holzhybrid, als neue Gebäudetypen im Modell hinterlegt werden sollen. Zudem fehlen im Modell noch Daten für die energetische Sanierung und die Modernisierung (altersgerechter Umbau, Balkone oder externe Aufzüge) des Wohngebäudebestandes. Diese Daten sollen im neuen Sci4Climate.NRW-Projekt erarbeitet werden.

3.3.2 Modellierung der Wohnungsbestandsentwicklung (OM, Abdelshafy und Walther 2023)

Die Baubranche ist eine sehr materialintensive Branche. Sie verbraucht und erzeugt große Mengen Material und Abfall. Daher kann die Einführung zirkulärer Geschäftsmodelle hilfreich sein, um die Verschwendung natürlicher Ressourcen zu minimieren. In diesem Zusammenhang ergibt das Recycling des Abbruchschutts Gesteinskörnungen, die verwendet werden können, um die natürlichen Gesteinskörnungen zu ersetzen. Aufgrund der hohen Volumina und des geringen Wertes der entsprechenden Materialien ist die Bauwirtschaft ein regionaler Wirtschaftszweig. Da die Transportkosten einen großen Teil der Produktpreise ausmachen, finden die Produktion von Baumaterialien sowie die Recyclingaktivitäten normalerweise sehr nahe an den Bau- und Abbruchaktivitäten statt. Neben den räumlichen Aspekten ist auch die Zeit eine entscheidende Dimension, da sich das regionale Angebot und die Nachfrage aus verschiedenen Gründen (z. B. aufgrund des demografischen Wandels, des Wohnungsbestands, etc.) im Laufe der Zeit ändern können. Daher sind beide Aspekte (d. h. Ort und Zeit) bei der Modellierung der Materialflüsse im Bausektor von großer Bedeutung. Folglich wurde ein dynamisch-örtliches MFA-Modell abgeleitet, um sowohl die Bau- als auch die Abbruchaktivitäten in NRW unter Berücksichtigung der zeitlichen und räumlichen Aspekte sowie der Materialarten zu modellieren (exemplarische Ergebnisse sind in Abbildung 3-7 dargestellt). Anhand des Modells und der Analysen werden die Synergien zwischen den Recycling- und Bauaktivitäten identifiziert, sodass Materialangebot und -nachfrage in Einklang gebracht werden können. Die Ergebnisse sind nicht nur im Hinblick auf die Ressourceneffizienz wichtig, sondern helfen auch bei der Antizipation und Planung der Umstrukturierung der Bausektorwertschöpfungskette, wie der Standorte und Kapazitäten von Beton- und Recyclingwerken.

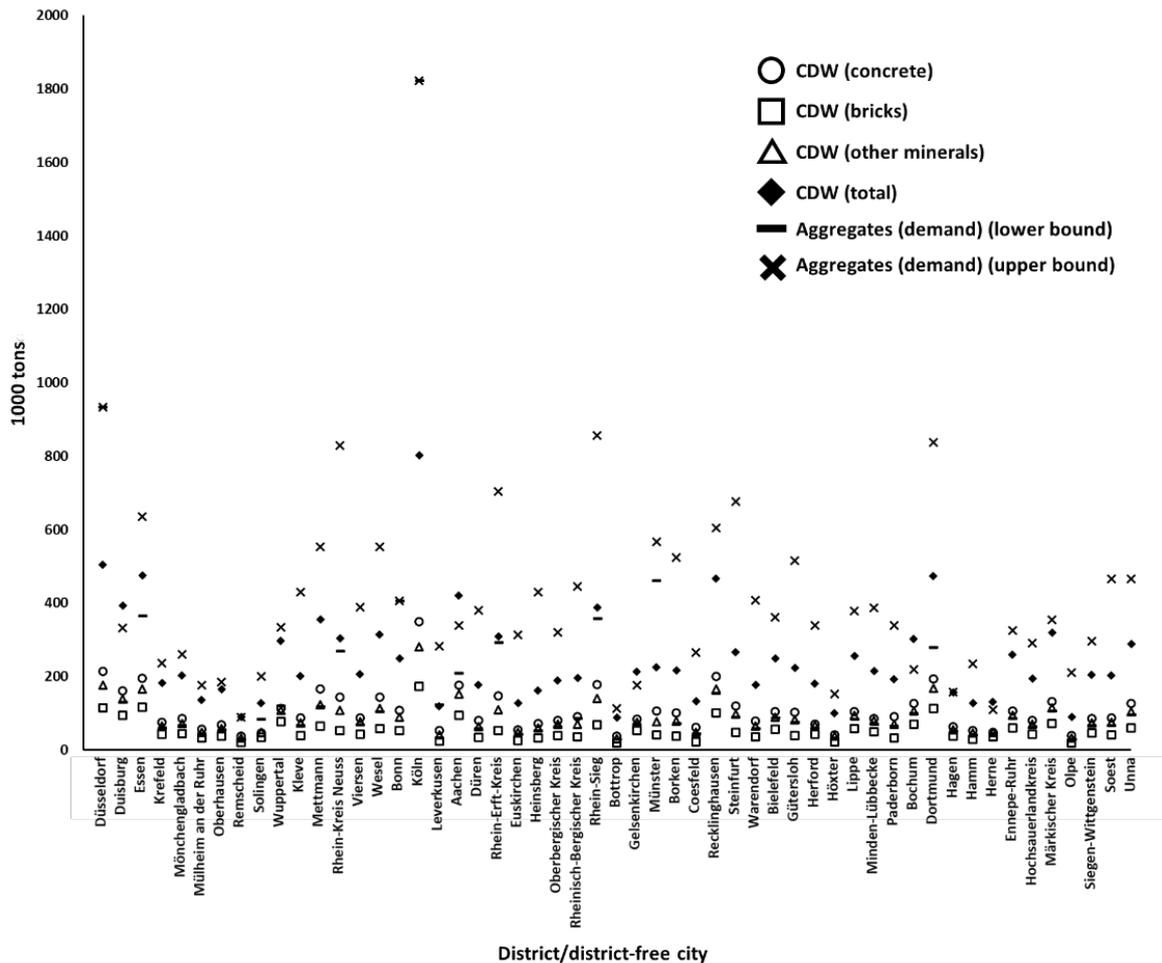


Abbildung 3-7: Exemplarische Ergebnisse (Abdelshafy und Walther 2023)

3.3.3 Kopplung von CO₂-Abscheidung und -Nutzung mit der Bauindustrie (OM, Abdelshafy und Walther 2022a)

Neben der Regionalität hat auch der Standort einen erheblichen Einfluss auf einige Stoffströme und Lieferketten bspw. im Bausektor und beim Transport von CO₂ per Lkw. Daher ist eine Erweiterung des ersten Rahmens um die räumlichen Aspekte zwingend erforderlich. Die Analysen stellen eine relevante Fallstudie zur Kopplung von CCU mit der Bauindustrie durch Karbonisierung von Betonprodukten und Abfällen dar. Hier kann eine solche Wertschöpfungskette auch ein klares Beispiel für die Verschmelzung von CO₂-Neutralität und Kreislaufwirtschaft sein. Dabei wurden die relevanten Bauprodukte und zementgebundenen Materialien identifiziert und quantifiziert. Anschließend werden für die ermittelten Strömungen räumliche MFA-Modelle in Form von Choroplethenkarten (Geoanalysen) erstellt. Daraus kann auf die räumliche Verteilung der Sequestrierungskapazitäten geschlossen werden (Abbildung 3-8).

Abschließend wird ein Optimierungsmodell (d. h. Location-Allocation-Modell) entwickelt, um unter Berücksichtigung der Kapazitäten der Beton- und Recyclingwerke die kürzesten Wege zwischen den CO₂-Quellen und Kohlenstoffsenken zu ermitteln. Daraus lässt sich ein Zusammenhang zwischen Entfernung und Sequestrationskapazität schlussfolgern. Die Analysen zeigen, dass die Standortaspekte und der Transport die potenziellen Karbonisierungslieferketten erheblich beeinflussen können. Da CCS-Lieferketten von großräumigen Transportsystemen (d. h. Schifffahrt und Pipelines) abhängen, sind die spezifischen Transportkosten pro Tonne CO₂ gering und weisen eine nahezu konstante Funktion mit der Entfernung auf. Im Gegensatz dazu hängt die Lieferkette der Karbonisierung aufgrund der geografischen Verteilung und der geringen Größe der Kohlenstoffsenken von Transportsystemen mit geringem Volumen (z. B. Lastwagen) ab. Daher sind die Transportkosten höher und variieren erheblich. Wie aus den Ergebnissen ersichtlich ist, ähnelt die Beziehung zwischen der kumulativen Kapazität und der Entfernung einer polynomialen (quadratischen) Funktion (Abbildung 3-9).

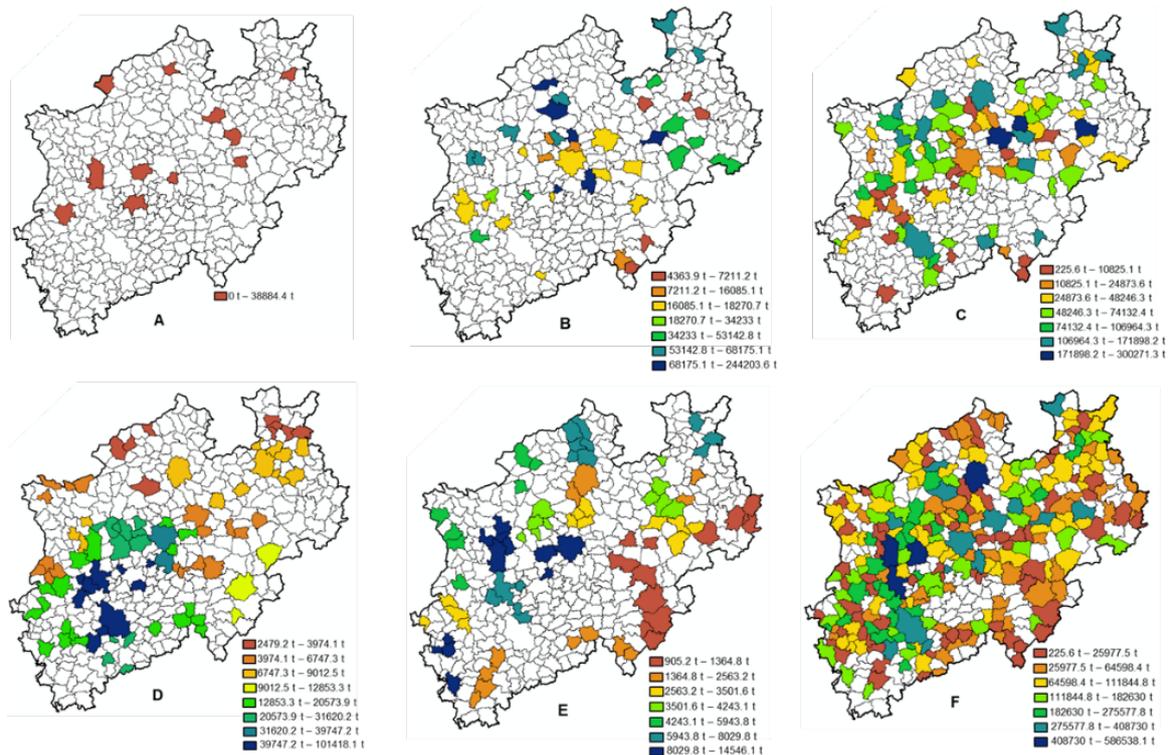


Abbildung 3-8: Beispiel für die Geodatenanalyse (Standorte und Kapazitäten) der Produzenten und Recycler (Abdelshafy und Walther 2022a)

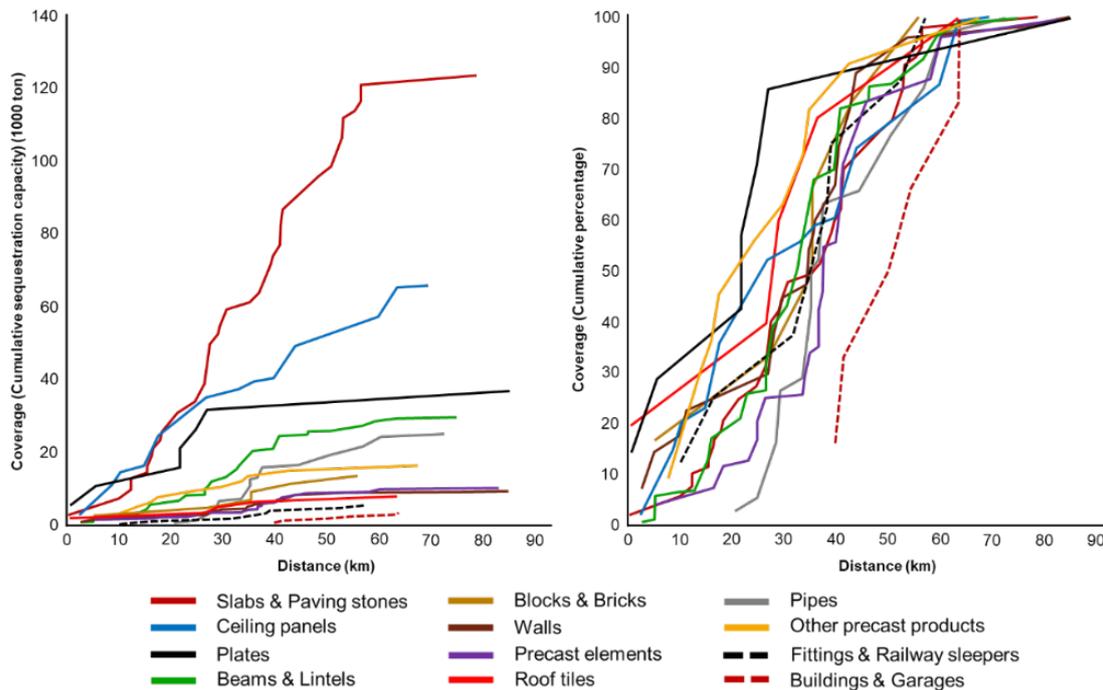


Abbildung 3-9: Ergebnisse der Location-Allocation-Modelle (Abdelshafy und Walther 2022a)

3.4 Auswirkungen der industriellen Transformation im Stahlsektor auf Material- und Energieflüsse (OM, Radloff/Abdelshafy/Walther 2023)

Thyssenkrupp als der dominante Stahlhersteller in NRW hat eine vollständige Umstellung seiner auf der Primärroute basierenden Stahlproduktion angekündigt. Bereits im Jahr 2026 soll Deutschlands größte Direktreduktionsanlage in Betrieb gehen. Bis zum Jahr 2045 sollen schrittweise alle Hochöfen ersetzt worden sein (thyssenkrupp SE 2022). Perspektivisch soll der gesamte Primärstahl durch wasserstoffbasierte Direktreduktion (H₂-DR) erzeugt werden, was bei Verwendung grünen Wasserstoffs eine sehr weitgehende Minderung der CO₂-Emissionen ermöglicht.

Dabei enthält die Roadmap von thyssenkrupp technische und prozessuale Besonderheiten, die in den allgemeinen Berechnungsmodellen der bisherigen Forschung nicht abgebildet werden. Bestehende Prozessmodellierungen exemplarischer Direktreduktionsanlagen (Hölling et al. 2017; Vogl et al. 2018) wurden deshalb anhand von Experteninterviews und veröffentlichter Informationen an diese Roadmap angepasst und so ein standortspezifisches Prozessmodell entwickelt. Dieses erlaubt detaillierte Berechnungen von spezifischen Wasserstoff- und Energiebedarfen sowie Kostenabschätzungen vorzunehmen. In Verbindung mit den angefertigten makroskopischen Materialflussanalysen wird so ermöglicht, zuverlässige Berechnungen der landesweiten Energie- und Stoffströme einer möglichen wasserstoffbasierten Stahlproduktion in NRW abzuleiten.

Die technischen Pläne von thyssenkrupp weichen in mehreren Punkten von einer konventionellen DR-Anlage ab, wie sie in Hölling et al. (2017) und Vogl et al. (2018) behandelt wird. In einer solchen wird das heiße, direktreduzierte Eisen (DRI) abgekühlt, bevor es den Schachtofen verlässt und zum Wiedereinschmelzen zu EAFs (Electric Arc Furnace) transportiert. Im Gegensatz dazu werden die DR-Schachtofen nach den Plänen von thyssenkrupp mit speziell konzipierten Schmelzaggregaten, sogenannten Einschmelzern, kombiniert. Darüber hinaus sollen die für die Stahlqualität entscheidenden BOFs (Basic Oxygen Furnace) beibehalten werden. Hierbei strebt thyssenkrupp während der Übergangsphase an, dass die BOFs sowohl mit wasserstoffbasiertem DRI als auch mit konventionellem Roheisen versorgt werden können. Da die bestehenden BOF-Prozesse für einen Kohlenstoffgehalt von 4,7 % optimiert sind, ist zumindest mittelfristig eine entsprechende Anreicherung des DRI mit Kohlenstoff erforderlich. Abbildung 3-10 bildet diese Prozesskette ab und stellt die wesentlichen im Prozessmodell berücksichtigten Materialströme dar.

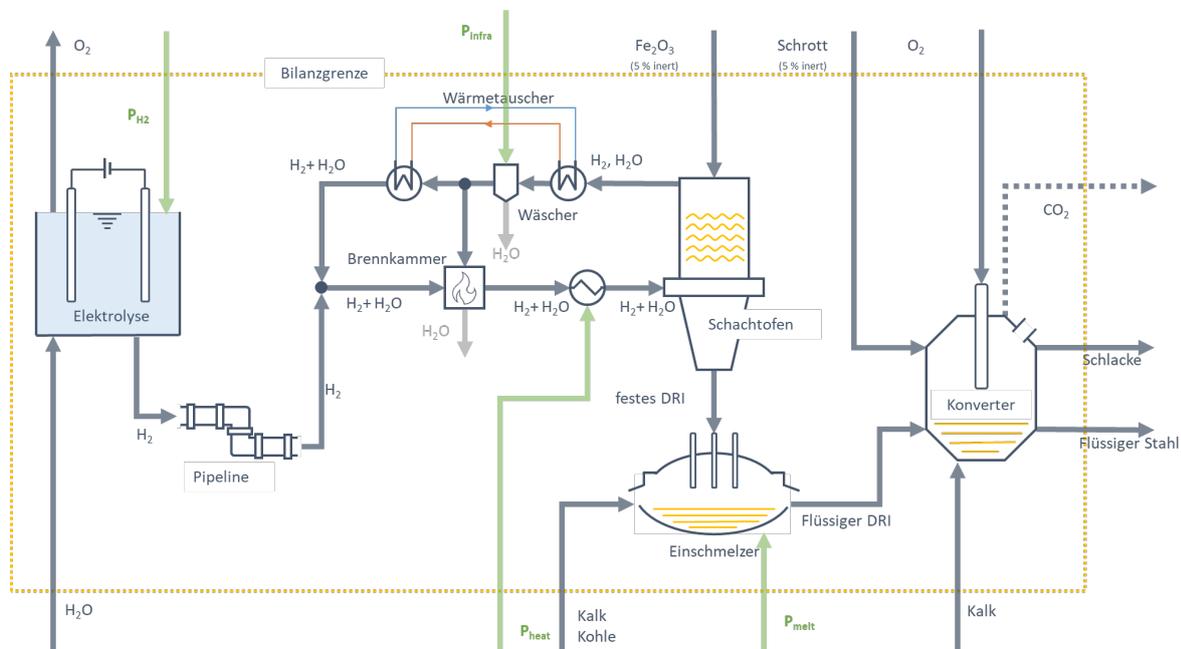


Abbildung 3-10: Vereinfachtes Schema des Prozessmodells der auf H₂-DR umgestellten Primärstahlerzeugung nach Plänen von thyssenkrupp mit den wesentlichen Stoffströmen und benötigten elektrischen Leistungen P_i (Radloff, R.; Abdelshafy, A.; Walther, G. 2023)

Der berechnete spezifische Energiebedarf von 3,07 MWh/t ist aufgrund abweichender Annahmen niedriger als beispielsweise der von Vogl et al. (2018) ermittelte Wert von 3,48 MWh/t. Auch die Autoren (Rechberger et al. 2020) geben einen deutlich höheren Energiebedarf von 3,64 MWh/t an. Ähnlich wie Vogl et al. (2018) gehen sie von einer Abkühlung und anschließenden Wiedererwärmung des DRI aus. Dieser Vergleich verdeutlicht den energetischen Vorteil der von thyssenkrupp geplanten Kombination des DR-Schachtofens mit dem Einschmelzer. Durch die Substitution der Koks- und Kohle als primären Energieträger und als Reduktionsmittel in der konventionellen Hochofenroute mit Elektrolyse-Wasserstoff stellt die Transformation zur DR eine indirekte Elektrifizierung der

Primärstahlerzeugung dar. Die Schlackenproduktion des H₂-DR-Verfahrens ist mit 220 kg deutlich geringer als die des konventionellen Hochofens mit 380 kg. Jene unterscheidet sich auch in der chemischen Zusammensetzung.

Szenarioanalyse

Durch die Hochskalierung der spezifischen Material- und Energieflüsse der Prozessmodellierung auf die gesamte Stahlindustrie NRWs konnte bei Einbettung in die Materialflussanalysen eine Szenarioanalyse durchgeführt werden (Abbildung 3-11 als Beispiel). Hierbei stand eine Quantifizierung der potenziellen Bedarfe an erneuerbarer Energie (RE) und an Elektrolyse-Wasserstoff, bei einer großflächigen Einführung der H₂-DR mit einer hypothetisch gleichbleibend hohen Primärstahlproduktion, im Vordergrund. Sowohl für den Zeitraum 2045, zu dem das Ziel einer 95 % CO₂-Reduktion gegenüber 2016 angenommen wird, als auch für den Zeitraum 2030, als möglichen Zwischenschritt mit dem Ziel einer 30 % Reduktion, wurden je zwei Szenarien aufgestellt:

Das Szenario High-H₂ schätzt dabei den Wasserstoffbedarf nach oben hin ab und spiegelt eine größtmögliche Fokussierung auf Wasserstoff wider. Es wird der Betrieb von vollständig auf Wasserstoff basierenden DR-Anlagen angenommen sowie im Zwischenschritt die Einblasung von Wasserstoff an noch bestehenden Hochöfen. Im Szenario Low-H₂ wird den zu erwartenden signifikanten Wasserstoffengpässen Rechnung getragen und ein starker Rückgriff auf Erdgas in der DR abgebildet. Es wird keine Wasserstoffeinblasung an den Hochöfen sowie ein Erdgaseinsatz in Höhe von 50% als Reduktionsmittel in der DR angenommen.

In beiden Szenarien wird davon ausgegangen, dass das Stahlwerk der Hüttenwerke Krupp-Mannesmann dem prozessualen Vorbild von thyssenkrupp folgt. Weitere notwendige CO₂-Einsparung zum Erreichen der CO₂-Reduktionssziele werden in beiden Szenarien durch CCUS-Kapazitäten und ergänzende Elektrifizierungsmaßnahmen, bspw. der Aufheizöfen in den Stahlwalzwerken, sichergestellt und Abschätzungen für die dafür notwendigen Energiebedarfe durchgeführt.

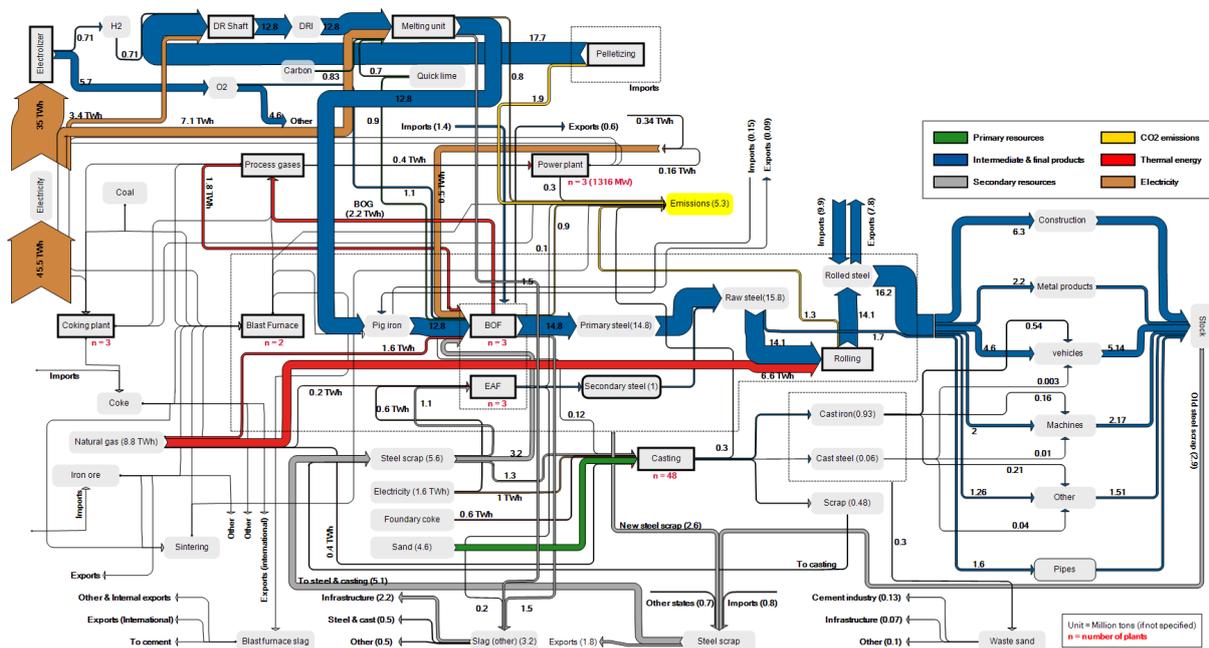


Abbildung 3-11: Ein Beispiel für die Szenarioanalyse (Szenario High-H2 2045) (Radloff, R.; Abdelshafy, A; Walther, G. 2023)

3.5 Intersektionale Interdependenzen der Materialflüsse von Stahl-, Zement- und Baubranche in NRW (OM, Abdelshafy und Walther 2022b)

Da die Energie- und Stoffstromsysteme sehr komplex sind, wirken sich Änderungen nicht nur auf die Produktionsprozesse, sondern auf die gesamten brancheninternen und -übergreifenden Lieferketten aus. Somit wird die im Industrie- und Energiesektor umgesetzte Klimapolitik auch die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen beeinflussen. In ähnlicher Weise wird die Umsetzung fortschrittlicher Kreislaufwirtschaftsrichtlinien Auswirkungen auf die Dekarbonisierungsstrategien haben. Um diese Verflechtungen und Wechselwirkungen zu untersuchen, wurden branchenübergreifende MFA-Modelle abgeleitet, um vier Sektoren in NRW gleichzeitig zu analysieren (d. h. Stahl, Zement, Bau und Strom) (Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13). Dabei wurden die Modelle auf der Grundlage von Bottom-up-Prozessanalysen und umfangreichen regionalstatistischen Daten und Politikanalysen entwickelt, um die relevanten Ströme zu identifizieren und zu quantifizieren.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass Energiewende- und Zirkularitätskonzepte neben der beabsichtigten Reduzierung von THG-Emissionen und steigenden Recyclingquoten auch unbeabsichtigte Auswirkungen auf Stoffströme haben. Diese weniger offensichtlichen Effekte werden aufgrund der Komplexität der Lieferketten und branchenübergreifenden Verflechtungen oft übersehen. Beispielsweise wird die Abnahme oder sogar das Auslaufen bestimmter Stoffströme (z. B. REA-Gips aus Kraftwerken) zu einer steigenden Nachfrage nach natürlichen Ressourcen (z. B. Primärgips) führen. Das kann in einem rohstoffarmen Bundesland wie NRW (und einem Land wie Deutschland) eine große Herausforderung sein.

Ebenso könnten veränderte Stoffströme aufgrund der THG-Minderungsmaßnahmen an anderer Stelle zu einer unbeabsichtigten Erhöhung der THG-Emissionen führen, wenn die derzeit verfügbaren vorteilhaften Sekundärstoffe durch weniger vorteilhafte Alternativen ersetzt werden. Beispielsweise könnte ein Mangel an Hüttensand die Menge an CEM II und CEM III verringern und zu einer höheren Portlandzementproduktion und somit zu steigenden CO₂-Emissionen führen. Ebenso kann ein zunehmendes Recycling von Kunststoffen in einer Kreislaufwirtschaft zu steigenden THG-Emissionen führen, wenn der bisherige Energieträger Kunststoff nun durch einen alternativen Energieträger mit höheren THG-Emissionen ersetzt wird. Daher können die vorgestellten Analysen den politischen Entscheidungsträgern helfen, die indirekten Auswirkungen der Energiewendepolitik zu verstehen, den Einfluss auf die bestehenden Wertschöpfungsketten und industriellen Akteure zu antizipieren und alle möglichen Ressourcenpotenziale zu nutzen.

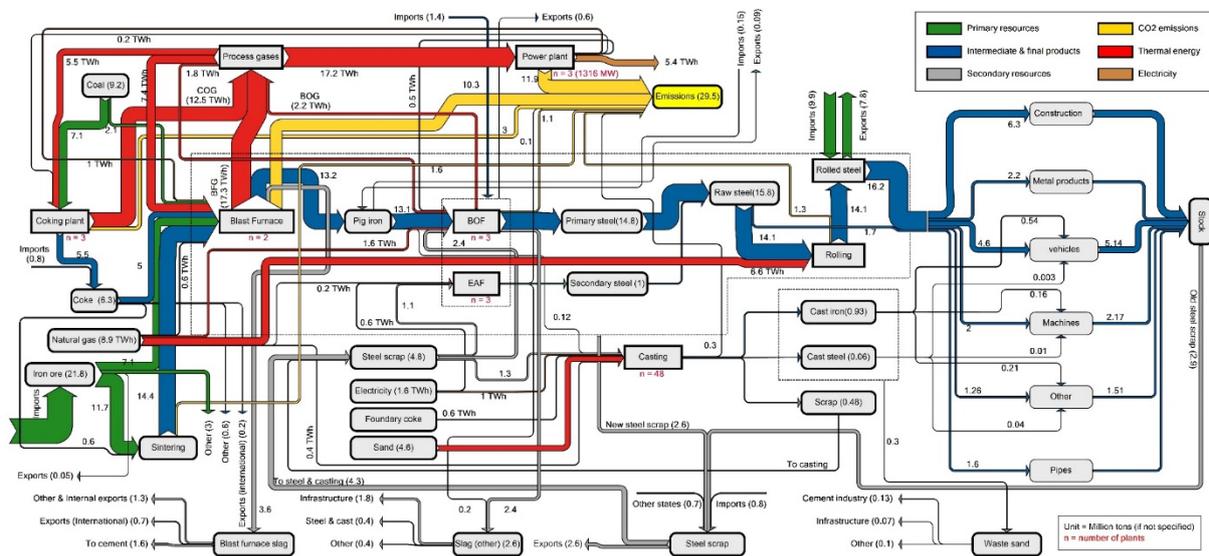


Abbildung 3-12: Stoff- und Energieströme der Stahlindustrie in NRW (Abdelshafy und Walther 2022b)

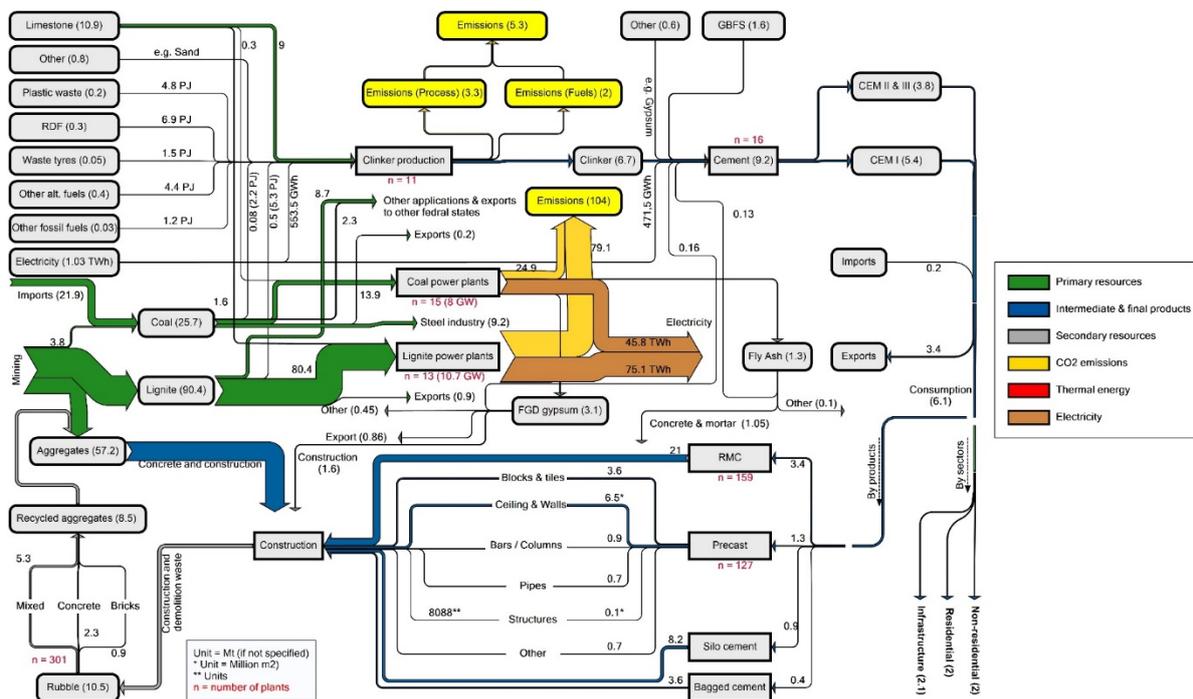


Abbildung 3-13: Stoff- und Energieströme der Zement- und Bauindustrie sowie der Stein- und Braunkohlekraftwerke in NRW (Abdelshafy und Walther 2022b)

3.6 Technologiebasierte Potenziale für Treibhausgasreduktionen in NRW energieintensiver Prozessindustrien und zugehöriger Ressourcenbedarfe (LTT)

Die Forschungsaktivitäten des LTT konzentrierten sich auf die Modellierung energieintensiver Prozessindustrien und die Analyse möglicher Technologiealternativen zur Reduktion von Treibhausgasen sowie zugehöriger Ressourcenbedarfe. Die ermittelten Reduktionspotentiale basieren auf der Minimierung von Treibhausgasemissionen. Das zugehörige Optimierungsframework basiert auf Kätelhön et al (2016).

Über den Verlauf der Forschungsintervalle wird der Betrachtungsrahmen hinsichtlich der berücksichtigten Industrien und Technologiealternativen sukzessive erweitert. Das Forschungsintervall 1 setzte den Fokus auf Carbon Capture and Utilization (CCU) Technologien in der Chemieindustrie als indirekte Elektrifizierungsstrategie. Das Forschungsintervall 2 betrachtete zusätzlich zu indirekten auch direkte Elektrifizierungsstrategien in der Chemie-, Stahl-, und Zementindustrie. Im Forschungsintervall 3 wurden neben der Elektrifizierung die Nutzung von Biomasse als Rohstoff und Energieträger, sowie die Steigerung von Recyclingquoten in einem gekoppelten Modell für die Chemie-, Stahl-, und Zementindustrie untersucht. Durch die Modellierung in einem gekoppelten Modell wurden zudem Interaktionspotentiale zwischen den Industrien identifiziert und die Auswirkungen von Reduktionsmaßnahmen in einer Industrie auf die Treibhausgasemissionen anderer Industrien erkannt

Ein Beispiel ist der Wegfall von Schlacke für die Zementherstellung in Folge eines Wechsels zum Direktreduktionsverfahren in der Stahlindustrie. Zusätzlich unterstützte ein gekoppeltes Modell die Harmonisierung von Annahmen, beispielsweise für die spezifischen Emissionen der Stromerzeugung. Für eine detaillierte Beschreibung der Modellierung und des Betrachtungsrahmens wird auf die Einzelstudien verwiesen (Zibunas et al. 2020, SCI4climate.NRW 2021b, Bühner 2022).

3.6.1 Carbon Capture and Utilization in NRWs Chemieindustrie (Zibunas et al. 2020)

Alternativ zur konventionellen Produktion von Chemikalien auf Basis von fossilen Ressourcen können die gleichen Chemikalien mittels CCU basierend auf CO₂ und H₂ produziert werden. Für die Bereitstellung von CO₂ definiert das Verdichten von CO₂ aus industriellen Punktquellen die untere und Direct Air Capture die obere Grenze für anfallende Emissionen. Für die Bereitstellung des H₂ wird angenommen, dass H₂ 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 H₂ reduziert.

Abbildung 3-14 zeigt die Treibhausgasemissionen der Chemieindustrie aufgetragen über den spezifischen Emissionen des Stromsektors. Für die fossilbasierte 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.

Die blauen Linien repräsentieren das optimale Produktionssystem der Chemieindustrie mit minimalen Treibhausgasemissionen, wobei sowohl fossilbasierte als auch CCU-basierte Technologien im Produktionssystem enthalten sein können. Für spezifische Emissionen des Stromsektors zwischen 600 und ca. 200 g_{CO₂-äq}/kWh gleichen die Treibhausgasemissionen des optimalen Produktionssystems denen der fossilbasierten Produktion. Das optimale System besteht aus fossilbasierten Technologien und es existiert kein Reduktionspotential durch den Einsatz von CCU. Ein Wechsel zu CCU würde in diesem Bereich sogar zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen führen.

Unterhalb von ca. 200 g_{CO₂-äq}/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 CO₂-Quelle. Der Energieaufwand zur Bereitstellung des CO₂ bestimmt gemeinsam mit der verwendeten Menge CO₂ die Differenz der Reduktionspotentiale. Durch den geringeren Energieaufwand für CO₂ 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 fossilbasierten Technologien, wodurch der Bedarf an Elektrizität für die H₂-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 CO₂-Äquivalenten bei spezifischen Emissionen von 0 g_{CO₂-Äq}/kWh. Jedoch ist ein Erreichen der spezifischen Emissionen des Stromsektors von 0 g_{CO₂-Äq}/kWh selbst bei vollständiger Verwendung erneuerbarer Energieträger nicht als realistisch einzustufen.

Nichtsdestotrotz existiert für spezifische Emissionen des Stromsektors unterhalb von 100 g_{CO₂-Äq}/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.

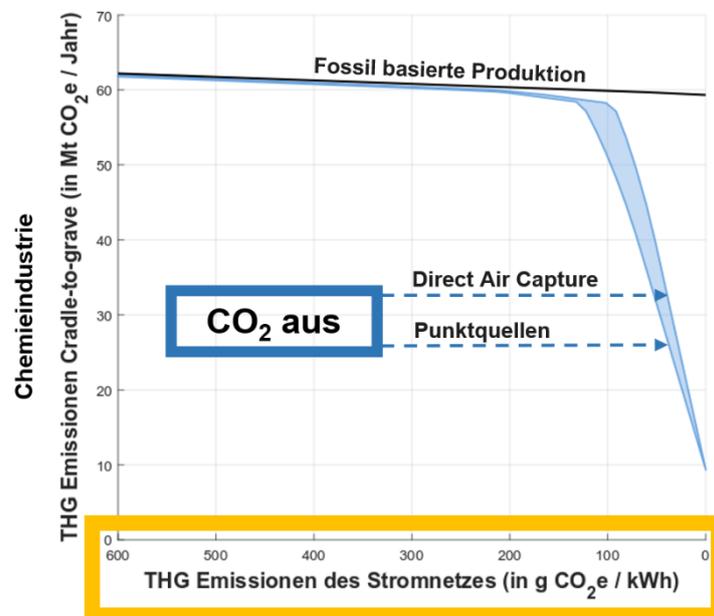


Abbildung 3-14: Treibhausgasemission der Chemieindustrie über den gesamten Lebenszyklus (cradle to grave) für die gesamte Jahresproduktion der betrachteten Chemikalien und Kunststoffe in Nordrhein-Westfalen

Abbildung 3-15 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_{CO₂-Äq}/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 spezifische Emissionen des Stromsektors von $>50 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{-äq}}/\text{kWh}$ erzielen nicht alle CCU-Technologien eine Reduktion, sodass es sinnvoll ist nur eine Teilmenge zu implementieren. Für spezifische Emissionen $\leq 50 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{-äq}}/\text{kWh}$ können jedoch alle CCU-Technologien ein Reduktionspotential erzielen. 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. Abbildung 3-15 zeigt vier Beispiele für Elektrifizierungsoptionen abseits von CCU und auch außerhalb der Chemieindustrie. Die gezeigte Elektrifizierungsoptionen können bei gleicher Menge an Elektrizität mehr Emissionen vermeiden. Daher sollten bei begrenzter Verfügbarkeit von Elektrizität zunächst die effizientesten Elektrifizierungsoptionen umgesetzt werden, um möglichst hohe Reduktionen zu erzielen. Jedoch bietet die Implementierung von CCU-Technologien die Möglichkeit CO_2 aus schwervermeidbaren 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. (2015) verwiesen. Für eine Detailanalyse bezüglich CCU wird auf eine Studie von Kätelhön et al. (2019) verwiesen.

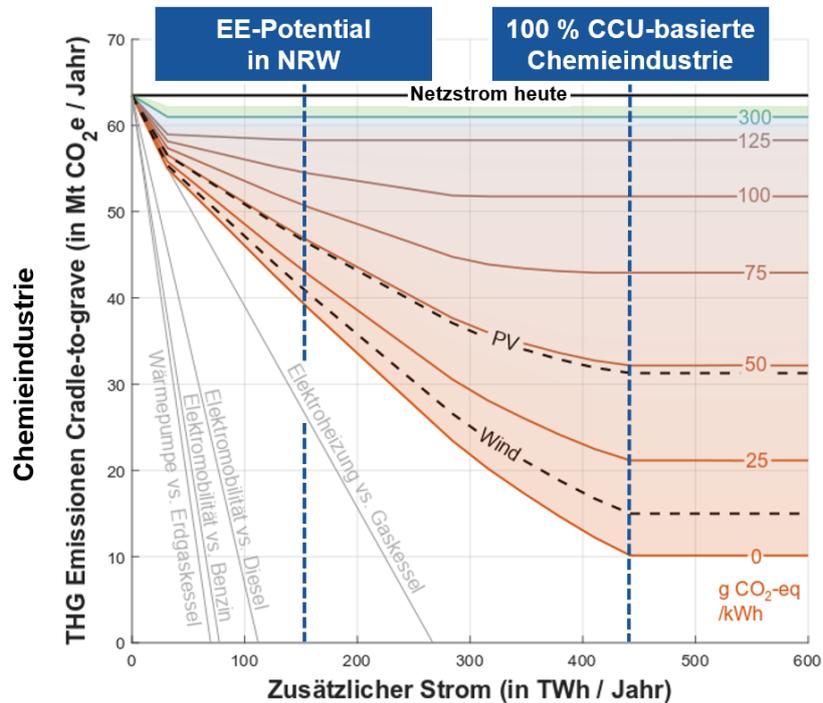


Abbildung 3-15: Treibhausgasemission der Chemieindustrie über den gesamten Lebenszyklus (cradle to grave) für die gesamte Jahresproduktion der betrachteten Chemikalien und Kunststoffe in Nordrhein-Westfalen. Die Emissionen sind abhängig von der verfügbaren Menge an Elektrizität zur Verwendung in CCU-Technologien und den spezifischen Emissionen des Stromsektors. Die Abbildung zeigt darüber hinaus den 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.

3.6.2 Direkte und indirekte Elektrifizierung energieintensiver Industrien (SCI4climate.NRW 2021b)

Neben der indirekten Elektrifizierung mittels CCU existieren weitere Potentiale, erneuerbare Energie in die Produktion energieintensiver Industrien einzubauen und Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Durch Elektrifizierung können die Treibhausgasemissionen der Chemie-, Stahl- und Zementindustrie in NRW bei spezifischen Emissionen des Stromsektors von 25 g_{CO₂-äq}/kWh insgesamt um bis zu 66 % reduziert werden, bei 100 g_{CO₂-äq}/kWh hingegen nur um bis zu 32 %.

Der größte Strombedarf zur Elektrifizierung (84 %) entsteht durch die Wasserstoffelektrolyse. Der Wasserstoff wird für CCU in der Chemieindustrie und das Direktreduktionsverfahren in der Stahlindustrie eingesetzt (siehe Abbildung 3). Beim Wechsel von der integrierten Hochofenroute zum Direktreduktionsverfahren entfällt die Produktion von Hüttensand, welcher ein emissionsarmer Ausgangsstoff für die Zementindustrie ist. Entfällt der Hüttensand ersatzlos könnten die Treibhausgasemissionen der Zementindustrie in NRW um 37 % ansteigen. Da NRW aktuell Hüttensand exportiert (45 % der Hüttensandproduktion) würden die Treibhausgasemissionen der Zementindustrie auch außerhalb von NRW ansteigen. Beide der potenziellen Mehremissionen in der Zementindustrie

werden berücksichtigt, um die Reduktionspotentiale der drei Industrien, Chemie, Stahl, und Zement, konservativ abzuschätzen. Trotz der berücksichtigten Mehremissionen in der Zementindustrie führt das Direktreduktionsverfahren insgesamt zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen. Voraussetzung für diese Treibhausgasreduktion bildet eine ausreichende Verfügbarkeit von Wasserstoff beziehungsweise emissionsarmer Elektrizität zur Produktion von Wasserstoff.

Ein noch höherer Strombedarf resultiert aus dem Wasserstoffbedarf für die CCU-basierte Produktion von Chemikalien und Kunststoffen. Insgesamt beträgt der kumulierte Strombedarf für eine Elektrifizierung der drei Industrien allein in NRW 477 TWh/a (siehe Abbildung 3-16). Dieser Strombedarf ist mehr als doppelt so groß wie der Strombedarf der gesamten deutschen Industrie in 2018 (226 TWh/a) (Prognos et al. 2021). Somit sollte vor allem der Ausbau erneuerbarer Energien fokussiert und die zukünftige Auslastung des Stromnetzes kritisch geprüft werden. Alternativ kann der Strombedarf durch Wasserstoffimporte reduziert werden.

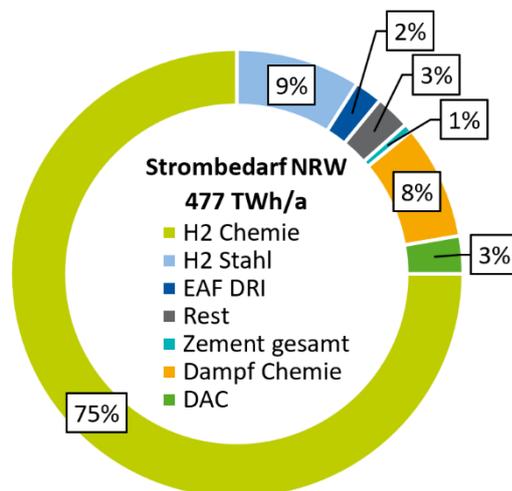


Abbildung 3-16: Aufteilung des jährlichen Strombedarfs für NRWs Chemie-, Stahl-, und Zementindustrie bei Einsatz von Elektrifizierungstechnologien für Produktionsvolumina in 2020.

3.6.3 Elektrifizierung, Biomassenutzung, und Steigerung von Recyclingquoten (Bühner 2022)

Im Forschungsintervall 3 wurde das gekoppelte Modell der Chemie-, Stahl-, und Zementindustrie in NRW um das Recycling von Kunststoffabfällen und Stahlschrott, die Anpassung der Klinkerrate, sowie den Einsatz von Biomasse ergänzt. Basierend auf dem im Forschungsintervall 3 entwickelten Modell wurden im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit bereits Reduktionspotentiale für Treibhausgasemissionen in NRW berechnet. Die Arbeit umfasst die separate Betrachtung von Elektrifizierung und Biomassenutzung sowie eine Kombination beider Reduktionsstrategien. Alle drei Betrachtungen berücksichtigen das Recycling von Kunststoffen und Stahlschrott sowie den Einsatz von Hochofenschlacke als Ergänzungsstoff für die Zementherstellung. Zusätzlich umfasst die Arbeit eine Sensitivitätsanalyse von Einflussfaktoren auf das Reduktionspotential: spezifische Emissionen der

Stromgewinnung und Emissionen durch indirekte Landnutzungsänderung, sowie Recycling- und Klinkerquoten. Vor allem eine Steigerung der Recyclingquoten reduziert den Bedarf an neuen Rohstoffen und somit auch Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus zeigt Kunststoffrecycling ein hohes Potential auch Umweltwirkungen abseits der Erderwärmung zu reduzieren und bildet somit einen wichtigen Schritt hin zu ökologisch nachhaltigen Kunststoffen (Bachmann et al. 2022). Abschließend behandelt die Arbeit das Reduktionspotential für Treibhausgasemissionen in NRW in Abhängigkeit von Ressourcenverfügbarkeiten und Erwartungswerten für Recycling- und Klinkerquoten. Die Betrachtung verdeutlicht den Bedarf NRWs an Importen nachhaltiger Energieträger, um Reduktionspotentiale voll auszuschöpfen. Die Themen Energieimporte und Versorgungssicherheit rücken speziell vor dem Hintergrund aktueller geopolitischer Spannungen durch den russischen Angriffskrieg und Engpässen in der Energieversorgung, in Form von Erdgas, in den Betrachtungsfokus. Das Fehlen von Erdgas muss durch andere Energieformen ersetzt werden und kann somit die Transition zu einer klimafreundlichen Grundstoffindustrie beschleunigen. Jedoch verdeutlichen aktuelle Energieengpässe auch, dass die Kontinuität zukünftiger Importe nachhaltiger Energieformen (siehe Abbildung 3-17) sichergestellt werden muss, um den stabilen Betrieb einer klimafreundlichen Grundstoffindustrie gewährleisten zu können. Sowohl fossile als auch nachhaltige Energieimporte können durch das Verstärken von Recycling minimiert werden, um die Versorgungssicherheit zu stärken.

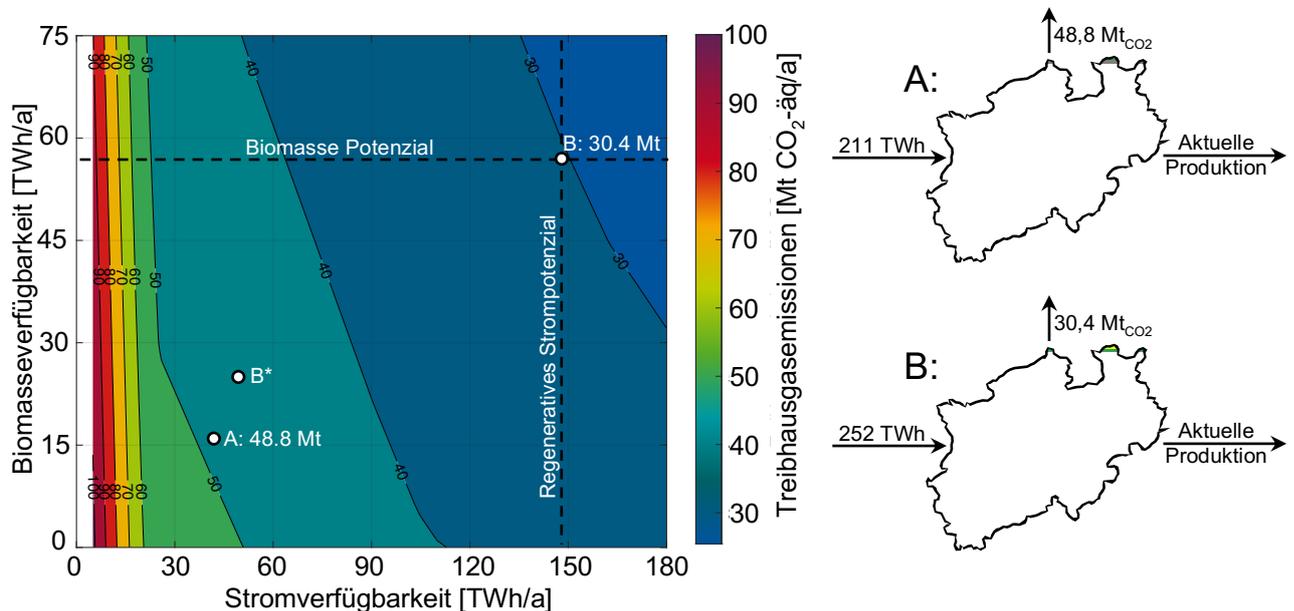


Abbildung 3-17: Jährliche Treibhausgasemissionen der Chemie-, Stahl-, und Zementindustrie in NRW in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Biomasse und erneuerbarem Strom.

Im fossilem Referenzszenario emittieren die drei Industrien 106 Mt/a. Gestrichelte Linien zeigen das technische Potential für Biomasse und erneuerbaren Strom in NRW. Die Punkte A und B zeigen

Treibhausgasemissionen bei der Nutzung von 28,5 % beziehungsweise 100 % des technischen Potentials für Biomasse und erneuerbaren Strom. 28,5 % ist ebenfalls der aktuelle Anteil aller Industriesektoren am Gesamtenergiebedarf Deutschlands. Der Punkt B* zeigt den Bedarf an erneuerbarem Strom und Biomasse, falls die gesamte Wasserstoffproduktion des Punktes B in Regionen außerhalb von NRW ausgelagert wird. Zusätzlich kann die Auslagerung der Wasserstoffproduktion in wind- oder sonnenreiche Regionen zu einer zusätzlichen Reduktion von Treibhausgasen gegenüber Punkt B führen. Darüber hinaus gelten folgende Annahmen: Landnutzungsänderungen 319.7 gCO₂/kg Biomasse, Emission der Stromerzeugung 32 gCO₂/kWh, Recycling von 89,8 % der Kunststoffe aus Verpackungsmüll und 37,6 % der Kunststoffe aus Nicht-Verpackungsmüll, Recycling von Stahlschrott trägt 12,8% zum Produktionsvolumen von Stahl bei, Klinker enthält maximal 20 % an Puzzolan als Ersatzstoff, weitere Ersatzstoffe für Klinker entfallen auf Grund des Wegfalls von Hochofenschlacke und Flugasche aus Kohlekraftwerken. Die Farben in den Silhouetten NRWs zeigen die Anteile genutzter Ressourcen nach ihrem Energiegehalt (grau = fossil, grün = Biomasse, gelb = erneuerbarer Strom).

3.7 Die Rolle der Designphase bei der Schaffung nachhaltiger Produkte (Beispiele: Kunststoffe und Konstruktion) (WI)

Die Aktivität 2.4 widmete sich aus der Perspektive des „nachhaltigen Produktdesigns“ unter Verwendung von Ansätzen aus dem „Transition Design Guide“ (Liedtke et al., 2020) dem Themenbereich Kunststoffe, insbesondere Verpackungen. Dazu wurde ein Mapping von Ansatzpunkten für nachhaltiges Produktdesign erstellt sowie innovative Designszenerien für Lebensmittellogistiksysteme, auf welche Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung angewendet wurden (Schoch et al. 2022). Zusätzlich wurden auch zum Themenbereich Bauen & Wohnen Designszenerien erstellt. In einem parallelen Themenstrang wurde auf Basis der Einkommens- und Verbraucherstichprobe (EVS) eine deskriptive statistische Analyse der Nachfrageentwicklung in NRW durchgeführt (Schuster et al. 2023). Diese zeigte, dass die Konsumtrends und Ausgabestrukturen sich zwischen 2003 und 2018 kaum veränderten, keine signifikanten Unterschiede der Ausgabestrukturen zwischen NRW und Deutschland (Durchschnitt) bestanden, die größten Haushaltsausgaben in den Bereichen Lebensmittel, Mobilität und Freizeit / Kultur lagen und ein extremer Anstieg des Ausstattungsgrades von Haushalten mit digitalen Geräten zu beobachten war. Vor dem Hintergrund der gleichbleibenden, ressourcenintensiven Konsumtrends ist es umso dringender die Gestaltung von Produkt-Dienstleistungssystemen nachhaltiger zu gestalten. Im Folgenden wird daher auf die Ergebnisse mit direktem Designbezug knapp eingegangen.

Das Mapping von Ansatzpunkten für nachhaltiges Design im Allgemeinen fasst konzeptionelle Ausgangspunkte für Gestaltungsprozesse, u.a. auf Basis des MIPS-Konzepts (Material-Input-pro-Serviceeinheit), zusammen und geht insbesondere auf den Gestaltungsraum innerhalb planetarer Grenzen unter Berücksichtigung der Sustainable Development Goals ein. In Bezug auf kreislauforientiertes Produktdesign fasst es einige Ansatzpunkte als Orientierungspunkte zusammen, reflektiert jedoch auch Trade-Offs der Ansatzpunkte, die in konkreten Gestaltungsprozessen

abgewogen werden müssen – beispielsweise kann eine reparaturfreundliche Gestaltung der Robustheit / Langlebigkeit von Produkten entgegenstehen, je nach Produkt kann dieses Trade-Off eine Rolle spielen. Einen groben Überblick über Designansätze auf den Ebenen Material, Produktstruktur und Verbindungstechnik gibt die nachstehende Tabelle. Für diese Ansätze wurde ein spezifisches Mapping von Ansatzpunkten für Verpackungen durchgeführt, entlang des Lebenszyklus von Verpackungen mit Bezug auf die Verpackungsfunktionen Schutz, Transport, Lagerung, Laden, Handhabung, Nutzen, Information sowie in Bezug auf die Ebenen Verpackung, Packgut und Logistiksystem. Ein besonderer Fokus wurde auf das „Design for Recycling“ gelegt. Basierend auf verschiedenen Quellen wurden Einflussfaktoren des Produktdesigns im Hinblick auf verbesserte Recyclingfähigkeit am Beispiel von PET-Flaschen zusammengefasst. Dieses Mapping wird hier nicht dargestellt, ist jedoch in der entsprechenden Detaildokumentation verfügbar.

Tabelle 3-1: Allgemeine Ansatzpunkte für kreislaforientiertes Produktdesign

Material	Produktstruktur	Verbindungstechnik
<ul style="list-style-type: none"> • reduzierte Werkstoffvielfalt oder sogar Monomaterial • Recyclingverträgliche Werkstoffkombinationen, recyclingfähig im Kontext des Produktes und der verfügbaren Recyclingtechnik • ressourcenleicht (kleiner ökologischer Rucksack) • Sekundärmaterial oder Kaskadenmaterial • ggf. biobasiert (Nachhaltigkeitsbewertung nötig) • sicher / nicht toxisch • hochwertig und haltbar in der Nutzung • Erfahrungswerte / Folgenabschätzungen vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • modular und additiv • multifunktionale Eigenschaften • reduzierte und vereinfachte Formen • demontagefreundlich/ Abtrennbarkeit gefährlicher Stoffe • Ersatzteilverfügbarkeit oder -herstellbarkeit gegeben • zeitlos (langfristig nutzbar) / zeitgemäß (Bindung Mensch-Produkt) 	<ul style="list-style-type: none"> • lösbar z.B. für Reparatur und Recycling • reduzierter Einsatz von Verbindungselementen • sortierbar im Recycling • robust in der Nutzung • standardisiert

Ausgehend von der erarbeiteten Designperspektive auf Verpackungen wurde in 2020 ein Ko-Kreations-Workshop mit Gästen der Folkwang Universität der Künste zum Thema ressourceneffiziente Gestaltung von Lebensmittellogistik- und Verpackungssystemen durchgeführt mit dem Ziel, innovative Designszenarien zu erarbeiten. Einen Überblick über die erarbeiteten Konzepte gibt die nachstehende Tabelle. Die entstandenen Designszenarien wurden beispielhaft mittels verschiedener Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung aus dem Transition Design Guide bewertet, um die Ansätze einordnen zu können. Da die Konzepte einer frühen Ideengenerierungsphase zuzuordnen sind, sind zahlreiche Aspekte nicht final auf Konsistenz geprüft bzw. viele Optimierungspotentiale und Anpassungen noch nicht vorgenommen worden. Zudem wurde durch eine nachgelagerte Desktoprecherche im Sinne eines Realitätschecks deutlich, dass einzelne Ansätze oder Aspekte bereits in einigen bereits existierenden Innovationskontexten gedacht worden sind. Nichtsdestotrotz repräsentieren die Konzepte neuartige Ansätze, die Impulse für neue Geschäftsmodelle liefern und im wissenschaftlichen Bereich perspektivisch für Szenariomodellierungen genutzt werden können, die auf der Mikroebene / Produktebene fundiert bzw. damit gekoppelt sind.

Tabelle 3-2: Designszenarien für innovative Lebensmittellogistik- und Verpackungssysteme

Designszenario	Kerninhalte der Designszenarien
Vertriebskollektiv-Hub	<ul style="list-style-type: none"> • Rohrpost zur Logistik von Lebensmitteln im Quartier • Supermarkt als Bildungsstätte • Quartiersnahe Produktionsstandorte • KI-Nutzung zur Organisation • Monomaterialnutzung
Quartiersküche	<ul style="list-style-type: none"> • Sharing von kleinen und großen Küchenequipment/Küchengeräten • Gemeinschaftsküche • Konsument als Verkäufer von selbst hergestellten Produkten
Yogomat	<ul style="list-style-type: none"> • Förderung von regionaler Landwirtschaft • 24/7 Kauf • Selbstbedienungsautomat
Suffizienz für mehr Geschmack	<ul style="list-style-type: none"> • Rezepte gegen Lebensmittelverschwendung • Stärkung der Käufer-Verkäufer-Beziehung • Austausch in der Gemeinschaft

Astronauten Joghurt	<ul style="list-style-type: none"> • Joghurt in Pulverform zur Eigenherstellung • Volumen und Masseneinsparung • individuelle Geschmacksgebung • Einheitliche Verpackung aus Monomaterial
Essbare Verpackung	<ul style="list-style-type: none"> • Getränke zum Mitnehmen in essbaren Bechern • Abfallvermeidung/-verringern

Ähnlich zu dem Workshop zum Thema Logistik und Verpackungen wurde in 2021 ein Workshop zur Generierung von Designszenarien im Bereich Bauen und Wohnen durchgeführt. Ziel war es, Möglichkeiten zu eruieren, den Materialinput pro Serviceeinheit im Hinblick auf die Wohnfläche sowie die damit einhergehende Infrastruktur zu reduzieren und damit nachfrageseitig den Ressourcenbedarf zu senken. Daher wurden im Workshop Ansätze entwickelt wie Wohnraum sowie die umgebende Wohninfrastruktur ressourcen-effizienter, gemeinschaftlicher, flexibler und Generationen-kompatibler gestaltet werden kann, bei gleichzeitiger Wahrung individueller Bedürfnisse von Privatsphäre. Der Workshop konzentrierte sich auf Ansätze des An- und Umbaus im Bereich Bestandsgebäuden um flächenneutral (in Bezug auf Planflächen) umgesetzt werden zu können. Ein Leitgedanke war „weg von einer Wohnraumversorgung hin zu einem ressourceneffizienten Wohnraummanagement“. Die folgende Tabelle gibt einen knappen Überblick über die drei im Workshop entstandenen Konzepte und deren Charakteristika: „Sharing Living Lab“, "Eat & Miet" Blockküche“, „Co-Being House“.

Tabelle 3-3: Designimpulse und Interventionspunkte für den Umbau von Bestandsgebäuden - 3 Designszenarien

zunehmend: Innovationsgrad, Risiko, Kultureller Wandel, Investition →		
<p>Sharing Living Lab for Co-Being</p> <p>Testlabor -> 3 Monate Wohndauer</p> <p>Bildquelle Altibau: https://unsplash.com/photos/rgJ8xvGvYA7uim_s source=unsplash&utm_medium=referral&utm_content=creditShareLink</p> <p>Ablauf des Testverfahrens: 1) Bewerbung 2) Kennenlernen 3) Onlinebegehung 4) Eignung testen 5) Wohngemeinschaftsbildung 6) Wissenschaftliche Begleitung -> Best-Practice</p>	<p>"Eat & Miet" Blockküche</p> <p>Öffentlich → Privat</p> <p>minimalistische Küchen in Wohnungen</p> <p>ggf. Etagenküche</p> <p>Blockküche zum gemeinsamen Kochen und Essen (ggf. auch Parzellen)</p> <p>Food Hub, Lebensmittelanlieferung</p> <p>Ausleihoptionen, Mietflächen</p>	<p>CO-Being-House</p> <p>Dachterrasse Arbeitssecken Kindergarten</p> <p>Privater Wohnraum (12 m²) inkl. Toilette & Wascheinheit</p> <p>Gemeinschaftsräume Arbeitssecken</p> <p>Reparaturwerkstatt und Geräteausleihe</p> <p>Food Hub, Lebensmittelanlieferung</p> <p>Bildquelle Hochhaus: https://unsplash.com/photos/YoyC-sdf1Za7uim_source=unsplash&utm_medium=referral&utm_content=creditShareLink</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Effizienz, Konsistenz, Suffizienzstrategien • Stadtplanung, Architektur, Handwerk, Psychologie, Nachhaltigkeitsforschung, Investment, etc. • Modularer Wohnraum, flexibles Mobiliar, Barrierefreiheit, gemeinschaftlich genutzte Flächen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gemeinschaftliche Nutzung von Kücheninfrastruktur und Vernetzung der Bewohner*innen über gemeinsame Küchenaktivitäten • digitale Hilfsmittel, Planung, vertragliche Regelungen zur "sozialen Kontrolle" 	<ul style="list-style-type: none"> • So viel Fläche, wie möglich gemeinschaftlich / so viel wie nötig individuell • Kinderbetreuung, geteilte Arbeitsplätze, Reparaturwerkstätten, gemeinschaftliche Kühlräume, vertical farming, etc. • Optimierung des Betriebes über KI (z.B. Logistik, Konsumpraxis)

3.8 Weitere Arbeiten im Themenfeld

Zusätzlich zu den hier dargestellten Hauptarbeitsschwerpunkten sind im Themenfeld 2 und in der thematisch eng mit Themenfeld 2 verzahnten AG CE von IN4climate.NRW weitere Veröffentlichungen entstanden, die auf der Webseite von NRW.Energy4Climate zu finden sind.

- Der Forschungsbereich Digitalisierung der Abteilung CE des WI hat einen Report erstellt, wie Digitalisierung das Kunststoffrecycling verbessern können. Dabei wurde der aktuelle Status Quo des Kunststoffrecyclings dargestellt, insbesondere mit dem Fokus auf die Barrieren der derzeitigen Kunststoffrecycling. Anschließend wurde aufgezeigt wie mit Hilfe von digitalen Lösungen Teile dieser Barrieren überwunden werden können (Bendix und Berg 2020).
- Die RWTH Aachen hat verschiedene Kurzstudien erarbeitet, die die Wertschöpfungsketten und Materialflüssen für verschiedenen Sektoren im Überblick darstellen. Konkret sind Studien für die Sektoren/Materialsysteme Kunststoffe, Stahl und Zement entstanden und dienen auch als

Grundlage für die Fragestellungen, die in Kapitel 3.3. und 3.4 im Detail vorgestellt wurden (Abdelshafy et al. 2020; Simon et al. 2020b).

- Ebenfalls an der RWTH Aachen wurde eine Kurzstudie erarbeitet, die sich mit der ökobilanziellen Bewertung einer verbesserten Sortiereffizienz von gemischten Kunststoffverpackungen aus dem Gelben Sack beschäftigt (Simon et al. 2020a).
- Zusätzlich wurde am Anfang des Projekts ein Fact-Sheet erarbeitet, das die Bedeutung der Materialsystems Kunststoffe darstellt und damit die Begründung lieferte, weshalb sich im ersten Forschungsintervall das Themenfeld 2 hauptsächlich mit diesem Materialsystem beschäftigte (Schleier et al. 2020).
- Neben dem Diskussionspapier zum Chemischen Recycling (siehe Kapitel 3.5) wurde im Kontext der AG CE von In4climate.NRW aus dem Themenfeld 2 heraus das Diskussionspapier „Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und Notwendige Rahmenbedingungen für die erfolgreiche Transformation“ wesentlich miterarbeitet. Darin werden die Hemmnisse, Rahmenbedingungen und mögliche Maßnahmen behandelt, mit denen auch die Grundstoffindustrie ihren Beitrag leisten kann, die Stoffkreisläufe entlang der gesamten Wertschöpfungskette möglichst zu schließen (IN4climate.NRW 2021b).

3.9 Literaturübersicht inklusive Vorträge und Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW

In diesem Abschnitt sind alle Veröffentlichungen aus dem Themenfeld 2 (Produkte und Wertschöpfungsketten) von SCI4climate.NRW aufgelistet (blaue Schriftfarbe), zusammen mit weiteren Literaturquellen, die im Text zitiert sind (Standardschriftfarbe). Von SCI4climate.NRW herausgegebene Berichte sind durch ein vorangestelltes „[SCI4climate.NRW]“ gekennzeichnet, sie werden hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit unter Nennung der Autor*innen aufgelistet und auch entsprechend zitiert. Eine Gesamtübersicht aller Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW (ohne Vorträge) findet sich in Abschnitt 1.4. Alle SCI4climate.NRW-Berichte sowie die meisten weiteren im Rahmen von SCI4climate.NRW entstandenen Veröffentlichungen sind auf der Webseite von NRW.Energy4climat/IN4climate.NRW verfügbar (<https://www.energy4climate.nrw/industrieproduktion/in4climatenrw/ergebnisse-des-thinktanks>).

[SCI4climate.NRW] Abdelshafy, A., Schleier, J., Simon, B., & Walther, G. (2020). Materialflüsse und Wertschöpfungskette der Stahl- und Zementindustrie in Nordrhein-Westfalen. SCI4climate.NRW.

Abdelshafy, A., Franzen, D., Mohaupt, A., Nellessen, J., Bührig-Polaczek, A., & Walther, G. (2022). A Feasibility Study to Minimize the Carbon Footprint of Cast Iron Products while Maintaining the Technical Requirements. *Journal of Sustainable Metallurgy*. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00642-5>

Abdelshafy, A., Lambert, M., & Walther, G. (2022). The role of CCUS in decarbonizing the cement industry: A German case study. *Energy Insight*, 115.

Abdelshafy, A., & Walther, G. (2021). Using the Urban Stock as A Carbon Sink: A Case Study from the German Federal State of North Rhine – Westphalia. SINTEF Academic Press, SINTEF Proceedings 7, ISBN: 978-82-536-1714-5

- Abdelshafy, A.; Walther, G. (2021): Using the urban stock as a carbon sink: a case study from the German federal state of North Rhine-Westphalia. Trondheim Carbon Capture and Storage Conference (TCCS-11), 22. June – 23. June 2021, Virtual/Trondheim, Vortrag am 23. June 2021
- Abdelshafy, A.; Walther, G. (2021): Investigating the opportunities of coupling carbon capture and utilization with the supply chains of construction industry: a case study from western Germany. 18th International Conference on Carbon Dioxide Utilization, 18. July - 22. July 2021, Virtual/Daejeon, Vortrag am 21. July 2021
- Abdelshafy, A., & Walther, G. (2022a). Coupling carbon capture and utilization with the construction industry: Opportunities in Western Germany. *Journal of CO2 Utilization*, 57, 101866. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101866>
- Abdelshafy, A., & Walther, G. (2022b). Exploring the effects of energy transition on the industrial value chains and alternative resources: A case study from the German federal state of North Rhine-Westphalia (NRW). 177, 105992. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105992>
- Abdelshafy, A.; Walther, G. (2022c): Potentials of sequestering the industrial emissions via carbonation: a case study from North Rhine- Westphalia/Germany. *The Concrete Dialogue 2022*, 03. June 2022, Brussels, Vortrag am 03. June 2022
- Abdelshafy, A., & Walther, G. (2023). Using Dynamic-Locational Material Flow Analysis to model the development of urban stock. *Building Research & Information*, 51(1), 5–20. <https://doi.org/10.1080/09613218.2022.2142495>
- Albrecht, W; Schwitalla, C. (2015): Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS. Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2932).
- Bachmann, M., Zibunas, C., Hartmann, J. et al. (2023): Towards circular plastics within planetary boundaries. *Nature Sustainability*, <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01054-9>.
- [SCI4climate.NRW] Bendix, P., & Berg, H. (2020). Digitalisierung des Kunststoffrecyclings. SCI4climate.NRW.
- Bergmann, Luisa/Steger, Sören (2023): Abschätzung der zukünftigen Stoffströme im Gebäudebestand - Abschätzung der zukünftigen Stoffströme im Gebäudebestand“. Kurstudie des Themenfeldes 2 – Produkte und Wertschöpfungsketten SCI4climate.NRW (in Vorbereitung).
- Bühner, Jonas 2022, Masterarbeit betreut durch Christian Zibunas (LTT RWTH Aachen): Greenhouse Gas Mitigation Scenarios for Energy-Intensive Process Industries in North Rhine-Westphalia, (Bei Rückfragen bitte wenden an: christian.zibunas@litt.rwth-aachen.de)
- Bürger, V., Hesse, T., Plazer, A., Köhler, B., Herkel, S., Engelmann, P., Quack, D. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Energieeffizienzpotentiale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-06_climate-change_26-2017_klimaneutraler-gebaeudebestand-ii.pdf, zuletzt geprüft am 21.11.2022.
- Conversio, Lindner, Christoph; Hein, Julia; Fischer, Elena (2020): Waste generation, waste streams and recycling potentials of HBCD containing EPS/XPS waste in Europe and forecast model up to 2050.
- Demacsek, C.; Tange, L.; Reichenecker, A.; Altnau, G. (2019): PolyStyreneLoop – The circular economy in action. In IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 323 (012149). DOI: 10.1088/1755-1315/323/1/012149.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2021): dena-Gebäudereport 2021. Fokusthemen zum Klimaschutz im Gebäudebereich. Berlin.

- Finkewirth, L.; Abdelshafy, A.; Walther, G. (2022): A comparative environmental assessment of the cast iron and steel melting technologies in Germany. The 14th International Conference on Applied Energy (ICAE 2022), 08. August - 11. August 2022, Bochum, Vortrag am 10. August 2022
- Finkewirth, L.; Abdelshafy, A.; Walther, G. (2023): A comparative environmental assessment of the cast iron and steel melting technologies in Germany In: Energy Proceedings, Volume 29. DOI: <https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-10296>
- Hölling, Marc; Weng, Matthias; Gellert, Sebastian (2017): Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff.
- IN4climate.NRW. (2020a). Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy.
- IN4climate.NRW. (2021b). Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy.
- Kätelhön et al. (2016), Environmental Science and Technology, Stochastic Technology Choice Model for Consequential Life Cycle Assessment
- Kätelhön et al. (2019), PNAS, Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry
- Krusenbaum, J.; Rothhöft, K.; Radloff, R.; Abdelshafy, A.; Walther, G. (2022): The role of recycling and novel technologies in mitigating the environmental impact of non-ferrous metals: a case study from Germany. International Conference on Resource Sustainability, 01. August – 04. August 2022, Vortrag am 02. August 2022
- Loga, T, Stein, B., Diefenbach, N., Born, R. (2015): Die deutschen Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweite erweiterter Auflage.
https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcopes/2015_IWU_LogaEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf , zuletzt geprüft am 21.11.2022.
- Material Economics (2020), Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.
- Radloff, R.; Abdelshafy, A.; Walther, G. (2022): The implications of regional transformation towards hydrogen-based steel: A case study from western Germany. The 8th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC) & The 9th International Conference on Science and Technology of Ironmaking (ICSTI), 29. August – 02. September 2022, Bremen, Vortrag am 30. August 2022
- Radloff, R.; Abdelshafy, A.; Walther, G. (2023). An integrative and prospective approach to regional material flow analysis: Modelling the decarbonisation of the North-Rhine Westphalian Steel Industry. Journal of Industrial Ecology. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.13387>
- Rechberger, Katharina; Spanlang, Andreas; Sasiain Conde, Amaia; Wolfmeir, Hermann; Harris, Christopher (2020): Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking. steel research international 91 (11), 2020, <https://doi.org/10.1002/srin.202000110>.
- [SCI4climate.NRW] Schleier, J., Simon, B., & Walther, G. (2020). Auswahl von Gütern und den entsprechenden Stoffströmen aus Kunststoffen, Factsheet. SCI4climate.NRW.

- Schleier, J., Simons, M., Greiff, K., & Walther, G. (2022). End-of-life treatment of EPS-based building insulation material – An estimation of future waste and review of treatment options. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106603. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106603>
- [SCI4climate.NRW] Schoch, K., Bickel, M., & Liedtke, C. (2022). Mapping von Ansatzpunkten für nachhaltiges Produktdesign. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Schuster, S., Bickel, M., & Teubler, J. (2023). Nachfrageentwicklung in NRW. SCI4climate.NRW.
- SCI4climate.NRW 2020a, Einsatz von CCU-Technologien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalens Chemieindustrie
- SCI4climate.NRW 2020b, Highlightbericht, Forschungsintervall I, Ergebnisse der Analyse aktueller kunststoffbasierter Abfallströme in NRW
- SCI4climate.NRW 2021: Ergebnisbericht Forschungsintervall 2, Elektrifizierung zur Reduktion von Treibhausgasen in Nordrhein-Westfalens Stahl-, Zement- und Chemieindustrie
- SCI4climate.NRW, Highlightbericht, Forschungsintervall I, Ergebnisse der Analyse aktueller kunststoffbasierter Abfallströme in NRW
- [SCI4climate.NRW] Simon, B., Schleier, J., & Walther, G. (2020a). Hotspot Ökobilanzierung von Güterbündeln. Verpackungskunststoffe im Dualen System Nordrhein-Westfalen. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Simon, B., Schleier, J., & Walther, G. (2020b). Kurzbericht zur Stoffstromanalyse von Kunststoffverpackungen. SCI4climate.NRW.
- Sternberg et al. (2015), *Energy and Environmental Science*, Power to What? Environmental assessment of energy storage systems.
- thyssenkrupp SE: thyssenkrupp beschleunigt grüne Transformation: Bau der größten deutschen Direktreduktionsanlage für CO₂-armen Stahl entschieden, 2022, <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/bau-der-groessten-deutschen-direktreduktionsanlage-fuer-co2-armen-stahl-entschieden.html> (abgerufen am 28.11.2022)
- Umweltbundesamt (2022): Abfallaufkommen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall>, zuletzt aktualisiert am 21.11.2022, zuletzt geprüft am 21.11.2022.
- Vogl, Valentin; Åhman, Max; Nilsson, Lars (2018): Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production* 203, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>
- Zabek, M.; Jegen, P.; Kreiß, L.; Abdelshafy, A.; Walther, G. (2022): Introducing a novel concept for an integrated demolition waste recycling center. *International Conference on Resource Sustainability*, 01. August - 04. August 2022, Vortrag am 03. August 2022
- [SCI4climate.NRW] Zibunas, C., Meys, R., & Bardow, A. (2020). Einsatz von CCU-Technologien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalens Chemieindustrie. Modellentwurf und Technologiealternativen. SCI4climate.NRW.
- Zibunas, C., Meys, R., Kätelhön, A., & Bardow, A. (2022). Cost-optimal pathways towards net-zero chemicals and plastics based on a circular carbon economy. SCI4climate.NRW. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>

4 Szenarien und Transformationspfade (Themenfeld 3)

4.1 Ziele, Themen und Forschungsfragen

Das übergeordnete Ziel des Themenfeldes „Szenarien und Transformationspfade“ war die Erarbeitung und Analyse konsistenter Transformationspfade zu einer klimaneutralen und wettbewerbsfähigen (Grundstoff-) Industrie in NRW und Deutschland. Hierfür wurde unter intensiver Einbindung von Vertreterinnen und Vertretern verschiedener Industriebranchen ein Klimaschutzszenario für Deutschland entwickelt, das einen Schwerpunkt auf die sich im Zuge der Transformation ergebenden Herausforderungen für die Grundstoffindustrie legt. Gleichzeitig wurden im Themenfeld auch mehrere Metaanalysen weiterer vorliegender Klimaschutzszenarien für Deutschland und Europa durchgeführt. Diese Metaanalysen zielten insbesondere darauf ab, Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den gegenwärtig verbreiteten Visionen einer Transformation des Industriesektors hin zu Klimaneutralität zu identifizieren. Die Gemeinsamkeiten der verschiedenen Szenarien deuten auf „robuste“ Elemente der Transformation hin. Dies sind Elemente, die nach aktuellem Wissensstand auf jeden Fall benötigt werden, um eine klimaneutrale Industrie bis 2045 erreichen zu können, z. B. ein Mindestmaß an Wasserstoffbedarf in der Industrie oder ein Mindestumfang eines CO₂-Pipeline-Netzes für CCS und CCU-Anwendungen. Erkenntnisse über solche robusten Elemente können Politik und Industrie wichtige Hinweise für die konkreten Umsetzung der Transformation liefern.

Neben der Szenario-Entwicklung und -Metaanalyse war ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten im Themenfeld „Szenarien und Transformationspfade“ die Untersuchung der Frage, ob und in welchem Maße der Standort NRW aufgrund einer begrenzten Verfügbarkeit erneuerbarer Energien zukünftig für Teile der energieintensiven Industrie an Attraktivität verlieren könnte. Für eine zukünftig möglicherweise steigende Attraktivität von Standorten mit hervorragenden Erneuerbaren-Energien-Bedingungen wurde im Rahmen des Projekts der Begriff „Renewables Pull“ eingeführt. Ein besseres Verständnis der Wahrscheinlichkeit zukünftiger Verlagerungen industrieller Produktion infolge dieses Renewables-Pull-Effekts ist von Bedeutung für die Energie- und Industriepolitik, unter anderem um den Aus- und Umbau von Energieinfrastruktur besser planen zu können oder um gegebenenfalls Maßnahmen umzusetzen, um der Abwanderung von gesamtwirtschaftlich als besonders relevant eingeschätzter industrieller Produktion frühzeitig politisch entgegenzuwirken.

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Erkenntnisse aus den im Projektverlauf durchgeführten Arbeiten des Themenfeldes „Szenarien und Transformationspfade“ dargestellt. Zunächst werden in Abschnitt 4.2 die im neu entwickelten Szenario „SCI4climate.NRW-Klimaschutzneutralität“ (S4C-KN) beschriebenen Transformationspfade der gegenwärtig besonders emissionsintensiven Branchen Stahl, Chemie und Zement beschrieben. Die möglichen zukünftigen Entwicklungen in diesen Branchen wurden besonders detailliert mit Vertreterinnen und Vertretern der jeweiligen Branchen diskutiert und mit einem hohen technischen Detailgrad modelliert. Anschließend werden in Abschnitt 4.3 die Hauptideen der im Projektverlauf durchgeführten Szenario-Metaanalysen hinsichtlich der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der in den Szenarien

beschriebenen Industriesektor-Transformationen wiedergegeben. In Abschnitt 4.4 folgt anschließend eine Zusammenfassung der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse des Renewables-Pull-Phänomens, bevor in Abschnitt 4.5 – beispielhaft für die im Projektverlauf durchgeführten Weiterentwicklungen der Energie- und Industriesystemmodellierung – auf Fortschritte bei der Modellierung der zukünftigen Entwicklung der europäischen Petrochemie eingegangen wird. In Abschnitt 4.6 werden abschließend alle Projektveröffentlichungen aus dem Themenfeld „Szenarien und Transformationspfade“ aufgeführt.

4.2 Entwicklung eines Klimaschutzszenarios für Deutschland mit einem Fokus auf die Grundstoffindustrie

Ein Schwerpunkt der Arbeiten im Themenfeld „Szenarien und Transformationspfade“ während der Projektlaufzeit war die Entwicklung des Klimaschutzszenarios „SCI4climate.NRW-Klimaneutralität“ (S4C-KN). Das Szenario wird in dem im März 2023 erschienenen Bericht „Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045“ dokumentiert (Doré et al. 2023) und beschreibt einen möglichen Entwicklungspfad, wie Deutschland bis 2045 klimaneutral werden kann. Dabei werden die seitens der Bundesregierung im Jahr 2022 angehobenen Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien berücksichtigt. Der Bericht widmet sich insbesondere und intensiver als die meisten bisherigen Klimaschutzszenarien den Herausforderungen der Grundstoffindustrien. So wurden die möglichen Transformationspfade für die Branchen Stahl, Zement und Grundstoffchemie in besonderer Detailtiefe analysiert und intensiv mit Unternehmens- und Branchenvertreter*innen diskutiert.

Zu den ausgewählten Schwerpunkten des Berichts zählen unter anderem der Vergleich von Szenario-Varianten zu möglichen zukünftigen Entwicklungen der Raffinerien in Deutschland sowie eine Analyse der Voraussetzungen für eine deutliche Erhöhung des Sekundärstahl-Anteils. Vor dem Hintergrund der derzeit in Arbeit befindlichen Carbon-Management-Strategie des Bundes ist zudem die im Bericht vorgenommene ausführliche Analyse der Implikationen einer inländischen Nutzung von CO₂ für die Herstellung von Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen relevant. Der Bericht widmet sich daneben in einem eigenen Abschnitt auch zentralen industriepolitischen Maßnahmen und Strategien, die eine erfolgreiche Transformation des Industriesektors ermöglichen könnten.

Im Folgenden werden die im Szenario S4C-KN beschriebenen Entwicklungen in den besonders detailliert betrachteten Branchen Stahl, Chemie und Zement zusammengefasst. Ausführlichere Beschreibungen der im Szenario beschriebenen Transformation dieser Branchen sowie der Entwicklungen in den weiteren Endenergiesektoren sowie im Umwandlungssektor finden sich in dem erwähnten Bericht (Doré et al. 2023).

4.2.1 Transformation der Stahlindustrie im Szenario S4C-KN

Die deutsche Stahlindustrie ist gegenwärtig der bedeutendste Emittent an Treibhausgasen unter den Industriebranchen. Die Primärstahlhersteller, auf die ein Großteil der Emissionen der Stahlindustrie

entfällt, haben jedoch in den vergangenen Jahren konkrete Pläne für die Transformation ihrer Standorte vorgelegt. Dabei setzen sie insbesondere auf die potenziell klimaneutrale Direktreduktionsroute. Mit staatlicher Unterstützung sollen bereits bis 2030 bedeutende Emissionsminderungen erreicht werden. Entsprechende Minderungen in der Stahlindustrie werden auch notwendig sein, um das Treibhausgasreduktionsziel für den gesamten Industriesektor für das Jahr 2030 erreichen zu können. Auffällig ist, dass die deutschen Hersteller derzeit keine Pläne für größere Neuzustellungen von Hochöfen verkünden. Stattdessen planen zumindest die Standorte in Duisburg, Salzgitter, Bremen und Dillingen/Saar Investitionen in neue Schachttöfen, um existierende Hochöfen, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, zu ersetzen.

Das Szenario S4C-KN sieht vor, dass die Stahlindustrie in Deutschland keine Neuzustellungen von Hochöfen mehr vornimmt und die Stahlproduktion überwiegend auf die Elektrolichtbogenofenroute umstellt.²

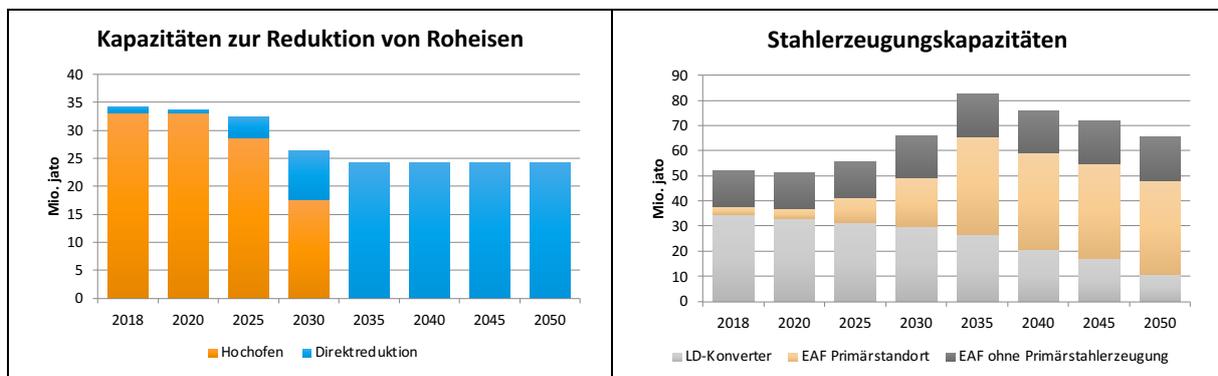


Abbildung 4-1: Entwicklung der Eisen- und Stahl-Kapazitäten im Szenario S4C-KN

Um das in Abbildung 4-1 (links) dargestellte Ausscheiden der Hochöfen aus der Flotte im Szenario S4C-KN zu simulieren, wurden die zuletzt vorgenommenen Neuzustellungen von Hochöfen analysiert und die Restlaufzeit aus der jeweiligen Investitionssumme abgeleitet. Dabei wurden frühere Neuzustellungen mit ihren nachfolgenden Ofenreisen mit der jeweiligen Investitionssumme verglichen. Gemäß dieser Analyse ergaben sich in der Vergangenheit durchweg kürzere Hochofenreisen als die 20 bis 25 Jahre, die in der Regel für Neuanlagen angenommen werden und somit ein kürzeres Zeitfenster für die Standorttransformation. Zudem wird im Szenario angenommen, dass der Anteil von Schrott im Einsatz für Qualitätsstähle im Zeitverlauf gesteigert werden kann, so dass die Sekundärstahlquote von gegenwärtig rund 40 % bis 2050 auf 50 % steigt.

² Einzige Ausnahme bildet der Standort von thyssenkrupp in Duisburg. Dort soll DRI in Zukunft nicht im Elektrolichtbogenofen, sondern im LD-Konverter eingesetzt werden.

Abbildung 4-2 zeigt die Energiewende auf, die die deutsche Stahlindustrie ab Mitte der 2020er Jahre durchläuft. Die Umstellung auf die zunächst vorwiegend mit Erdgas betriebene Direktreduktionsroute (DRI-Route) geht dabei mit einem vorübergehend höheren Erdgaseinsatz einher – die Stahlindustrie setzt 2030 im Szenario S4C-KN als einzige Branche mehr Erdgas ein als heute. Dies ist zum einen auf einen anteiligen Einsatz von Erdgas im Schachtofen zurückzuführen, zum anderen müssen auch die durch das Ausscheiden der Hochöfen, Kokereien und Konverter wegfallenden Kuppelgase in den Wiedererwärmungsöfen der Warmwalzwerke ersetzt werden, was zunächst durch Erdgas realisiert wird.

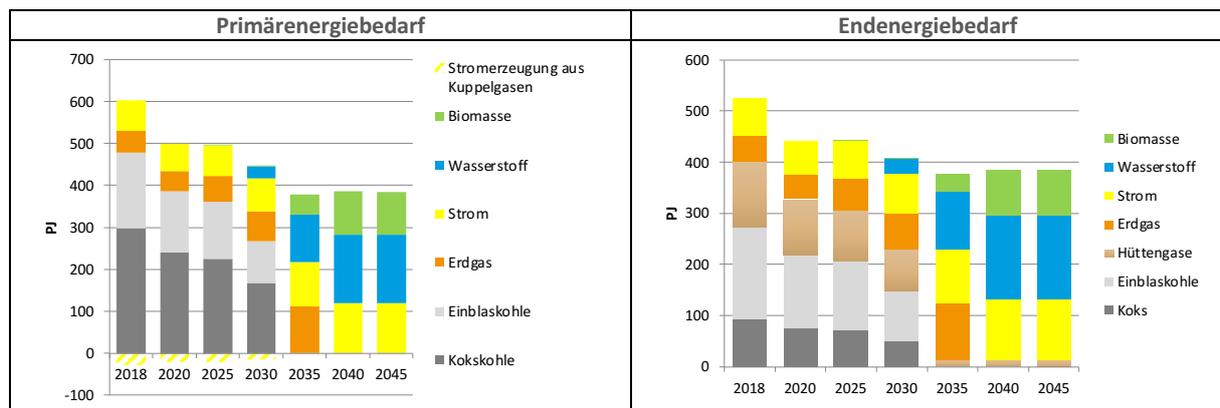


Abbildung 4-2: Entwicklung des Primär- und Endenergieeinsatzes in der Stahlindustrie

Auch aufgrund der zukünftig – gegenüber dem vergangenen Jahrzehnt – absehbar höheren Erdgaspreise wird Wasserstoff im Szenario S4C-KN bereits mit Einführung der Schachtofen von Anfang an anteilig mit eingesetzt und ersetzt Erdgas bis 2040 vollständig. Biomasse gewinnt langfristig eine wichtige Rolle als Kohlenstoff-Lieferant und ab 2040 auch als Energieträger. Spätestens 2045 wird Biomasse dabei ausschließlich in Verbindung mit einer Abscheidung und Speicherung des entstehenden CO₂ (also in Form von „BECCS“) eingesetzt. Hierfür werden die großen Standorte der Stahlindustrie an ein CO₂-Netz angeschlossen. Biomasse findet Verwendung z. B. zur Aufkohlung im elektrischen Einschmelzaggreat sowie in gasifizierter Form zur Bereitstellung von Hochtemperaturwärme in Wiedererwärmungsöfen der Walzwerke mit Oxyfuel-Technik. Dort können auch die verbliebenen Kuppelgas-Mengen aus Einschmelzer und Konverter eingesetzt werden. Das bei der Verbrennung entstehende und abgeschiedene sowie das am Schachtofen abgeschiedene CO₂ wird per Pipeline einem CO₂-Hub an der deutschen oder niederländischen Nordseeküste zugeführt.

4.2.2 Transformation der chemischen Industrie im Szenario S4C-KN

Die chemische Industrie emittierte nach den für die Modellierung des Szenarios S4C-KN vorgenommenen Abgrenzungen im Jahr 2018 knapp 42 Mio. Tonnen CO₂-Äq. Ein Großteil dieser direkten Treibhausgasemissionen („Scope-1-Emissionen“) sind auf die folgenden drei Bereiche zurückzuführen:

- die Spaltung von Kohlenwasserstoffen und die Erzeugung so genannter Plattformchemikalien in den Steamcrackern,
- die Wasserstofferzeugung, in erster Linie zur Produktion von Ammoniak, sowie
- die Bereitstellung von Dampf (und Strom) durch Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) und Dampfkessel am Standort der Chemiewerke („on site“).

Abbildung 4-3 zeigt den Endenergiebedarf der chemischen Industrie. Im linken Teil der Abbildung ist dabei Dampf – abweichend von den Konventionen der deutschen Energiebilanzierung – als eigener Endenergeträger aufgeführt, während seine Bereitstellung durch Brennstoffe bzw. Strom im rechten Teil aufgezeigt wird. Emissionsrelevant ist darüber hinaus noch der Brennstoffeinsatz in den Steamcrackern. Bei den dort eingesetzten Brennstoffen handelt es sich jedoch ganz überwiegend um Kuppelprodukte aus dem Betrieb der Cracker selbst, die in der deutschen Energiebilanz nicht als Endenergieeinsatz bilanziert werden. Der Teil der Cracker-Co-Produkte, der zur Erzeugung von Dampf eingesetzt wird, ist in der Abbildung dargestellt. Der energetisch motivierte Einsatz von Energieträgern sinkt über die Zeit moderat ab, getrieben durch den effizienzbedingt niedrigeren Dampfbedarf. Der heute durch gasförmige Brennstoffe gedeckte Bedarf an Hochtemperaturwärme wird im Szenario schrittweise durch Wasserstoff und Strom ersetzt.

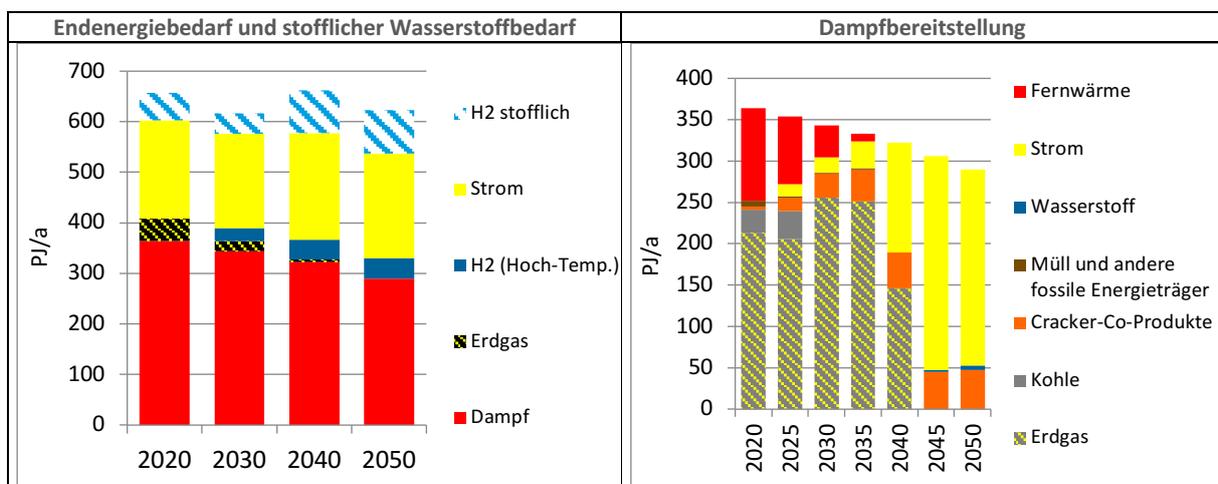


Abbildung 4-3: Endenergiebedarf und Dampfbereitstellung nach Energieträgern in der chemischen Industrie

Abbildung 4-4 zeigt die direkten Emissionen der chemischen Industrie auf. Mit der „Netto-Bindung von CO₂ aus der Atmosphäre in Produkten“ wird der zusätzliche Hebel über die CO₂-Senkenleistung dargestellt, der sich über einen Wechsel zu grünem Feedstock ergibt. Durch den Einsatz von etwa 10 Mio. Tonnen an grünen Kohlenwasserstoffen werden im Jahr 2050 etwa 30 Mio. Tonnen CO₂ gebunden, die zuvor – annahmegemäß – über direkte Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) gewonnen wurden. Wird ein Teil des Kohlenstoffs wieder oxidiert (z. B. bei der Verbrennung von Steamcracker-Beiprodukten oder bei der Pyrolyse von Kunststoffabfällen), so wird das in der Abbildung als positive Emission dargestellt. Sofern bei dieser Verbrennung jedoch eine CO₂-

Abscheidung und Speicherung stattfindet, wird noch einmal eine entsprechende Gegenbuchung vorgenommen.

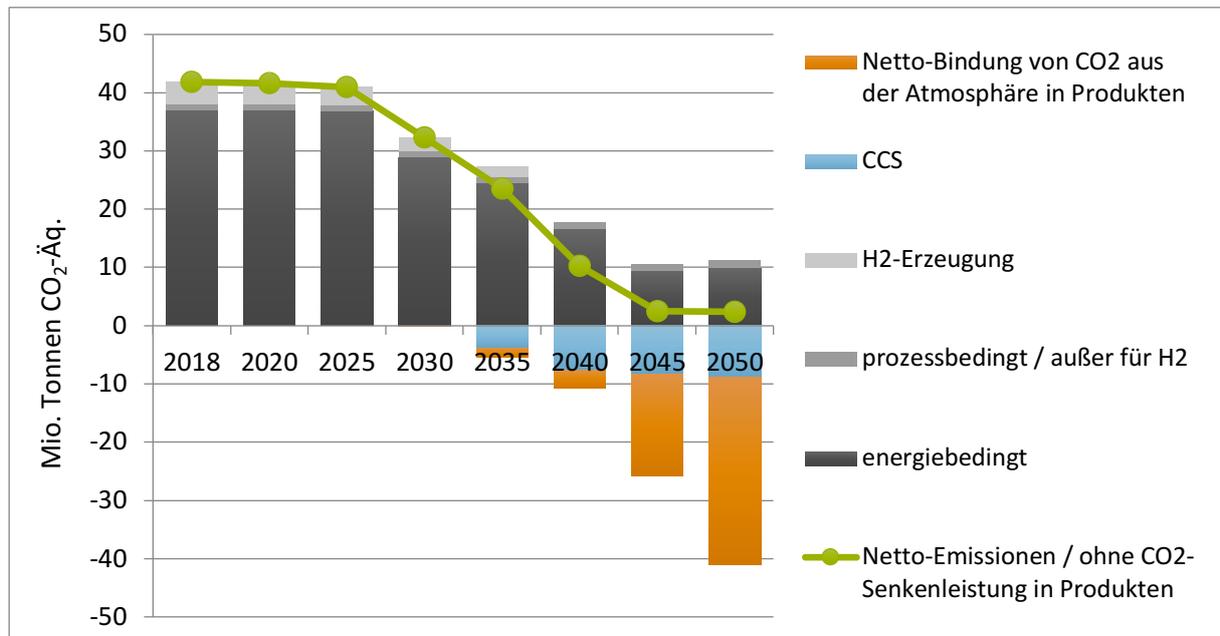


Abbildung 4-4: Direkte THG-Emissionen der chemischen Industrie in Deutschland („Scope 1“)

Abschließend ist in Abbildung 4-5 die Entwicklung der Produktion von so genannten „High-Value Chemicals“ (HVCs) dargestellt.³ Hierbei handelt es sich um Kohlenwasserstoffprodukte, die als Plattformchemikalien bei der Produktion von Polymeren oder Lösungsmitteln zum Einsatz kommen. Die Investitionen in die neuen Produktionsrouten wurden mit einem Optimierungsmodell, das Europa insgesamt abdeckt, simuliert.

Im Szenario S4C-KN wird die anfangs noch komplett rohölbasierte Produktion (Naphtha-Cracking und Propylen aus den Raffinerien) bis 2050 vollständig auf zirkuläre bzw. grüne Produktion umgestellt. In der Simulation gewinnt dabei alternativer fossiler Feedstock („Shalegas“) in Europa mittelfristig weiter an Bedeutung, Deutschland partizipiert hieran jedoch nicht, da keine Import-Infrastrukturen bzw. Pipelines zur Verfügung stehen. Bis 2040 sind alternative Routen wie chemisches Recycling etabliert (Gasöl und „Methanol-to-Olefins“). „Grünes“ Methanol kann annahmegemäß ab Ende der 2030er Jahre auch über den Weltmarkt bezogen werden und wettbewerbsfähig eingesetzt werden. Produkte wie Butadien und Benzol werden aufgrund der sich ändernden Anlagen- und Einsatzstrukturen

³ Hierunter sind die Steamcracker-Produkte Ethylen, Propylen, Butadien sowie die drei Aromaten Benzol, Toluol und Xylol (BTX) gefasst.

vergleichsweise knapp, woraus sich Nischen für biobasierte Produktion bzw. Biopolymere ergeben. Die Feedstockwende wird erst während der späten 2040er-Jahre abgeschlossen, wobei besonders in Deutschland Naphtha als Feedstock wichtig bleibt: Im Zielzustand 2050 deckt „grünes“ synthetisches Naphtha mehr als die Hälfte des Feedstockbedarfs.

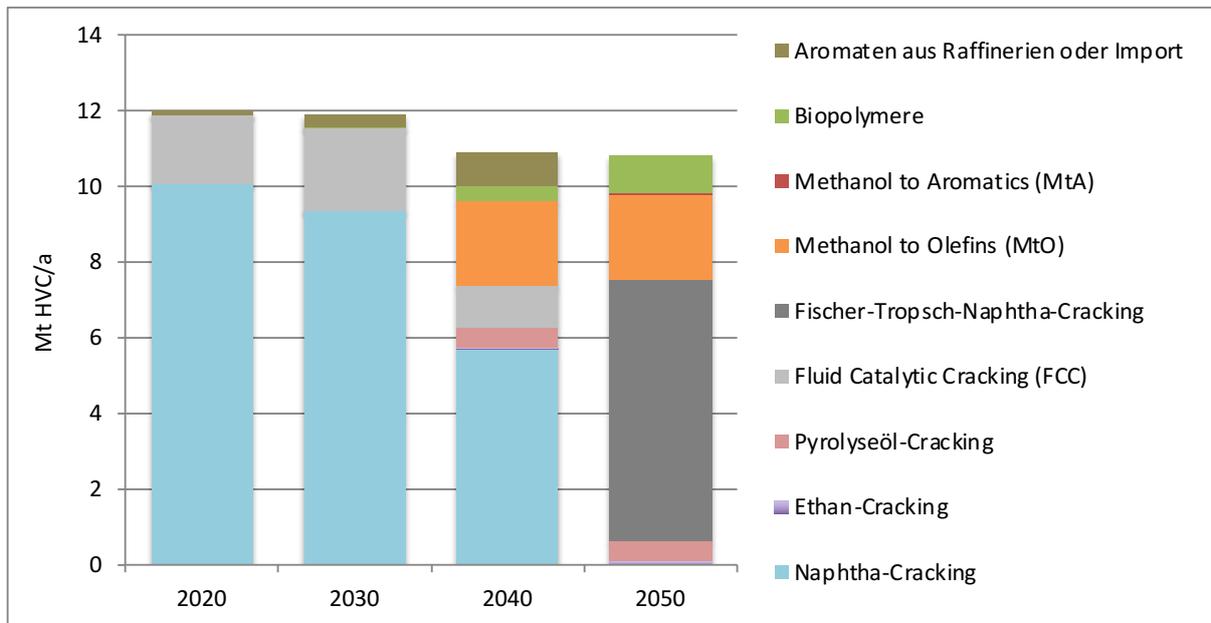


Abbildung 4-5: Produktion von High-Value Chemicals (HVC) nach Routen

4.2.3 Transformation der Zementindustrie im Szenario S4C-KN

Die deutsche Zementindustrie emittierte im Basisjahr des Szenarios (2018) 20 Mio. t CO₂ (VDZ, 2020, 2021), wovon ca. zwei Drittel auf prozessbedingte Emissionen zurückzuführen sind und ein Drittel auf die Nutzung von Brennstoffen für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme.

Für die Verringerung der CO₂-Emissionen stehen in der Zementindustrie eine Reihe von Minderungsoptionen zur Verfügung, die sich grob vier Bereichen zuordnen lassen:

- Zement- und klinkereffizienter Betonbau
- Neue Zemente und Bindemittel
- CO₂-reduzierte Bereitstellung thermischer Energie
- CO₂-Abscheidung und Nutzung oder Speicherung (CCU bzw. CCS)

Im Szenario S4C-KN wird zunächst ein Anstieg der gesamten Bautätigkeit in Deutschland um 11 %⁴ angenommen, wobei insbesondere im Tiefbau ein Zuwachs erwartet wird. Demgegenüber steht ein leichter Zuwachs des Holzbaus in den Segmenten des Wohnungsbaus und Nichtwohnungsbaus. Durch eine gesteigerte Materialeffizienz im Betonbau (u. a. durch materialeffiziente Planung, den Einsatz alternativer Bewehrungen, Spannbetondecken, Hohlkörper und Gradientenbeton) sinkt, bezogen auf eine gleichbleibende Leistungsfähigkeit und eine gleichbleibende Funktionsbereitstellung der Betonbauten, die benötigte Betonmenge um 18 % im Hochbau sowie um 9 % im Tiefbau. Durch eine weiter verbesserte Zusammensetzung der Betone (z. B. verbesserte Korngrößenabstimmung, verbesserte Betonzusatzmittel und angepasster Wasser/Zement-Wert) sowie durch eine stärker auf die spezifischen Bauteilanforderungen ausgerichtete Betonwahl kann der Bindemittelanteil in Betonen im Mittel um 14 % im Hochbau und 9 % im Tiefbau reduziert werden.⁵ In Summe reduziert sich so der Bindemittelbedarf bis 2045 um 17 % gegenüber dem Basisjahr.

Als Bindemittel werden im Szenario auch im Jahr 2045 zu 95 % Zemente, die herkömmlichen Zementklinker beinhalten, eingesetzt. Das Zementportfolio verändert sich bis dahin jedoch grundlegend. Durch den kompletten Wegfall von Hüttensand bis 2035 (s. Ausführungen zur Stahlindustrie oben) entfallen Hochofenzemente sowie Portlandhüttenzemente bis 2035 größtenteils und bis 2040 vollständig, und auch der Einsatz von heute erst am Beginn des Markthochlaufs stehenden Portlandkompositzementen unter Verwendung von Hüttensand bleibt auf einen Zeitraum von ca. 10 bis 15 Jahren begrenzt. Trotz der Herausforderung durch entfallende Hüttensande (und Flugaschen) kann der Einsatz von Portlandzement mit den höchsten Klinkeranteilen im Szenario kontinuierlich weiter reduziert werden und beschränkt sich 2045 auf wenige Anwendungen im Tiefbau sowie im Betonfertigteiltbau. Mittel- und langfristig spielen Portlandkompositzemente unter Verwendung von calcinierten Tonen im Szenario eine prominente Rolle (VDZ 2020). Langfristig wird zudem der Einsatz von rekarbonatisiertem rezykliertem Zementstein und diversen weiteren Klinkerersatzstoffen⁶ angenommen. Des Weiteren ist für die Minderung der entstehenden CO₂-Mengen eine kontinuierliche Absenkung des durchschnittlichen Klinkeranteils in Portlandkalksteinzementen relevant.

⁴ Prozentangaben hier und im Folgenden bezogen auf die Veränderung bis 2045 gegenüber dem Basisjahr (2018). Alle geschilderten Veränderungen vollziehen sich graduell über den gesamten Zeitraum.

⁵ Hierbei ist berücksichtigt, dass die heute in Betonen eingesetzten Flugaschen zumindest anteilig durch Bindemittel ersetzt werden (müssen).

⁶ Z. B. modifizierte Stahlwerksschlacke oder Betonbrechsande. Unter Verwendung dieser Stoffe hergestellte Zemente sind im Szenario unter „Sonstige Zemente“ subsummiert.

In der Summe verbleibt der Klinkeranteil in Zementen – aufgrund der Notwendigkeit, den wegfallenden Hüttensand zu kompensieren – lange in etwa auf dem heutigen Niveau und kann erst langfristig (nach 2040) signifikant abgesenkt werden (s. Abbildung 4-6).

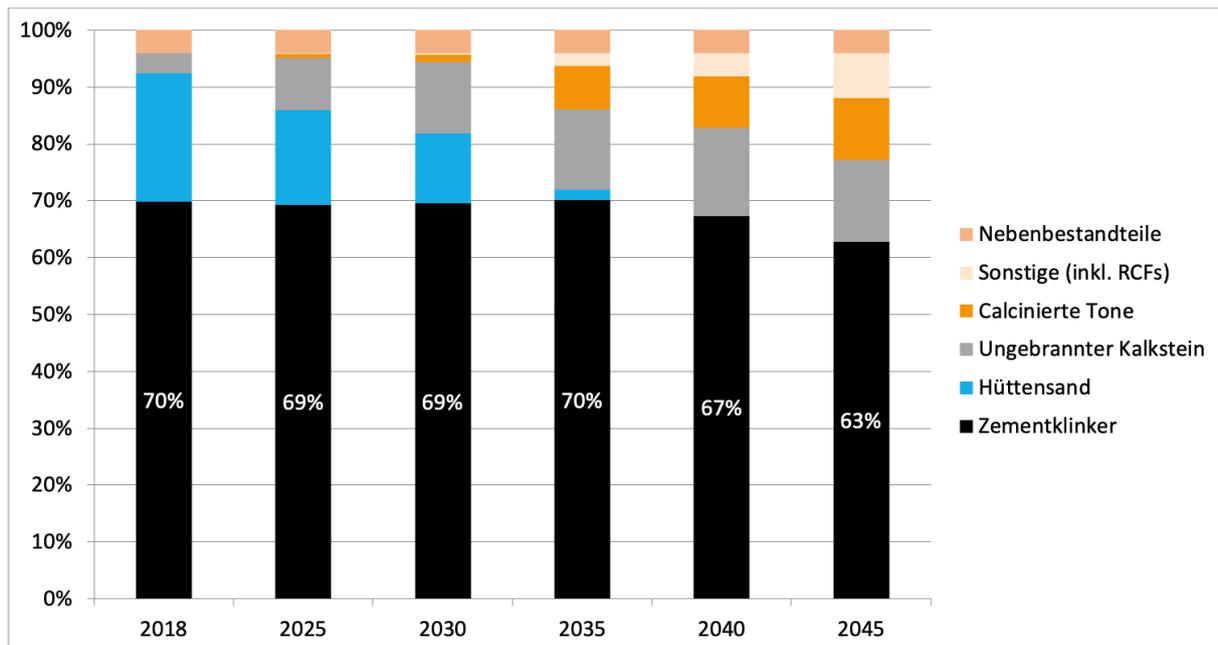


Abbildung 4-6: Entwicklung der Zementbestandteile (ohne neue Bindemittel). Die angegebenen Prozentwerte beziehen sich auf den durchschnittlichen Klinkeranteil im Zementmix.

Die Bereitstellung thermischer Energie für die Klinkerherstellung verändert sich im Szenario dahingehend, dass der Anteil abfallbasierter Brennstoffe von heute ca. 70 % bis 2045 kontinuierlich bis auf 90 % erhöht wird (VDZ 2020). Aufgrund des langfristig sinkenden thermischen Energiebedarfs (infolge der rückläufigen Klinkerproduktion) liegt der Bedarf an entsprechend nutzbaren Abfallstoffen nach einem zwischenzeitlichen Zuwachs langfristig in etwa auf dem heutigen Niveau. Die restlichen 10 % des thermischen Energiebedarfs für die Klinkerherstellung werden bis 2045 vollständig durch Bioenergie gedeckt, die ab 2035 in steigendem Umfang eingesetzt wird. Die heute eingesetzten fossilen Energieträger werden entsprechend schrittweise ersetzt – Braunkohle bis 2035 und Steinkohle sowie alle anderen fossilen Energieträger bis 2045. Der Strombedarf der Zementindustrie steigt im Szenario durch die angenommene CO₂-Abscheidung mittels des Oxyfuel-Verfahrens (s. u.) trotz rückläufiger Klinkerproduktionsmengen deutlich an, nämlich gegenüber dem Basisjahr um 45 % bis 2045.

Der CO₂-Abscheidung und anschließenden Speicherung bzw. Nutzung kommt im Szenario S4C-KN eine wichtige Rolle zu, um den Ausstoß der verbleibenden entstehenden CO₂-Menge in die Atmosphäre weitgehend zu vermeiden. Es wird im Szenario angenommen, dass die meisten verbleibenden

Standorte der Klinkerherstellung (85 % der Gesamtkapazität im Jahr 2045) bis zum Jahr 2045 an eine überregionale CO₂-Infrastruktur angeschlossen werden, wodurch ein Abtransport des CO₂ in Richtung Seehäfen (Rotterdam, Wilhelmshafen) und von dort zu einer geologischen Speicherung unter der Nordsee möglich wird. Für die CO₂-Abscheidung wird an diesen Standorten überwiegend das energieeffiziente Oxyfuel-Verfahren genutzt; nur an einem Standort wird die sich bereits heute im Bau befindliche LEILAC-Demonstrationsanlage hochskaliert.

Für drei verbleibende Klinkerproduktionsstandorte in Süddeutschland (15 % der zukünftigen Gesamtkapazität) wird im Szenario S4C-KN angenommen, dass dort keine überregionale CO₂-Infrastruktur zur Verfügung stehen wird. An zwei dieser Standorte wird unter Nutzung von Abwärme auf energieeffiziente Weise eine aminwäschebasierte CO₂-Abscheidung durchgeführt und dadurch 50 % des entstehenden CO₂ abgeschieden (insgesamt im Jahr 2045: ca. 450 kt CO₂). Dieses wird durch Mineralisierung permanent in Produkten gebunden – z. B. durch die Rekarbonatisierung von rezykliertem Zementstein (s. o.) und von rezyklierter Gesteinskörnung sowie bei der Herstellung von synthetischer Gesteinskörnung.⁷ An einem dritten Standort ohne Zugang zur überregionalen CO₂-Infrastruktur findet keine CO₂-Abscheidung statt, da die Klinkerproduktion an diesem Standort im Szenario aufgrund des nach 2045 weiter sinkenden Klinkerbedarfs noch vor 2050 stillgelegt wird.

Aus den zuvor geschilderten Entwicklungen leitet sich die zeitliche Veränderung der CO₂-Mengen und -Emissionen in der Zementindustrie ab (s. Abbildung 4-7). Durch die sinkende Klinkerproduktionsmenge und den veränderten Brennstoffeinsatz reduziert sich die Menge des entstehenden CO₂ bis 2045 um knapp 40 % im Vergleich zum Basisjahr. Durch CO₂-Abscheidung und permanente Speicherung können die verbleibenden CO₂-Emissionen auf ca. 340 kt CO₂ im Jahr 2045 reduziert werden. Hierfür angerechnet wurden auch negative Emissionen aus der Abscheidung und Speicherung biogener CO₂-Mengen (biogene C-Anteile abfallbasierter Brennstoffe sowie Bioenergie).⁸

⁷ Eine Übersicht über mögliche Verfahren bieten beispielsweise grundlegende Brancheninformationen wie die Technology Paper der European Cement Research Academy (ECRA, 2009, 2017, 2022, <https://ecra-online.org/research/technology-papers/>).

⁸ Im Szenario nicht eingerechnet wurde hingegen die natürliche Rekarbonatisierung von Beton. Diese Senke kann für das Jahr 2045 nach (VDZ 2020) konservativ mit mindestens 1,5 Mio. t CO₂ und nach (Stripple et al., 2018) mit ungefähr 2 Mio. t CO₂ abgeschätzt werden.

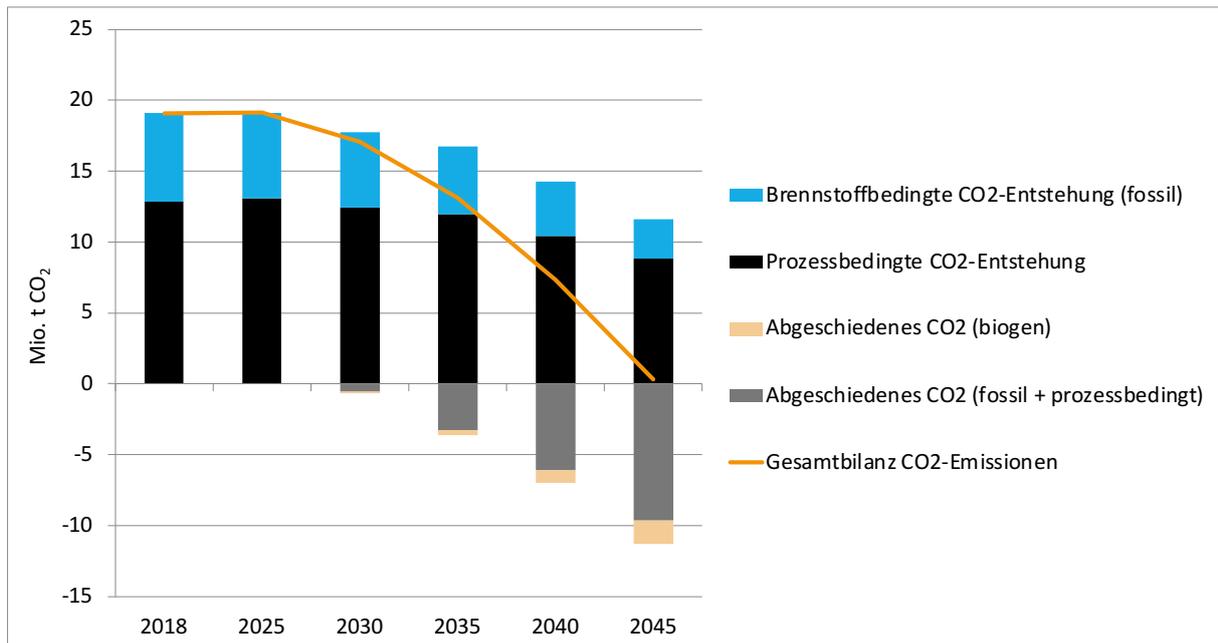


Abbildung 4-7: Entwicklung der CO₂-Mengen in der Zementindustrie

4.3 Vergleich der in verschiedenen vorliegenden Klimaschutzszenarien beschriebenen Transformationspfade für den Industriesektor

Neben der Erarbeitung des Szenarios S4C-KN wurden im Themenfeld „Szenarien und Transformationspfade“ während der Projektlaufzeit auch mehrere Szenarien aus unterschiedlichen vorliegenden Studien miteinander verglichen (Röhnelt et al. 2021; Samadi 2022; Samadi und Lechtenböhrer 2022a, 2022b). Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Szenarien wurden – mit einem Fokus auf den Industriesektor – in mehreren Veröffentlichungen herausgearbeitet und diskutiert. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse der durchgeführten Metaanalysen von Klimaschutzszenarien für Deutschland hinsichtlich der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der jeweils beschriebenen Transformationspfade des Industriesektors zusammengefasst:

Wesentliche Gemeinsamkeiten

- Es ist technisch möglich, im Industriesektor bis Mitte des Jahrhunderts Netto-Emissionsminderungen von mindestens 97 Prozent (im Vergleich zu 1990) zu erreichen.
- Die Stromnachfrage des Industriesektors wird in den kommenden Jahrzehnten als Summe der direkten und indirekten Nutzung von Strom (in Form von Wasserstoff und synthetischen Kohlenwasserstoffen) erheblich ansteigen.
- Die Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff wird voraussichtlich notwendig sein, um Klimaneutralität zu erreichen. Dies kann an Industrieanlagen mit dem Vorteil einer höheren

CO₂-Konzentration, oder mit deutlich höherem Energieaufwand über Luftabscheidung, oder auf beiden Wegen erfolgen.

- In allen Szenarien wird von weiteren Verbesserungen bei der Energieeffizienz und von höheren (wenn auch unterschiedlich hohen) Recyclingraten ausgegangen.
- Alle betrachteten Szenarien erwarten, dass die primäre Stahlerzeugung vollständig auf die wasserstoffbasierte Direktreduktionsroute umgestellt wird.

Wesentliche Unterschiede

- Die betrachteten Szenarien weisen erhebliche Unterschiede hinsichtlich der relativen Bedeutung von Strom, Wasserstoff und Biomasse im Endenergiebedarf der Industrie in einem klimaneutralen System auf. Dies spiegelt die weitgehende Flexibilität der Industrie bei der Nutzung verschiedener Energiequellen für die Prozesswärmeerzeugung wider.
- Die Szenarien kommen hinsichtlich der Frage, ob und falls ja in welchem Maße Biomasse-CCS im Industriesektor zukünftig eine Rolle spielen sollte, zu unterschiedlichen Antworten.
- Es gibt sehr unterschiedliche Einschätzungen, wie stark die Recyclingraten in Zukunft erhöht werden können und ob chemisches Recycling einen wesentlichen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten wird.
- Schließlich werden Strategien der Nachfrageminderung und Materialsubstitution in den betrachteten Szenariostudien nicht bzw. nicht im Detail analysiert. Dieser Punkt deutet vermutlich weniger auf Gegensätze zwischen den Studien als auf eine generelle Unsicherheit über die Relevanz dieser Strategien und damit auf weiteren Forschungsbedarf hin.

4.4 Renewables Pull – Analysen zu möglichen zukünftigen Verlagerungen industrieller Produktion aufgrund regional abweichender Bedingungen für erneuerbare Energien

4.4.1 Einführung in den Renewables-Pull-Effekt

Ein Ziel der Arbeiten im Rahmen des Themenfelds „Szenarien und Transformationspfade“ war es, ein besseres Verständnis darüber zu erlangen, ob bzw. inwieweit zukünftig regionale Unterschiede in der Verfügbarkeit und den Kosten erneuerbarer Energien Investitionsentscheidungen von Industrieunternehmen beeinflussen werden (Samadi et al. 2021a, 2021b, Samadi et al. 2023). Für einen entsprechenden „Pull-Effekt“ auf die industrielle Produktion, der von Regionen mit besonders guten Bedingungen für erneuerbare Energien ausgehen könnte, wurde im Rahmen des Projekts der Begriff „Renewables Pull“ eingeführt. Der Renewables-Pull-Effekt kann zu einer geografischen Verlagerung industrieller Produktion von einer Region in eine andere führen, entweder durch eine Verlagerung bestehender Produktionskapazitäten oder durch Investitionen in zusätzliche neue Produktionsanlagen. Der Effekt könnte angesichts der in vielen Teilen der Welt zunehmend ambitionierten Klimaschutzziele zukünftig an Bedeutung gewinnen, da mit der Zielverschärfung der Druck auf Industrieunternehmen steigt, auf klimaneutrale Energieträger umzusteigen.

Industrieverlagerungen aufgrund von Renewables Pull weisen einige Ähnlichkeiten mit dem Konzept des "Carbon Leakage" auf, da sich letzteres ebenfalls auf die Verlagerung von Industrieaktivitäten von einer Region in eine andere bezieht. Die Ursache für die Verlagerung aufgrund von "Carbon Leakage" unterscheidet sich jedoch von der Ursache für die Verlagerung aufgrund von Renewables Pull. Im Falle von Carbon Leakage wird die auf fossilen Brennstoffen basierende Industrieproduktion von Regionen mit vergleichsweise schwachen Klimaschutzvorschriften und niedrigen CO₂-Preisen angezogen, da die auf fossilen Brennstoffen basierende Produktion in diesen Regionen billiger und damit wettbewerbsfähiger sein kann als die entsprechende Produktion in Regionen mit ehrgeizigeren Klimaschutzvorschriften und höheren CO₂-Preisen. Der theoretische Rahmen und die praktische Relevanz von Carbon Leakage werden in der wissenschaftlichen Literatur seit den 1990er Jahren ausgiebig diskutiert. Neuere Literatur deutet darauf hin, dass in der Vergangenheit ein gewisses Maß an Carbon Leakage stattgefunden haben könnte, das jedoch bisher begrenzt war.

Der Renewables-Pull-Effekt hingegen ist in der wissenschaftlichen Literatur bisher kaum behandelt worden. Das mag daran liegen, dass bisher selbst in Regionen mit außergewöhnlich guten Bedingungen für erneuerbare Energien die Herstellung energieintensiver Produkte oder Materialien unter Verwendung fossiler Brennstoffe im Allgemeinen billiger war als die Produktion dieser Güter auf der Grundlage erneuerbarer Energien. Da jedoch die Kosten für die Erzeugung von Strom und Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen weiter sinken (IRENA 2022, IEA 2022, IRENA 2020) und die CO₂-Kosten in Zukunft voraussichtlich steigen werden (IEA 2022) wurde in der Literatur in jüngerer Zeit die Möglichkeit von Renewables-Pull-induzierten Industrieverlagerungen diskutiert, ohne jedoch diesen Begriff zu verwenden.

Gielen et al. (2020) weisen darauf hin, dass die Verlagerung von energieintensiven Industrien in Länder mit außergewöhnlichen Wind- und Sonnenverhältnissen einen wichtigen Beitrag dazu leisten könnte, eine zukünftig klimaneutrale Industrieproduktion wettbewerbsfähig zu machen. Die Autoren konzentrieren sich auf die wasserstoffbasierte Stahlproduktion und schlagen vor, dass der energieintensive Prozess der Reduktion von Eisenerz in Zukunft in Ländern wie Australien angesiedelt werden könnte, die über Eisenerzvorkommen verfügen und zudem von hervorragenden Wind- und Sonnenverhältnissen profitieren. Das direkt reduzierte Eisen (DRI) könnte dann in andere Länder exportiert werden, wo es zu Stahl weiterverarbeitet würde. Auch Trollip et al. (2022) gehen davon aus, dass die wasserstoffbasierte DRI-Produktion an bestimmten Standorten mit der Zeit mit konventionell hergestelltem Eisen konkurrieren kann, und schlagen vor, dass Südafrika mit seinen Eisenerzvorkommen und preiswertem Solarstrom ebenfalls ein Exporteur von wasserstoffbasiertem DRI werden könnte.

Es gab bisher jedoch nach Kenntnis des SCI4climate.NRW-Projektteams noch keine Literatur, die ein theoretisches Konzept für den zugrundeliegenden Renewables-Pull-Effekts erstellt hat. Im Rahmen des Themenfeldes „Szenarien und Transformationspfade“ wurde daher ein solches Konzept erarbeitet und in Form eines Projektberichts und eines darauf aufbauenden Artikels in der Zeitschrift „Energiewirtschaftliche Tagesfragen“ veröffentlicht (Samadi et al. 2021c). Zusätzlich wurden im

Rahmen des Projekts in den Jahren 2021 und 2022 mehrere Workshops zu dem Thema „Renewables Pull“ abgehalten (u. a. im Oktober 2021 im Rahmen der Online-Konferenz „Wissenschaft trifft Wirtschaft“), auf denen mit Vertreter*innen aus Industrie, Wissenschaft und Politik über das Konzept und die mögliche zukünftige praktische Relevanz des Effekts diskutiert wurde.

4.4.2 Mögliche Auslöser des Renewables-Pull-Effekts

In dem theoretischen Konzept zu Renewables Pull werden zunächst drei potenzielle Entwicklungen identifiziert, die einen Renewables-Pull-Effekt auslösen können. Diese Entwicklungen wurden bereits in der Vergangenheit beobachtet und werden wahrscheinlich auch in Zukunft an Bedeutung gewinnen:

- *Steigende Kosten für die Nutzung fossiler Energieträger*, z. B. durch eine strengere Klimapolitik und damit verbundene Instrumente (wie die Einführung oder Erhöhung eines CO₂-Preises). Der damit verbundene Anstieg der Kosten für die industrielle Produktion auf der Grundlage fossiler Brennstoffe könnte dazu führen, dass die industrielle Produktion auf der Grundlage erneuerbarer Energiequellen in Regionen mit guten Bedingungen für erneuerbare Energien wettbewerbsfähig wird.
- *Sinkende Kosten für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen* – z. B. durch technische Fortschritte oder öffentliche Förderung – können dazu führen, dass die Nutzung erneuerbarer Energiequellen in bestimmten industriellen Anwendungen auch ohne (zusätzliche) klimapolitische Instrumente wirtschaftlicher ist als die Nutzung fossiler Brennstoffe.
- *Entstehen einer expliziten Nachfrage nach "grünen" Materialien oder Produkten* auf den Märkten, da "grüne" Produkte mit einem geringen CO₂-Fußabdruck ein Alleinstellungsmerkmal in einem bestimmten Marktsegmenten darstellen können.

Jede einzelne dieser Entwicklungen kann dazu führen, dass Renewables Pull zukünftig an Bedeutung gewinnen wird. Es erscheint aber plausibel, dass das Zusammenwirken aller drei Entwicklungen die zukünftige Relevanz von Renewables Pull erhöhen wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der typischerweise sehr langen Lebensdauer von Industrieanlagen – insbesondere in der Grundstoffindustrie – nicht nur die *aktuellen* Kosten für fossile Brennstoffe und für erneuerbare Energien sowie die *gegenwärtigen* Verbraucherpräferenzen für das Auftreten von Renewables Pull relevant sind, sondern auch die *vermuteten zukünftigen* Kosten bzw. Präferenzen.

4.4.3 Veranschaulichung des Renewables-Pull-Effekts in einem Zwei-Länder-Modell

Im Folgenden wird der Renewables-Pull-Effekt anhand eines vereinfachenden Zwei-Länder-Modells erläutert. Dabei werden die folgenden Modellannahmen getroffen:

- In der Ausgangssituation ist die industrielle Produktion auf der Basis fossiler Energieträger in Land A und Land B gleich teuer und jeweils billiger als die industrielle Produktion auf Basis grüner Energieträger.
- Die Grenzkosten für grüne Energieträger sind in Land B niedriger als in Land A.

- Während die Transportkosten von Industriegütern zwischen den beiden Ländern vernachlässigbar sind, gilt dies nicht für die Transportkosten von grünen Energieträgern wie grünem Strom, grünem Wasserstoff oder Biomasse.
- In der Ausgangssituation findet ein gewisser Austausch von Industrieprodukten zwischen den beiden Ländern statt. (Obwohl die Produktionskosten als identisch angenommen werden, findet ein Handel aufgrund unterschiedlicher Produkteigenschaften statt, d. h. die Waren sind nicht völlig homogen).

Die Abbildung 4-8 veranschaulicht, wie steigende Kosten für die Nutzung fossiler Brennstoffe zu Veränderungen bei den Produktionskosten führen können und warum infolgedessen eine Verlagerung der Industrieproduktion von Land A nach Land B möglich ist.

Abbildung 4-8 a) zeigt den Fall eines identischen oder ähnlichen Anstiegs der Kosten für die Nutzung fossiler Brennstoffe in den Ländern A und B. Dabei wird angenommen, dass dieser Kostenanstieg durch verschärfte klimapolitische Maßnahmen in beiden Ländern ausgelöst wird, z. B. durch ein internationales Klimaschutzabkommen. Diese politischen Maßnahmen führen explizit oder implizit zu einer Erhöhung der CO₂-Kosten und damit zu einer Erhöhung der Kosten für die Nutzung fossiler Energieträger und fossiler Rohstoffe (siehe schraffierte Flächen in Abbildung 4-8a)).

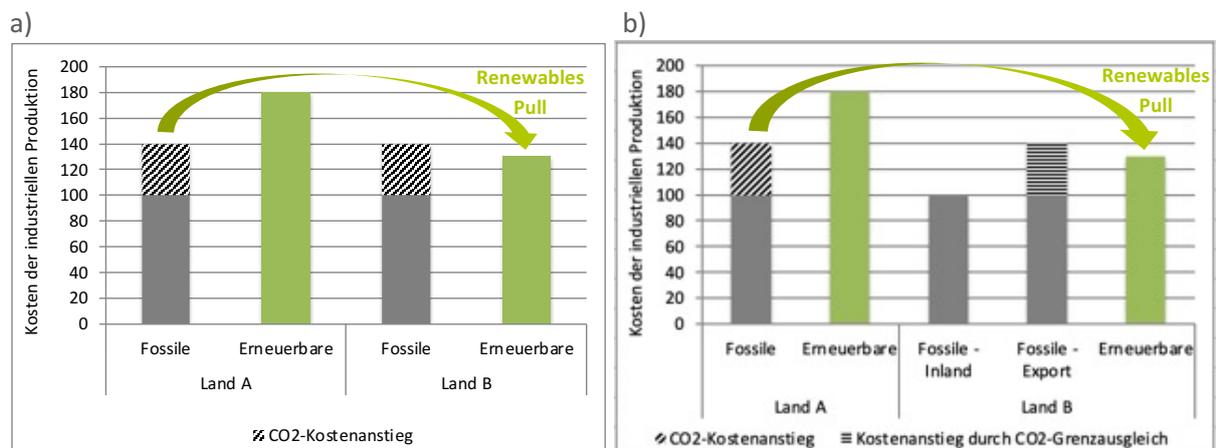


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung des Renewables-Pull-Effekts aufgrund steigender Kosten für die Nutzung fossiler Energieträger als Folge a) einer strengeren Klimapolitik in beiden Ländern und b) einer einseitigen Verschärfung der Klimapolitik in Land A in Kombination mit der Einführung eines CO₂-Grenzausgleichsmechanismus

Aufgrund günstiger natürlicher und klimatischer Bedingungen in Land B können die durch eine strengere Klimapolitik ausgelösten steigenden Kosten fossiler Energieträger teilweise durch relativ günstige Grenzkosten grüner Energieträger kompensiert werden. Dies ist jedoch in Land A nicht der Fall. Hier bleibt die Produktion auf Basis grüner Energieträger auch nach dem Anstieg der CO₂-Kosten teurer als die Produktion auf Basis fossiler Energieträger. Der geringere Anstieg der Energiekosten in Land B stärkt (ceteris paribus) die Wettbewerbsposition von Land B gegenüber Land A. Infolgedessen tritt der Renewables-Pull-Effekt ein, und die Verlagerung der Industrieproduktion von Land A nach

Land B kann insbesondere für Unternehmen in energieintensiven Branchen attraktiv werden, sowohl zur Deckung der Nachfrage in Land B als auch für den Export nach Land A.

Während in Abbildung 4-8 a) davon ausgegangen wird, dass die Klimapolitik in beiden Ländern in ähnlichem Maße verschärft wird, kann der Renewables Pull prinzipiell auch dann eintreten, wenn nur ein Land eine strengere Klimaschutzpolitik verfolgt. Wird eine solche Verschärfung z. B. in Land A umgesetzt und gleichzeitig ein CO₂-Grenzausgleich über einen „Carbon Border Adjustment Mechanism“ (CBAM) eingerichtet, um Carbon Leakage zu vermeiden bzw. zu minimieren, könnte Land A durch den Renewables-Pull-Effekt von einer Verlagerung von Teilen seiner Industrieproduktion betroffen sein (siehe Abbildung 4-8 b)). Dies wäre dann der Fall, wenn es sich für einzelne Unternehmen lohnt, eine klimafreundliche Produktion auf der Basis grüner Energiequellen in Land B aufzubauen und die Waren in Land A zu exportieren. Auf diese Weise könnten die Unternehmen von den relativ niedrigen Kosten einer klimafreundlichen Produktion in Land B profitieren und wären – aufgrund des geringen CO₂-Fußabdrucks ihrer Produktion – nicht mit einem (erheblichen) Grenzausgleichspreis konfrontiert.

Ebenso könnte eine einseitige Verschärfung der Klimapolitik in Land B zu einem Renewables Pull-Effekt führen. Dies wird in Samadi et al. (2021b) ausführlicher erläutert.

Es ist anzumerken, dass das hier verwendete vereinfachte Zwei-Länder-Modell lediglich den Schluss zulässt, dass es eine generelle *Möglichkeit* von Industrieverlagerungen gibt, die durch den Renewables-Pull-Effekt ausgelöst werden. Ob und in welchem Umfang solche Verlagerungen tatsächlich stattfinden, hängt von vielen Faktoren ab – nicht zuletzt von der Relevanz der Energiekosten im Vergleich zu anderen Standortfaktoren – und kann ohne umfangreiche empirische Analysen nicht eindeutig beantwortet werden.

Grundsätzlich kann der Renewables-Pull-Effekt auch ohne einen Anstieg der Kosten für die Nutzung fossiler Energieträger auftreten. Dies kann der Fall sein, wenn es zu Kostensenkungen bei der industriellen Produktion auf Grundlage grüner Energiequellen kommt. Kostensenkungen bei Wind- oder Photovoltaikanlagen oder auch bei den spezifischen Prozessen, die für die Nutzung grüner Energien erforderlich sind (z. B. bei wasserstoffbetriebenen Direktreduktionsanlagen für die Primärstahlerzeugung), können hierfür Ursachen sein. In einem solchen Fall kann die industrielle Produktion auf Grundlage grüner Energieträger in Land B mit seinen guten Bedingungen für erneuerbare Energien kostengünstiger werden als die industrielle Produktion auf Grundlage fossiler Energieträger. In der Folge ist es möglich, dass Teile der bisher in Land A angesiedelten Industrieproduktion in Land B verlagert werden.

Eine weitere möglich Ursache für einen Renewables-Pull-Effekt hängt nicht mit Änderungen der Produktionskosten zusammen, sondern wird von den Präferenzen der Nachfrageseite bestimmt. Während ein industrielles Produkt (z. B. eine Tonne Rohstahl) von Verbraucher*innen in der Ausgangssituation unabhängig vom Produktionsprozess als homogenes Gut angesehen wird, kann sich

dies im Laufe der Zeit infolge eines wachsenden Umwelt- oder Klimabewusstseins in Teilen der Gesellschaft ändern: Ein Teil der Verbraucher*innen könnte zwischen dem auf der Basis fossiler Brennstoffe hergestellten Industriegut einerseits und dem auf der Basis grüner Energiequellen hergestellten Gut andererseits unterscheiden. Denkbar ist auch, dass ein bereits vorhandenes gesellschaftliches Bewusstsein erst durch Unternehmensinitiativen zur Heterogenisierung von Produkten auf dem Markt sichtbar wird.

Geht eine solche Unterscheidung mit einer höheren Zahlungsbereitschaft für das klimafreundliche oder klimaneutrale industrielle Gut einher, könnte dies sowohl in Land A als auch in Land B zu einem Rückgang der Nachfrage nach fossiler Industrieproduktion und zu einem Nachfrageanstieg nach Industrieproduktion auf Basis grüner Energieträger führen. Aufgrund der niedrigeren Grenzkosten der Produktion auf Basis grüner Energieträger in Land B kann davon ausgegangen werden, dass es in diesem Fall zu einer gewissen Verlagerung der Industrieproduktion von Land A nach Land B als Folge des Renewables-Pull-Effekts kommen würde. Die verlagerte Produktion könnte dann "grüne" Industrieprodukte nach Land A exportieren oder Exporte von Land A nach Land B ersetzen und so die umweltbewusste Nachfrage in Land B decken.

4.4.4 Eigenschaften industrieller Produktion als Indikatoren für die zukünftige Relevanz von Renewables Pull

In Samadi et al. (2023) wurden sieben Eigenschaften industrieller Produktion definiert, die – sofern sie alle oder die meisten von ihnen in Hinblick auf ein bestimmtes industrielles Gut erfüllt sind – auf eine hohe zukünftige Relevanz des Renewables-Pull-Effekts schließen lassen. Dabei handelt es sich um die folgenden Eigenschaften:

- Hoher Anteil der Energiekosten an den gesamten Produktionskosten
- Niedrige spezifische Transportkosten
- Verfügbarkeit wichtiger Input-Ressourcen an Standorten zusätzlich zu hervorragenden Bedingungen für erneuerbare Energien
- Keine oder geringe Nutzbarkeit bestehender konventioneller Anlagen für eine klimaneutrale Produktion
- Fehlende Synergieeffekte einer vertikal integrierten Produktion
- Hoher Grad an Produkthomogenität (Produktdifferenzierung schwierig)
- Geringe gesamtwirtschaftliche oder sicherheitspolitische Relevanz heimischer Produktion

In Samadi et al. (2023) wird für die Produktion von Eisenschwamm („direct reduced iron“, DRI) sowie von Ammoniak beispielhaft aufgezeigt, dass bei diesen beiden Grundstoffen die sieben genannten Eigenschaften weitgehend erfüllt sind und somit in beiden Bereichen eine zukünftige Relevanz von Renewables Pull als wahrscheinlich eingeschätzt werden kann.

4.4.5 Identifizierter weiterer Forschungsbedarf zu Renewables Pull

Um die zukünftige Relevanz des Renewables-Pull-Effekts besser verstehen zu können, ist eine Analyse der Bedeutung der Energiekosten im Vergleich zu anderen Standortfaktoren für verschiedene Industriezweige bzw. Produkte von hoher Bedeutung. Eine Analyse früherer Standortentscheidungen von Unternehmen sowie explorative Interviews mit unternehmerischen Entscheidungsträger*innen könnten dazu beitragen, ein besseres Verständnis der wichtigsten Standortfaktoren einzelner Branchen zu gewinnen. Eine weitere Option für ein besseres Verständnis der Relevanz des Renewables-Pull-Effekts wäre die Durchführung von Fallstudien, die die (vielschichtigen) Gründe einzelner Unternehmen bei kürzlich vorgenommenen Standortentscheidungen untersuchen.

Eine wichtige Frage für Regierungen in Ländern wie Deutschland ist, ob und inwieweit durch Renewables Pull verursachte Produktionsverluste die internationale Wettbewerbsfähigkeit der in einem Land verbleibenden Produktion negativ beeinflussen können. So macht die energieintensive Grundstoffproduktion typischerweise nur einen begrenzten Anteil der Wertschöpfung und der Beschäftigung einer Volkswirtschaft aus, eine deutlich größere Rolle spielen aber häufig eine Reihe von Branchen, die von diesen Grundstoffen abhängig sind, wie beispielsweise die Automobilindustrie. Die Wettbewerbsfähigkeit der verbleibenden Unternehmen in der nachgelagerten Wertschöpfung könnte beeinträchtigt werden, wenn durch die Verlagerung der Grundstoffproduktion die Transportkosten für Vorleistungen steigen und potenzielle Vernetzungsvorteile (die sich infolge einer räumlichen Nähe zu Zulieferunternehmen ergeben) verloren gehen. Ein besseres Verständnis des wahrscheinlichen Ausmaßes, in dem nachgelagerte Produktion betroffen sein könnte, ließe sich möglicherweise durch die Analyse früherer geografischer Dynamiken innerhalb von Lieferketten und die Untersuchung der Bedeutung der Nähe von Zulieferern für potenziell betroffene Industriezweige gewinnen.

4.5 Modellierung des europäischen Produktionssystems der Petrochemie

Im Rahmen der Arbeiten im Themenfeld „Szenarien und Transformationspfade“ wurde ein Modell zur Optimierung von regionalen Wertschöpfungsketten der petrochemischen Industrie aufgebaut (Schneider und Saurat 2020). Das Modell bildet das existierende technische System in Europa mit seinen unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen von der Raffinerie über die Plattformchemikalien und Zwischenprodukte bis hin zu den Polymeren sowie einen Teil der spezifischen Infrastrukturen (Feedstock- und Produkt-Pipelines sowie die Rheinschifffahrt) ab. Der fossile Input von Kohlenwasserstoffen kann über eine Bepreisung des fossilen Kohlenstoff-Einsatzes oder über harte absolute Begrenzungen (Budget für einen einzelnen Zeitraum oder den gesamten Modellierungshorizont) über die Zeit begrenzt werden. Um die Produktionsanforderung für die Endprodukte (Polymere) einzuhalten, kann das Modell auf Kunststoff-Abfälle, Biomasse oder CO₂-basierte Kohlenwasserstoffe (Methanol oder Naphtha) ausweichen. Sowohl die zukünftige Nachfrage nach Kunststoffen als auch die damit korrespondierende Verfügbarkeit von Abfällen wurden in einem vorgelagerten Schritt in einem Tool simuliert und können somit als Randbedingung für die Optimierung

dienen. Im Rahmen der in dem Themenfeld vorgenommenen Analysen zur Petrochemie wurde auch die Verfügbarkeit eines gewissen Kontingents an Biomasse angenommen.

Mit dem Modell können Analysen des technischen Systems vorgenommen werden, also unter bestimmten Randbedingungen zu erwartende Entwicklungen der Produktionsrouten der petrochemischen Industrie im Zeitverlauf. Daneben sind auch Kostenanalysen möglich, wie beispielsweise die Ermittlung von Grenzkosten der Bereitstellung einzelner Polymere, die als Proxy für zukünftige Marktpreise interpretiert werden können (s. die beispielhafte Abbildung 4-9).

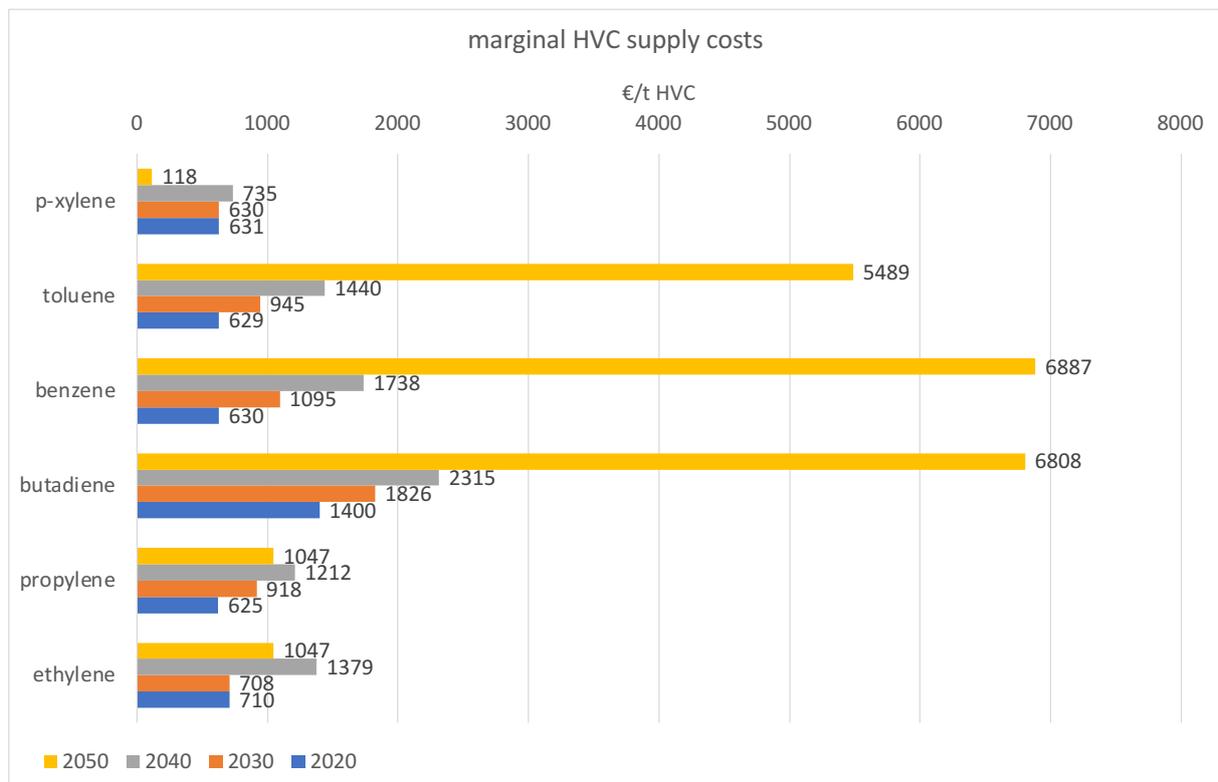


Abbildung 4-9: Marginale Bereitstellungskosten für high-value chemicals (HVC) in einem beispielhaften Szenario

Hiermit kann wiederum die Plausibilität des ex-ante bestimmten Nachfrage-Portfolios überprüft werden. Daneben kann mit diesem Modell auch die mögliche Rolle der derzeitigen NRW-Standorte in einem zukünftigen defossilisierten europäischen Produktionssystem modellbasiert analysiert werden. In seiner Anwendung ermöglicht das Modell ein vertieftes Verständnis über die Funktionsweise heutiger und zukünftiger Wertschöpfungsketten der petrochemischen Industrie in Europa. Ein Beispiel für eine solche Analyse zeigt Abbildung 4-10 anhand der gegenwärtigen Wertschöpfungsketten der chemischen Industrie im sogenannten ARRRRA-Cluster (Antwerpen-Rotterdam-Rhein-Ruhr-Area).

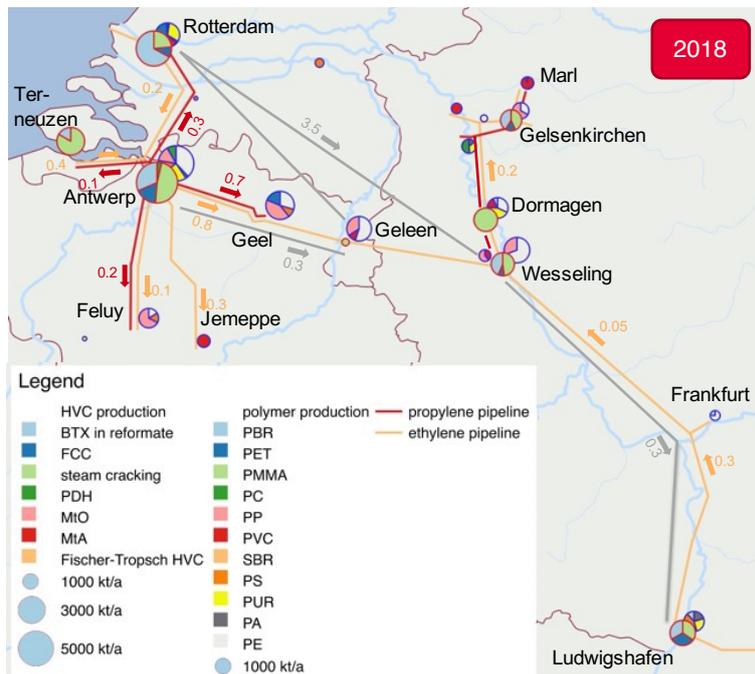


Abbildung 4-10: Simuliertes Produktionsnetzwerk der chemischen Industrie

Das Modelldesign sowie Modellannahmen und -ergebnisse konnten im Projektverlauf mit verschiedenen Stakeholdern im Rahmen von drei Workshops diskutiert und in diesem Rahmen validiert werden. Das Modell konnte inzwischen über das Projekt SCI4climate.NRW hinaus in mehreren Projekten eingesetzt werden (insbesondere in den Projekten „Klimaneutrales Deutschland 2045“ und „Gexit“) und wird auch aktuell angewendet und weiterentwickelt (in den Projekten „GreenFeed“ und „hyBit“). Im Rahmen des derzeit laufenden Projekts GreenFeed ist geplant, das Modell auch „open source“ der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zur Anwendung zur Verfügung zu stellen. Innerhalb dieses Projekts (GreenFeed) wurde außerdem die mit dem Modell gekoppelte Vorstufe der Simulation von Nachfrage und Abfällen erweitert und verfeinert, so dass hiermit zukünftig beispielsweise das Potential von chemischem Recycling noch besser analysiert werden kann. Zukünftig möglich wäre auch die Analyse der zu erwartenden Auswirkungen von dezidierten Infrastrukturprojekten (z. B. Erweiterung des Propylen-Netzes oder Umwidmung bestehender Pipelines) auf zukünftige regionale Wertschöpfungsnetzwerke der Petrochemie.

4.6 Literaturverzeichnis inklusive Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW

In diesem Abschnitt sind alle Veröffentlichungen aus dem Themenfeld 3 (Szenarien und Transformationspfade) von SCI4climate.NRW aufgelistet (blaue Schriftfarbe), zusammen mit weiteren Literaturquellen, die im Text zitiert sind (Standardschriftfarbe). Nicht einzeln aufgelistet sind zwölf je 3-seitige Zusammenfassungen wissenschaftlicher Veröffentlichungen zu den Möglichkeiten einer weitgehenden Transformation des Industriesektors, die zwischen Oktober 2019 und Januar 2020 entstanden sind. Von SCI4climate.NRW herausgegebene Berichte sind durch ein vorangestelltes

„[SCI4climate.NRW]“ gekennzeichnet, sie werden hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit unter Nennung der Autor*innen aufgelistet und auch entsprechend zitiert. Eine Gesamtübersicht aller Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW findet sich in Abschnitt 1.4. Alle SCI4climate.NRW-Berichte sowie die meisten weiteren im Rahmen von SCI4climate.NRW entstandenen Veröffentlichungen sind auf der Webseite von NRW.Energy4climat/IN4climate.NRW verfügbar (<https://www.energy4climate.nrw/industrie-produktion/in4climatenrw/ergebnisse-des-thinktanks>).

- [SCI4climate.NRW] Doré, L., Fishedick, M., Fischer, A., Hanke, T., Holtz, G., Krüger, C., Lechtenböhrer, S., Samadi, S., Saurat, M., Schneider, C., & Tönjes, A. (2023). Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045—Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW. Wuppertal Institut; Institut der deutschen Wirtschaft.
- Gielen, D., Saygin, D., Taibi, E., & Birat, J. P. (2020). Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study. *Journal of Industrial Ecology*, 24, 5, 1113-1125. <https://doi.org/10.1111/jiec.12997>.
- IEA (2022). World Energy Outlook 2022. International Energy Agency
- IRENA (2020). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2022). Renewable Power Generation Costs in 2021. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Lechtenböhrer, S., Samadi, S., Leipprand, A., & Schneider, C. (2019). Grüner Wasserstoff, das dritte Standbein der Energiewende? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69(10), 10–13.
- [SCI4climate.NRW] Röhnelt, A., Samad, S., Scholz, A., & Taubitz, A. (2021). Metaanalyse von Klimaschutzszenarien für die Branchen Stahl, Zement und Chemie. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Samadi, S., Kobiela, G., & Zander, D. (2020). Kontextszenarien für das Forschungsprojekt SCI4climate.NRW. SCI4climate.NRW.
- Samadi, S., & Barthel, C. (2020). Meta-analysis of industry sector transformation strategies in German, European and global deep decarbonisation scenarios. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Samadi, S., Lechtenböhrer, S., Viebahn, P., & Fischer, A. (2021a). Conceptualisation of the potential Renewables Pull Effect. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Samadi, S., Lechtenböhrer, S., Viebahn, P., & Fischer, A. (2021b). Konzeptualisierung des möglichen Renewables-Pull-Phänomens – Definition, Wirkmechanismen und Abgrenzung zu Carbon Leakage. SCI4climate.NRW.
- Samadi, S., Lechtenböhrer, S., Viebahn, P., & Fischer, A. (2021c). Renewables Pull-Verlagerung industrieller Produktion aufgrund unterschiedlicher Kosten erneuerbarer Energien. 71. Jg. H. 7-8.
- [SCI4climate.NRW] Samadi, S. (2022). Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland.
- Samadi, S., & Lechtenböhrer, S. (2022a). Klimaneutralität bis 2045 – Vergleich der Entwicklungen im Energiesystem in aktuellen Szenarien für Deutschland. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 72. Jg, Heft 3.
- Samadi, S., & Lechtenböhrer, S. (2022b). Wege zu einer klimaneutralen Industrie. emw, S1|22 (Sonderausgabe: Dekarbonisierung in der Industrie).
- Samadi, S.; Fischer, A.; Lechtenböhrer, S. (2023): The Renewables Pull effect: How regional differences in renewable energy costs may influence future locations of industrial production, in: *Energy Research & Social Science* (im Review-Verfahren, Stand: April 2023).

- Schneider, C., & Saurat, M. (2020). Simulating geographically distributed production networks of a climate neutral European petrochemical industry. SCI4climate.NRW.
- Stripple, H., Ljungkrantz, C., Gustafsson, T., & Andersson, R. (2018). CO2 uptake in cement containing products – Background and calculation models for IPCC implementation. IVL Swedish Environmental Research Institute.
- Trollip, H., McCall, B., & Bataille, C. (2022). How green primary iron production in South Africa could help global decarbonization. *Climate Policy*, 22, 2, 236-247. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.2024123>.
- VDZ (Hrsg.) (2020). Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf.
- VDZ (Hrsg.) (2021). Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2020. Düsseldorf.

5 Rahmenbedingungen (Themenfeld 4)

5.1 Ziele, Themen und Forschungsfragen

Zielsetzung von Themenfeld 4 „Rahmenbedingungen“ ist es, politische Maßnahmen und Handlungsstrategien sowie komplementäre Rahmenbedingungen kriteriengeleitet zu entwickeln und zu prüfen. Diese sollen zum einen darauf abzielen grundlegende Innovationen anzuregen und zum anderen deren Umsetzung am Standort NRW zu begünstigen.

Dabei umfasst der Begriff der Rahmenbedingungen nicht nur politische oder regulatorische Instrumente: Hier ebenso zu betrachten sind ökonomische Rahmenbedingungen, also die Zukunftsfähigkeit und das Aufzeigen neuer unternehmerischer Chancen und Möglichkeiten bzw. tragfähiger Geschäftsmodelle sowie gesellschaftliche Rahmenbedingungen (beispielsweise Akzeptanz). Dazu gehören insbesondere auch die Berücksichtigung und Betrachtung der Investitions- und Innovationszyklen der Unternehmen in den verschiedenen Branchen.

Themenfeld 4 widmet sich demnach dem politischen und gesellschaftlichen Umfeld des Transformationsprozesses und dabei insbesondere

- Politikinstrumenten und -maßnahmen,
- regulatorischen Rahmenbedingungen,
- Erfolgsbedingungen für klimafreundliche Geschäftsmodelle und den
- Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Der Transformationsprozess der Industrie ist längst in vollem Gange und dabei den geopolitischen Veränderungen und Entwicklungen auf nationaler und internationaler Ebene ausgesetzt. Deshalb ist es in Themenfeld 4 wichtig, die aktuellen Rahmenbedingungen und deren Anpassungen im laufenden politischen Prozess zu erfassen und zu begleiten. Die Europäische Kommission hat zur Umsetzung des „European Green Deal“ ein umfangreiches Maßnahmenpaket, das „Fit-for-55-Package“, beschlossen. Bereits zuvor wurden die deutschen Klimaziele verschärft. Nach der Bundestagswahl im September

2021 stand und steht die neue Bundesregierung vor der Aufgabe, diese aktuellen und hochrelevanten politischen Entwicklungen in passende Rahmenbedingungen für die deutsche Wirtschaft und damit auch die nordrhein-westfälische Industrie umzumünzen. Dies alles ist durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine deutlich unter Druck geraten. Für die meisten Unternehmen sind unmittelbare Herausforderungen hinsichtlich der Energieverfügbarkeit und Versorgungssicherheit in den Vordergrund gerückt. Angesichts von drohenden oder bereits entstandenen Liquiditätsengpässen sind Handlungsspielräume eingengt und Planungshorizonte verkürzt worden. Die Politik ist gefragt kurzfristig Hilfen anzubieten, um den Industriestandort zu erhalten. Gleichzeitig darf hierüber nicht die Planung und Umsetzung der Industrietransformation ins Hintertreffen geraten; die Politik muss ihre gestalterische Rolle beibehalten.

In Zusammenarbeit mit der Gesamtinitiative IN4climate.NRW und den anderen Themenfeldern im Projekt SCI4climate.NRW sind übergreifende Fragestellungen und unterschiedliche Perspektiven von hoher Bedeutung. Gemeinsam mit Themenfeld 1 konnte bereits im 2. Forschungsintervall ein Papier zu den globalen Importpotenzialen im Bereich Wasserstoff entwickelt werden, das nicht nur innerhalb von IN4climate.NRW eingespeist werden konnte, sondern auch in der Fachöffentlichkeit auf Resonanz gestoßen ist.

Gemeinsam mit Themenfeld 3 wird das Thema „Renewables Pull“ bearbeitet, welches die potenzielle Verlagerung industrieller Produktion an Standorte mit günstig verfügbaren regenerativen Energien in den Blick nimmt. Zentrale Perspektive für Themenfeld 4 ist dabei die Bedeutung einer verfügbaren nachhaltigen Energieversorgung und die Einordnung in den Kontext weiterer Standortfaktoren, die für die energieintensive Industrie von Bedeutung sind.

Weitere übergreifenden Fragestellungen betreffen die Auswahl von möglichen Instrumenten, die bestimmte in Themenfeld 3 entwickelte Szenarien geeignet flankieren können sowie die adäquate regulatorische Rahmensetzung für technisch als sinnvoll identifizierte Transformationsschritte. Die Perspektive von Themenfeld 4 ist dabei auch auf potenzielle Geschäftsmodelle ausgerichtet, mit denen innovative Ansätze zur Einsparung von Emissionen mittel- bis langfristig eigenständig profitabel werden können.

In Themenfeld 4 wurden dabei die folgenden wesentlichen Querschnittsthemen identifiziert und bearbeitet:

- Erneuerbare Energien
- Circular Economy
- Wasserstoffwirtschaft

Diese Querschnittsthemen haben auch Anknüpfungspunkte zu den entsprechenden Arbeitsgruppen in IN4climate.NRW.

In **Forschungsintervall 1** wurden zu den zentralen Forschungsfragen grundlegende Analysen durchgeführt. Zur Entwicklung und kriteriengeleiteten Evaluation von klimapolitischen Maßnahmen wurde ein Bewertungsraster und ein entsprechendes Bewertungstool entwickelt und erste grundlegende Analysen von Politikinstrumenten im Hinblick auf die zuvor erarbeiteten Kriterien durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass kein Instrument alle Kriterien (und damit verbundene Herausforderungen zur Umsetzung) gleichermaßen adressiert und es zudem ganz entscheidend auf die Ausgestaltungsmerkmale des jeweiligen Instruments ankommt, ob eine im Sinne der Kriterien gewünschte Wirkung eintritt oder nicht. Darüber hinaus wurden die Ausgangsbedingungen der Grundstoffindustrie und der Wasserstoffinfrastruktur untersucht, sowie Erfolgsfaktoren für innovative Geschäftsmodelle und erfolgreiche Strukturwandelprozesse, die relevante Rückschlüsse auf die Herausforderungen des nordrhein-westfälischen Industriestandortes zulassen, ermittelt. Ein weiteres Ergebnis war das gemeinsam mit der IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe erarbeitete Positionspapier zum Ausbau der Erneuerbaren Energien.

Im **2. Forschungsintervall** erfolgte eine Konkretisierung der bislang abstrakt analysierten Politikmaßnahmen und Prozessschritte insbesondere mit Blick auf grünen Wasserstoff. Zum Thema Kreislaufwirtschaft wurden kompakte Grundlagenpapiere erstellt, die gleichzeitig die Basis für weitere Forschung zu zirkulären Geschäftsmodellen bilden. Zudem wurde gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Rahmenbedingungen ein Papier zur Ausgestaltung von Klimaschutzverträgen erarbeitet und die Arbeitsgruppe Kreislaufwirtschaft ebenfalls bei ihrer Positionierung unterstützt. Weitere Produkte im 2. Forschungsintervall waren Papiere zum Potenzial nachhaltiger öffentlicher Beschaffung, zum Zusammenspiel von europäischem Emissionshandel und der Energiebesteuerung, sowie zur EU-Taxonomie. In einer eigens durchgeführten Patentanalyse wurde die Innovationstätigkeit der nordrhein-westfälischen Grundstoffindustrie im Hinblick auf klimafreundliche Patentanmeldungen unter die Lupe genommen und zusätzlich die Forschungs- und Entwicklungslandschaft untersucht. Die Rolle der Initiative IN4climate.NRW als Intermediär war Gegenstand einer umfangreichen Expertenbefragung, die in einem weiteren Papier aufgearbeitet und eingeordnet worden ist.

In **Forschungsintervall 3** wurden die Ergebnisse aus dem 2. Forschungsintervall mit den Forschungspartnern und insbesondere auch in den Arbeitsgruppen der Initiative vorgestellt, diskutiert und weiterentwickelt. Auf diese Weise konnten Handlungsansätze innerhalb und außerhalb der Initiative identifiziert werden. In den Vordergrund rückten drängende Themen wie der mögliche zukünftige Import klimafreundlicher Grundstoffe am Beispiel von grünem Ammoniak, aber auch die Bedeutung der EU-Taxonomie und daraus ableitbare transformationsinduzierte Veränderungen auf dem Arbeitsmarkt. Einen neuen Schwerpunkt bildete darüber hinaus die Untersuchung der kommunalen Ebene und dort zu verortenden Einflussfaktoren auf den Fortschritt der Transformation des Energieerzeugungssystems. Weitergeführt wurden zudem die Arbeiten zu Forschung und Entwicklung in NRW, indem ein Fokus auf Forschungsaktivitäten in Industrieunternehmen gelegt wurde. Im Bereich der Kreislaufwirtschaft wurde eine Befragung zu zirkulären Geschäftsmodellen und die Analyse von Materialflüssen durchgeführt.

5.2 Politikinstrumente und Handlungsoptionen

In **Forschungsintervall 1** erfolgte zunächst eine Charakterisierung von Politikinstrumenten, die anhand eines eigens entwickelten Kriterienschemas bewertet wurden.



Abbildung 5-1: Die vier Perspektiven zur Bewertung 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 et al. 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 und Standards

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.

Auch wenn die Wirkung von Politikinstrumenten von der konkreten Ausgestaltung abhängt, wurde eine grobe Bewertung der Politikinstrumente anhand der zuvor entwickelten Kriterien durchgeführt. Die grünen Felder in Tabelle 5-1 zeigen positive Einflussmöglichkeiten des Instruments auf ein Kriterium.

Tabelle 5-1: Bewertung der Politikinstrumente anhand zuvor entwickelter 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						

Ein wichtiges Ziel im **2. Forschungsintervall** war eine Konkretisierung der bislang abstrakt analysierten Politikmaßnahmen und Prozessschritte insbesondere mit Blick auf grünen Wasserstoff.

Das Papier *Wasserstoffwirtschaft: den Einstieg schaffen* (Adisorn et al. 2021) adressiert bestehende Herausforderungen und stellt darauf aufbauend eine Reihe von instrumentellen Ansätzen in Form von Steckbriefen vor und quantifiziert – wo möglich – das Potenzial der einzelnen Instrumente in

Abhängigkeit von ihrer Ausgestaltung. Dazu wurden Politikoptionen untersucht, mit denen sich das Ziel eines Hochlaufs der Bereitstellung von grünem Wasserstoff am besten erreichen lässt.

Für den Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft sind vor allem 4 zentrale Herausforderungen zu adressieren:

1. Der Aufbau von Kapazitäten für eine ausreichende Wasserstoffversorgung.
2. Eine notwendige Kostendegression zur wirtschaftlichen Anwendung von grünem Wasserstoff, sowohl bei den Kapitalkosten für die Elektrolyse als auch bei den Betriebskosten.
3. Der Aufbau von entsprechender Transportinfrastruktur im Inland sowie die Möglichkeit zum umfangreichen Import aus globalen Erzeugungsstandorten (mit hohen Solar- und Windressourcen).
4. Für den Einsatz von grünem Wasserstoff sind außerdem entsprechende Technologieinvestitionen in der Grundstoffindustrie notwendig. Entsprechende Anreize zur Investition sowie eine Technologieförderung sind zu verstärken. Hierzu gehören auch Rahmenbedingungen für die Nachfrage nach (mittels grünem Wasserstoff hergestellten) klimaneutralen Grundstoffen.

Einige Instrumente zur Überwindung der Herausforderungen sind bereits in der Planungs- und Umsetzungsphase. Darüber hinaus benötigt der Hochlauf einer stärkeren Wasserstoffwirtschaft jedoch absehbar weitere politische Regelungen und Unterstützung. Derzeit diskutierte Maßnahmen sind knapp in Abbildung 5-2 dargestellt.

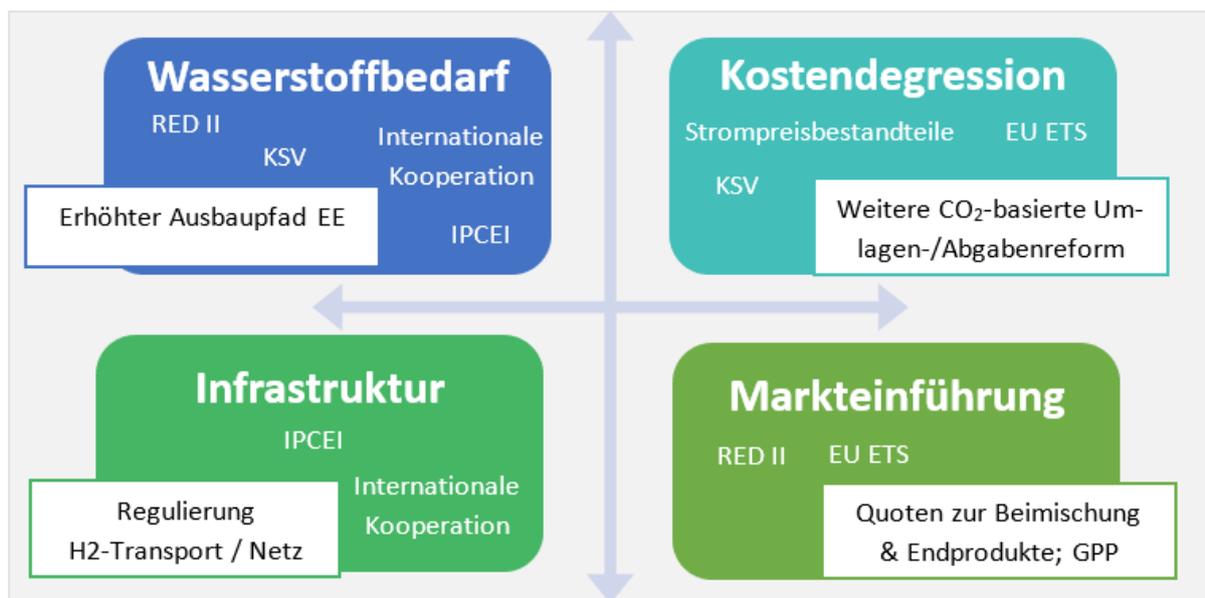


Abbildung 5-2: Weitere mögliche Ansätze für den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft

Auf dieser Basis hat die Arbeit im 2. und 3. Forschungsintervall das Thema Wasserstoff weiter in den Fokus genommen. Die Studie „Wasserstoffimporte – Bewertung der Realisierbarkeit von

Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030“ (Egenolf-Jonkmanns et al. 2021) ist themenfeldübergreifend gemeinsam mit Fraunhofer UMSICHT und dem Wuppertal Institut der Frage nachgegangen, inwieweit bis zum Jahr 2030 tatsächlich umfangreiche Wasserstoffimporte realisiert werden können und damit die Versorgungslücke zwischen angestrebten Bedarf und nationaler Erzeugung geschlossen werden kann.

Daraus ist bei der Stiftung Energie & Klimaschutz ein Gastbeitrag entstanden mit dem Titel „Grüner Wasserstoff: Wie realistisch sind die Importpläne der Bundesregierung bis 2030?“ In einem weiteren Gastbeitrag für das Magazin e|m|w des Fachverlages Energate, wurden die Studienergebnisse erneut für ein breites Publikum aufgearbeitet. Das Potenzial der Anwendung von grünem Wasserstoff ist der Schlüssel zur klimaneutralen Zukunft, der überall dort gebraucht wird, wo sich Emissionen nicht ausschließlich durch den Einsatz von grünem Strom vermeiden lassen. Beispielhaft dafür ist die Primärstahlerzeugung, aber auch der Flug- und Schiffsverkehr.

Der Frage, welche Hemmnisse einem Ausbau der Wasserstoffwirtschaft derzeit noch entgegenwirken, wurde in einer wissenschaftlichen Publikation nachgegangen. Zunächst wurden dabei vier zentrale Herausforderungen identifiziert: die Schaffung von Business Cases angesichts hoher Kosten, die Sicherstellung einer klimafreundlichen Produktion von Wasserstoff, die Priorisierung von Wasserstoffanwendungen und der Aufbau einer Transportinfrastruktur. Anhand dieser Herausforderungen wurden Kriterien abgeleitet und geprüft, inwiefern derzeit diskutierte Politikoptionen diese Kriterien erfüllen. Die folgenden Politikinstrumente wurden für die Untersuchung ausgewählt:

- Certification and Guarantees of Origin
- Carbon Pricing/EU ETS
- Reform of charges and funding policies
- Quotas
- Crediting green hydrogen for renewable target in transport (REDII)
- Regulating grid infrastructure

Bei der Analyse wurde festgestellt, dass ein Politikpaket notwendig ist, um alle Herausforderungen / Kriterien zu adressieren und dass die einzelnen Instrumente nicht losgelöst voneinander umgesetzt, sondern gut aufeinander abgestimmt werden sollten. Das betrifft sowohl die Einführung der Instrumente, die auf bereits implementierte Maßnahmen aufbauen und diese verstärken sollten als auch die Dauer der Maßnahme. Ferner ist die Zielgruppe ein entscheidender Aspekt, da diese oftmals unterschiedliche Bedürfnisse und Herausforderungen mit sich bringt und dadurch eine passgenaue Ausgestaltung der Instrumente erforderlich ist. Einige Maßnahmen stellen zudem eine Voraussetzung für andere Instrumente dar. Abschließend skizziert das Papier kurz- und langfristige Optionen für Politikpakete, die die Weichen für eine Wasserstoffzukunft in Deutschland stellen könnten. Das Papier „The Green Hydrogen Puzzle: Towards a German Policy Framework for Industry“ wurde in der Zeitschrift *Sustainability* (Sustainability 2021, 13, 12626) veröffentlicht (Tholen et al. 2021b).

Bei der Konferenz des European Council for an Energy Efficient Economy (eceee) konnte das Thema einer Fachöffentlichkeit vorgestellt werden und eine Präsentation mit dem Titel „Towards a German Policy Framework for a hydrogen future of German industry“ gehalten werden. Das dazugehörige Papier konnte nach Abschluss des Review-Prozesses als extended abstract veröffentlicht werden.

Zudem ist ein Papier zu **Green Public Procurement** entstanden zu den Potenzialen einer nachhaltigen öffentlichen Beschaffung (Fischer und Küper 2021), das im Düsseldorfer Landtag im Arbeitskreis Wirtschaft der SPD-Fraktion vorgestellt wurde. Das Thema stieß auf reges Interesse bei den Abgeordneten und der gemeinsame Dialog soll perspektivisch fortgesetzt werden. Das Papier nimmt eine erste Abschätzung möglicher Emissionsvermeidungspotenziale durch die Berücksichtigung nachhaltiger Kriterien im Rahmen der öffentlichen Beschaffung in Deutschland vor. Dazu wird die Vorgabe einer Quote von nachhaltigen Produkten im Bausektor modelliert, die mithilfe von grünem Wasserstoff hergestellt wurden. Einige Vor- und Nachteile sind in nachfolgender Abbildung 5-3 dargestellt.



Abbildung 5-3: Vor- und Nachteile des Green Public Procurement (GPP) anhand verschiedener Kriterien (Fischer und Küper 2021)

5.3 Innovationen und Geschäftsmodelle

Im **ersten Forschungsintervall** wurde eine Expertenbefragung zu Geschäftsmodellen durchgeführt.

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.

Zum Thema **Kreislaufwirtschaft** wurden im **2. Forschungsintervall** kompakte Grundlagenpapiere erstellt, die gleichzeitig die Basis für weitere Forschung zu zirkulären Geschäftsmodellen bilden.

Für das Schwerpunktthema Kreislaufwirtschaft wurden mehrere Factsheets erarbeitet. Ein erstes grundlegendes Factsheet „Einführung in die Circular Economy“ (Fluchs 2021) analysiert den Status Quo der Kreislaufwirtschaft in Deutschland und Europa und leitet Herausforderungen und Potenziale für die Transformation der Wirtschaft zu einer Circular Economy auf wirtschaftlicher sowie politischer Ebene ab. Das zweite Factsheet „Abfallhierarchie – Die Stufen der Kreislaufwirtschaft“ (Fluchs und Schleicher 2021) stellt eine Bestandsaufnahme von Zielen und Maßnahmen zur Abfallvermeidung und -verwertung für die Transformation zu einer zirkulären Wirtschaft dar. Da sich die strategischen Programme und rechtlichen Rahmenbedingungen im Rahmen der Circular Economy zum einen auf unterschiedlichen Ebenen (EU, national, NRW) befinden und sich andererseits in einem dynamischen Prozess weiterentwickeln, ist eine interaktive Übersicht auf der Webseite erstellt worden, die die zentralen Aktionspläne, Gesetze, Richtlinien und Verordnungen in strukturierten Steckbriefen vorstellt und einordnet. Die Recherchen und Arbeiten hierzu sind ebenso in das in der AG Circular Economy entstandene Diskussionspapier (IN4climate.NRW 2021b) eingeflossen, um auch dort die Grundlage für die politische Situation und den Status Quo als Ausgangslage zu liefern.

Der Übergangsprozess zu einer funktionierenden Circular Economy ist komplex. In einer Umstellung von einer Linearwirtschaft hin zu einer zirkulären Wirtschaftsweise sind nicht nur verschiedenste Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette aller Produkte und Materialien, sondern ebenso Interessensgruppen auf internationaler, nationaler und lokaler Ebene einzubinden. Dies stellt eine wesentliche Governance-Herausforderung dar.

Zur Umsetzung und Etablierung einer Circular Economy müssen technologische, administrative und gesellschaftliche Herausforderungen angegangen und Potenziale genutzt werden. Bisher separat agierende Stakeholder müssen sich zusammenschließen und gemeinsame Lösungen finden. Dieser Prozess muss zwingend von der Politik strukturiert und koordiniert werden, da es sich einerseits um komplexe Konstellationen handelt, die eine zielgerichtete Begleitung auf dem Weg zu einer ganzheitlichen Lösung benötigen und es andererseits oftmals kleinteilige Handlungsansätze sind, die eine politische Initiierung und Administration erfordern.

Essenzielle Maßnahmen und Forderungen auf dem Weg dorthin sind folgende:

- Es müssen rechtliche Rahmenbedingungen und bindende Richtlinien für alle Marktteilnehmer geschaffen und etabliert werden.
- Der Markt für Sekundärrohstoffe muss gestärkt werden, sodass eine Wettbewerbsfähigkeit zu Primärrohstoffen entsteht und eine tatsächliche Substitution stattfinden kann.
- Es muss in Technologien und Innovationen investiert werden, um Recyclingquoten zu erhöhen, Aufbereitungstechnologien zu verbessern, Produktionsprozesse anzupassen und Produkte kreislauffähig zu gestalten.
- Neue Geschäftsmodelle müssen entstehen und gefördert werden, was neue Kooperationen, Logistiksysteme und Wertschöpfungsnetzwerke bedingt.
- Es muss sichergestellt werden, dass Maßnahmen für eine Circular Economy anderen gesamtgesellschaftlichen Zielen, wie der Klimaneutralität oder der Bekämpfung der Armut und Ungleichheit nicht entgegenstehen.

Den größten Anteil an Deutschlands Gesamtabfallaufkommen machen Bauabfälle mit circa 55 Prozent aus. Die in Abbildung 5-4 dargestellten Siedlungsabfälle haben mit 12 Prozent im Jahr 2018 einen deutlich geringeren Anteil am Netto-Abfallaufkommen. Auffällig ist, dass die Abfallmenge der Siedlungsabfälle seit 2002 verhältnismäßig konstant geblieben ist und um einen Wert von circa 50 Millionen Tonnen schwankt (UBA, 2021a). Ähnlich wie in Deutschland sank auch das Abfallaufkommen in den EU-28 Ländern zwischen 2004 und 2012 um nur circa 1 Prozent (auf 2.514 Millionen Tonnen), was einer Pro-Kopf-Reduzierung von circa 3 Prozent auf fast 5 Tonnen pro Kopf entspricht (Eurostat, 2016). Deutschlands Anteil am Gesamtabfallaufkommen der Europäischen Union beträgt circa 15 Prozent.

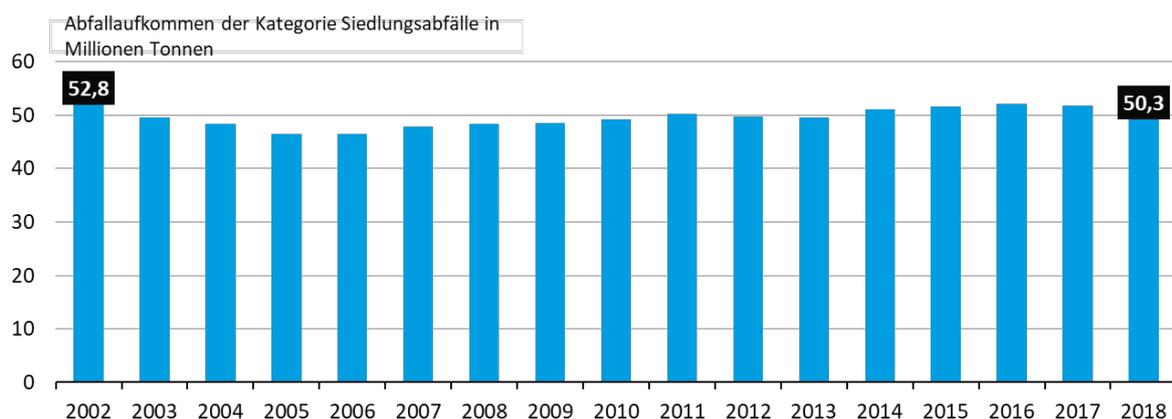


Abbildung 5-4: Abfallaufkommen der Kategorie Siedlungsabfälle (Statistisches Bundesamt, 2020b)

Die Entwicklung der Abfallmenge in Deutschland macht deutlich, dass das Ziel der Bundesregierung der Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch durchaus erreicht wurde, da die Wirtschaft im gleichen Zeitraum gewachsen ist, während das Abfallaufkommen stabil blieb. Der Fokus muss jedoch im Sinne einer Circular Economy auf der Reduzierung des Ressourcenverbrauchs

liegen, weshalb Maßnahmen getroffen werden müssen, das Abfallaufkommen deutlich und nachhaltig zu reduzieren.

Um der Frage nach der **Innovationstätigkeit** der nordrhein-westfälischen Grundstoffindustrie nachzugehen, wurde eine **Patentanalyse** im Hinblick auf klimafreundliche Patentanmeldungen durchgeführt (Küper et al. 2021). Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Identifikation klimafreundlicher Patente oder solcher, die innovativen technologischen Ansätzen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen dienen. Die Ergebnisse zeigen die Entwicklungen über die Zeit und branchenspezifische sowie regionale Besonderheiten, die Aufschluss darüber geben, ob und wie sich die Patentaktivitäten aufgrund der klimapolitisch induzierten Transformation bereits verändert haben. Darüber hinaus lassen sich anhand der Patente technologiespezifische Entwicklungstrend erkennen. Dies vervollständigt das Bild zu den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in NRW.

Dazu wurden zunächst diejenigen Unternehmen ausgewählt, deren Haupttätigkeit aus der Produktion von Grundstoffen wie

- nicht-medizinischen Chemikalien
- Polymeren und Verbundstoffen
- Eisen und Stahl
- NE-Metallen
- Glas, Beton, Keramik oder Zement- und Baustoffen besteht

und deren Geschäftsmodell nicht ausschließlich die weitere Verarbeitung/Transport/Vertrieb dieser Produkte ist.

Seit 2010 ist die Zahl der Patentanmeldungen dieser Unternehmen, die zudem als Klimaschutzpatente identifiziert werden konnten, angestiegen. Das gilt sowohl in absoluten als auch in relativen Zahlen, gemessen an allen Patentanmeldungen. Abbildung 5-5 zeigt, dass zuletzt knapp ein Fünftel aller Patentanmeldungen der Grundstoffindustrie einen eindeutigen Klimaschutz-Bezug haben.

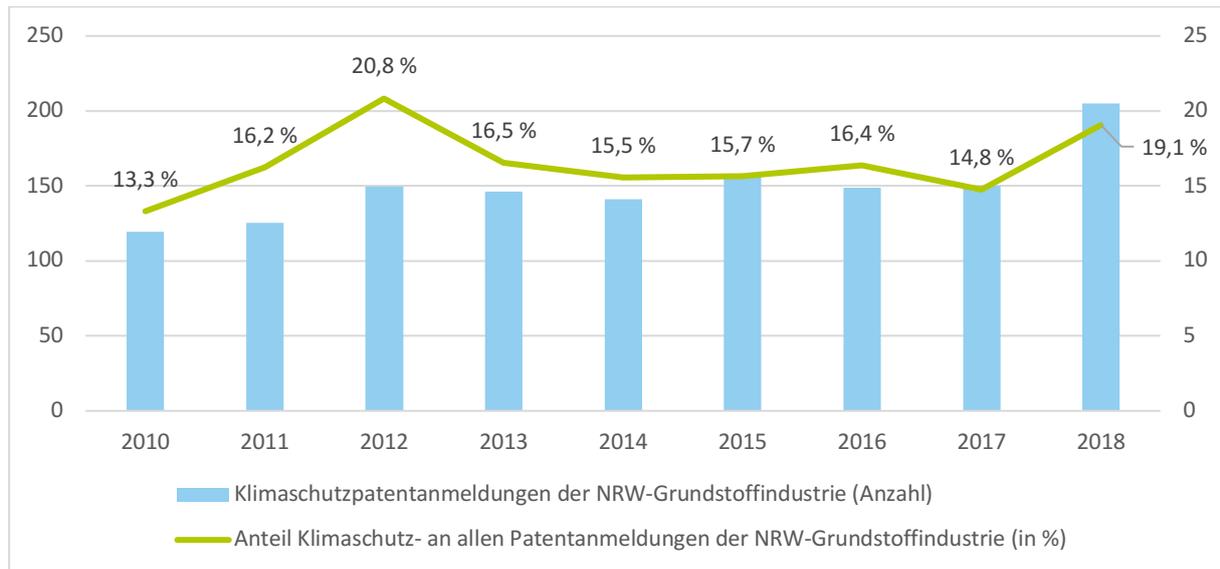


Abbildung 5-5: Klimaschutzpatentanmeldungen 2010-2018 (absolute und relative Entwicklung) (Küper et al. 2021)

Die als Klimaschutzpatente identifizierte Anmeldungen lassen sich auch nach den unterschiedlichen Technologien clustern. Die meisten Patente fallen in den Bereich Erneuerbare Energien, gefolgt vom Bereich Effizienz und Wärme (Abbildung 5-6)



Abbildung 5-6: Klimaschutzpatentanmeldungen nach Technologiebereichen (Küper et al. 2021)

Komplementär zur Patentanalyse wurde die Forschungslandschaft in NRW genauer betrachtet. Hierbei standen mit Blick auf die Industrietransformation sowohl Akteure und Politikinstrumente sowie Herausforderungen und Chancen im Vordergrund. Dabei wurde auch im Rahmen der Veranstaltung „Wissenschaft trifft Wirtschaft“ eine Umfrage durchgeführt, in welcher etwa 50 TeilnehmerInnen auch die Forschungsbedingungen in NRW bewerten konnten. Trotz einer relativ guten Bewertung wurden

verschiedene Themen benannt, die zukünftig angegangen werden sollten. Hierzu zählen u.a. die Reduktion des bürokratischen Aufwands und die interdisziplinäre Zusammenarbeit.

Auf Basis der Umfrageergebnisse wurde im zweiten Forschungsintervall ein umfassender Bericht zum Thema „Forschungslandschaft in NRW“ erstellt (Tholen et al. 2021a). Hierbei wurden die bei der Umfrage identifizierten Hemmnisse durch eine Literaturrecherche ausgearbeitet und zentrale Akteure im Bereich F&E identifiziert. Die folgende Abbildung zeigt die Akteurskonstellation im Bereich Forschung und Entwicklung.

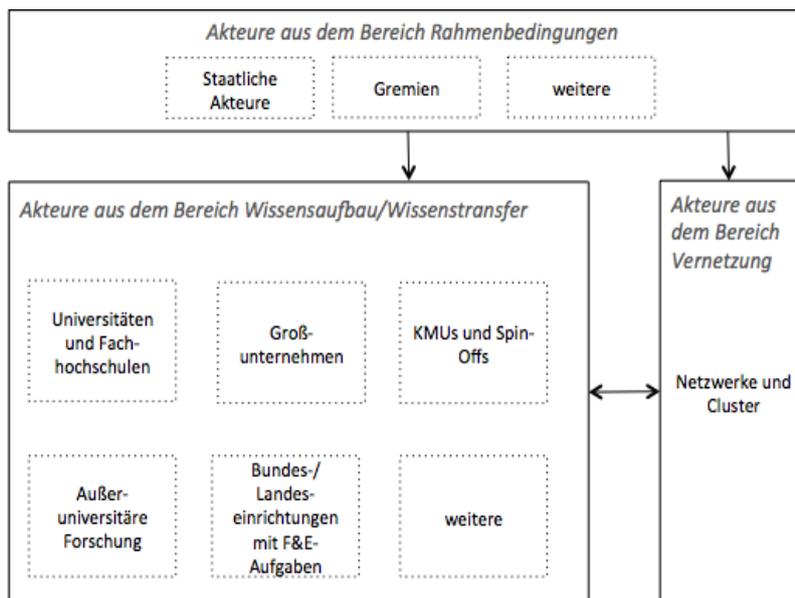


Abbildung 5-7: Akteurskonstellation im Bereich F&E

Darüber hinaus wurden F&E-Instrumente im Mehrebenensystem aufgelistet und Kooperationen zwischen unterschieden Akteuren dargestellt. Die folgende Übersicht zeigt die Mittel aus dem EU-Forschungsprogramm Horizon2020, die in vier Themenfeldern nach Deutschland und NRW geflossen sind.

Tabelle 5-2: Mittel aus den EU-Forschungsprogramm Horizon 2020

Themenfeld	H2020-Gesamt	Beitrag nach D	Beitrag nach NRW
Carbon Capture Engineering	213 Mio. Euro	24 Mio. Euro	9,5 Mio. Euro
Synthetic Fuels	44 Mio. Euro	16 Mio. Euro	1 Mio. Euro
Electrolysis	433 Mio. Euro	85 Mio. Euro	21 Mio. Euro
Hydrogen Energy	43 Mio. Euro	3,6 Mio. Euro	952.000 Euro

Dies verdeutlicht, dass die EU einen wichtigen Fördermittelgeber für NRW-Akteure darstellt. Anhand des Projektes „Carbon2Chem“ zeigt sich, dass die Förderung des Bundes eine herausragende Rolle für

Demonstrationsprojekte in NRW spielt. Aber auch die Landesregierung in NRW vergibt erhebliche Forschungsmittel für die Industrietransformation.

Die Untersuchung wurde anschließend durch leitfadengestützte Interviews mit fünf Expert*innen im Bereich der (außer-)universitären Forschung und der Netzwerkarbeit ergänzt. Hierbei wurden bestätigt, dass noch Schwachstellen bei der F&E-Arbeit in Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen bestehen. Die Interviews sowie die bereits erwähnte Umfrage ergaben, dass insbesondere Mittel zur Unterstützung von Demonstrations-/ Pilotvorhaben und Reallaboren und Mittel zur Überwindung des „Tal des Todes“ von besonderer Bedeutung für die Industrietransformation sind. Mit Blick auf die Landesregierung wurde von den Interviewpartner*innen gesagt, dass eine innovationsfreundliche Politik notwendig ist, die die F&E-Aktivitäten unterstützt. Als besonders relevant wurden „klare politische Strategien und Ziele“ und „finanzielle Förderung von F&E“ genannt. Die folgende Übersicht zeigt weitere Handlungsfelder, die von Teilnehmer*innen der Konferenz „Wissenschaft trifft Wirtschaft“ als relevant erachtet wurden (5: sehr relevant, 0: gar nicht relevant):

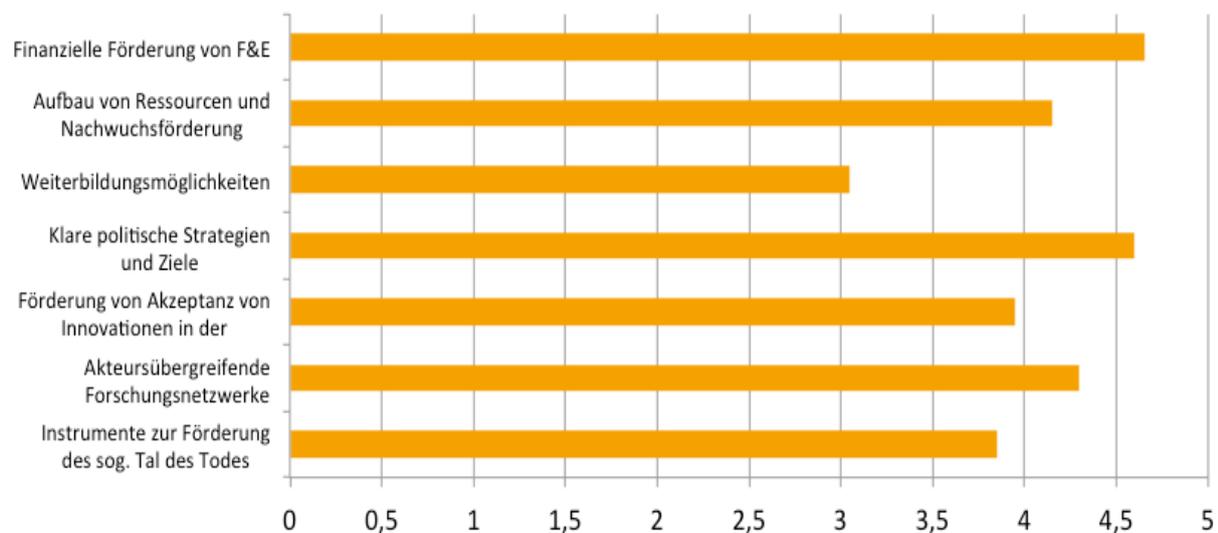


Abbildung 5-8: Relevanz der Forschungsbedingungen in NRW

Um auch die Perspektive der **Industrieforschung** zu berücksichtigen, wurde im 3. Forschungsintervall die Perspektive der F&E-Tätigkeiten in der Industrie näher betrachtet. Dabei wurde der Frage nachgegangen, wie sich die Forschungsaktivitäten in (außer-)universitären Forschungsabteilungen im Vergleich zu Forschung in Unternehmen unterscheiden, welche Chancen und Hemmnisse sich durch eine forschende Industrie ergeben und wie relevant Kooperationen sind.

Es zeigt sich, dass weit über 80 % der Großunternehmen in F&E investieren und insbesondere die Bereiche Pharma, Automobil, Maschinenbau, Chemie, DV-Geräte und Elektro zu den F&E-intensivsten

Industriebranchen in Deutschland zählen. Zentrale Unterschiede zwischen der Industrieforschung und der (außer-)universitären Forschung werden in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 5-3: Unterschiede zwischen Industrieforschung und (außer-)universitärer Forschung

	Industrieforschung	(Außer-)universitäre Forschung
Fokus	Zielorientierte und anwendungsorientierte Forschung, Produktorientiert, oft vertraulich	Grundlagenforschung
Ziele	Effizienzverbesserungen, Wettbewerbsvorteil, Pioniergewinne, Reputation, Prestige, Image	Neue Ideen entwickeln, Wissen erweitern
Zeitspanne	Häufig relativ kurze Bearbeitungszeit der Projekte	Häufiger langfristige Forschungsprojekte
Einflussfaktoren	Stark von markt-/firmenpolitischen Entscheidungen anhängig	Kolleg*innen, Forschungsgemeinschaft
Finanzierung	Mittel aus dem Unternehmen, Drittmittel	Grundfinanzierung (Universitäten) und Drittmittelprojekte
Geheimhaltungsgrad	Vertraulich, intern	Öffentlich zugänglich, Ergebnisse werden veröffentlicht

Aufbauend auf den im 2. Forschungsintervall erstellten Factsheets zur Kreislaufwirtschaft wurden im **3. Forschungsintervall** neue **Geschäftsmodellansätze** in ausgewählten Sektoren und **Technologiefeldern der Kreislaufwirtschaft** identifiziert und untersucht. Um eine Grundlage für die Analyse zu schaffen, ist ein Papier erstellt worden, welches zirkuläre Geschäftsmodelle als Möglichkeit kreislauforientiertes Wirtschaften in Unternehmen umzusetzen, beleuchtet (Fluchs et al. 2022). Das Papier stellt bestehende Konzepte zu zirkulären Geschäftsmodellen, deren Aufbau und die damit verbundenen Strategien der Unternehmen in einem kompakten Überblick vor und erweitert diese theoretischen Grundlagen um eine empirische Untersuchung. Das Ziel dieser Studie ist es, auf Basis der verfügbaren Literatur Strategien und Maßnahmen zu identifizieren, die aktuelle Geschäftsmodelle in zirkuläre Geschäftsmodelle umwandeln können. Die empirische Einordnung liefert hierzu einen Blick in die Unternehmenspraxis und beleuchtet inwiefern Unternehmen, die bereits kreislauforientierte Strategien implementieren, zirkuläre Strategien und/oder Geschäftsmodelle tatsächlich anstreben.

Eine inhaltlich anknüpfende Studie basiert auf empirischen Ergebnissen aus dem IW-Zukunftspanel (Neligan et al. 2023). Diese Studie stellt auf Basis einer aktuellen Unternehmensbefragung im IW-Zukunftspanel dar, welche Rolle Produkte/Dienstleistungen mit zirkulären Eigenschaften in den Unternehmen spielen, die (künftig) zur Kreislaufführung und damit zur Ressourcenschonung beitragen werden. Für das Geschäftsmodell grundsätzlich relevant ist, ob diese Produkte und Dienstleistungen auch rentabel sind, weshalb dieser Punkt in der Befragung fokussiert wird. Zudem werden die wesentlichen Motivationen und Ansätze der Unternehmen für eine Kreislaufwirtschaft erfasst, um

schließlich daraus abzuleiten, wie die Transformation zur Zirkularität weiter unterstützt und vorangetrieben werden kann. Wesentliche Fragestellungen sind:

- Was bieten die Unternehmen an, um die Kreislaufführung von Ressourcen zu ermöglichen / zu verbessern? Welche Unternehmen bieten kreislauforientierte Produkte und Dienstleistungen an?
- Wieviel Umsatz machen sie damit?
- Was ist der Enabler (Motivation)?
- Führen diese Adaptionen und Innovationen lediglich zu inkrementellen oder disruptiven Anpassungen im Geschäftsmodell der Unternehmen?

Im Themenbereich der Kreislaufwirtschaft wurden zudem die materiellen Stoffströme in Nordrhein-Westfalen in einem Report untersucht (Fluch und Schleicher 2022). Für eine nachhaltige Entwicklung ist die Schließung von Stoffkreisläufen unumgänglich, um eine zirkuläre und nachhaltigere Wirtschaft und Nutzung der natürlichen Ressourcen zu erreichen. Als Hebel zur Erreichung dieses Ziels ist die Verringerung des Materialaustauschs, das heißt der Gewinnung von Primärrohstoffen oder der Freisetzung von Abfällen und Emissionen, zwischen Mensch und Umwelt. Aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen sind Analysen der Stoffströme notwendig, um schädliche Stoffe und Materialien in einem systemweiten Ansatz zu identifizieren. Das Papier zielt darauf ab politische Rahmenbedingungen und insbesondere das darin enthaltene Verständnis des Konzepts der Kreislaufwirtschaft mit ihrer zugrundeliegenden Rohstoffwirklichkeit für Nordrhein-Westfalen abzugleichen, um die Bedeutung von physischen Materialflüssen innerhalb eines Systems und deren Bedeutung für effektive kreislaufwirtschaftsfördernde Maßnahmen herauszuarbeiten.

Ein neues Schwerpunktthema im 3. Forschungsintervall war das Thema **Green Jobs und Fachkräftebedarfe für die grüne Transformation**.

Im Zuge der klimapolitischen Herausforderungen ist der Arbeitsmarkt einem erheblichen Transformationsdruck ausgesetzt. Um die ökologische Transformation der Wirtschaft zu bewältigen, bedarf es in den kommenden Jahren vieler qualifizierter Fachkräfte. Zur Umsetzung der Klimaziele ist eine Vervielfachung des Ausbaufortschritts bei den erneuerbaren Energien in Deutschland notwendig, und auch der Anteil klimaneutraler Technologien in Verbrauchssektoren wie Industrie, Verkehr und Gebäude muss stärker wachsen als bisher. Infolge des demografischen Wandels nimmt gleichzeitig die Zahl der Erwerbspersonen ab.

Während bestimmte Fähigkeiten und Kompetenzen auf dem Weg zu einer klimaneutralen Wertschöpfung an Bedeutung gewinnen (Green Jobs), gibt es andere, die absehbar an Bedeutung verlieren. Damit Politik, Unternehmen und Arbeitnehmer diese Entwicklung frühzeitig antizipieren können, ist das Wissen über den Wandel beruflicher Anforderungen vor dem Hintergrund der Dekarbonisierung von hoher Relevanz. Ob zur Steuerung der Arbeits- und Bildungspolitik, zur Planung von Unternehmensstrategien oder für die Perspektive von Beschäftigten in betroffenen Branchen: Die

Kenntnis über künftige Fachkräftebedarfe hilft, Fachkräfteengpässe und sozialen Spannungen vorzubeugen und ist zentral für das Gelingen der Transformation.

Die Studie „Identifikation von Schlüsselberufen der Transformation auf Basis der EU-Taxonomie“ (Wendland 2022) setzt sich grundlegend mit den Folgen der Dekarbonisierung für die Beschäftigungsverhältnisse im Verarbeitenden Gewerbe auseinander. Ziel ist die Identifikation von Berufsgruppen, die vom wirtschaftlichen Greening in den Bereichen „Anlagenbau, Speicher und Ausrüstungen“ einerseits und „Grund- und Werkstoffe“ andererseits besonders betroffen sind. Ausgangspunkt der Analyse ist das Rahmenwerk der EU-Taxonomie, das sich an wirtschaftliche Aktivitäten von Schlüsselbranchen der Dekarbonisierung richtet und damit EU-weit rund 80% der direkten THG-Emissionen erfasst (Europäische Kommission, 2021). Angesichts des hohen Einsparungspotential sind Taxonomie-relevante Branchen und Produktionsfaktoren gegenüber der Dekarbonisierung stark exponiert. Neben der Ausweitung von Investitionen in Taxonomie-relevante Leitmärkte der Energiewende ist von höherem Bedarf nach Beschäftigten und Fachkräften in diesen Bereichen auszugehen. Zur Auswertung der Beschäftigungssituation nutzt die Analyse Daten von Destatis und der Bundesagentur für Arbeit.

Im Ergebnis wurde in der Studie eine Expositionsmatrix abgeleitet, die aufzeigt, welche Berufe bei der zukünftigen Dekarbonisierung im Verarbeitenden Gewerbe (Sektoren C10-33) im Mittelpunkt stehen.

Taxonomie-Aktivität*	...	Herst. v. Energieeffizienzgeräten für Gebäude	Herst. v. Energieeffizienzgeräten für Gebäude	Herst. v. Energieeffizienzgeräten für Gebäude	Herst. v. Energieeffizienzgeräten für Gebäude	Herst. v. Zement	Herst. v. Energieeffizienzgeräten für Gebäude	Keine	Keine	Herst. v. Eisen und Stahl	Herst. v. Eisen und Stahl	Herst. v. Eisen und Stahl	Herst. v. Aluminium	Herst. v. Eisen und Stahl	...
Kategorie:	...	Enabling	Enabling	Enabling	Enabling	Transition	Enabling	...	...	Transition	Transition	Transition	Transition	Transition	...
Wirtschaftszweig 3-Steller (WZ2008)	...	231 Herst. v. Glaswaren	232 Herst. v. Feuerfesten keramischen Werkstoffen und Waren	233 Herst. v. Keramischen Baumaterialien	234 Herst. v. Sontigen Porzellan- und keramischen Erzeugnissen	235 Herst. v. Zement, Kalk und gebranntem Gips	236 Herst. v. Erzeugnissen aus Beton, Zement und Gips	237 Be- und Verarbeitung von Naturwerksteinen und Natursteinen a. n. g.	239 Herstellung von Schleifkörpern und Schleifmitteln ...	241 Erzeugung von Roh Eisen, Stahl und Ferrolegierungen	242 Herst. v. Stahlrohren, Rohrform- und Rohrversch. luss und ...	243 Sonstige erste Bearbeitung von Eisen und Stahl	244 Erzeugung und erste Bearbeitung von NE-Metallen	245 Gießereien	...
Berufsgruppe 3-Steller (KLD82010)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
241 Metallherzeugung	...	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	18%	7%	20%	13%	34%	...
242 Metallbearbeitung	...	2%	1%	0%	3%	0%	2%	1%	5%	13%	21%	17%	17%	14%	...
243 Metalloberflächenbehandlung	...	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	1%	4%	2%	1%	...
244 Metallbau und Schweißtechnik	...	1%	4%	2%	0%	1%	2%	1%	1%	4%	12%	5%	3%	2%	...
245 Feinwerk- und Werkzeugtechnik	...	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	2%	2%	3%	...
251 Maschinenbau- und Betriebstechnik	...	8%	11%	8%	6%	13%	7%	2%	19%	15%	14%	13%	16%	10%	...
252 Fahrzeug-Luft-Raumfahrt-, Schiffbautechn.	...	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	...
261 Mechatronik und Automatisierungstechnik	...	1%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	1%	1%	...
262 Energietechnik	...	2%	2%	3%	1%	7%	2%	0%	2%	5%	2%	2%	2%	2%	...
263 Elektrotechnik	...	1%	0%	1%	0%	1%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	1%	0%	...
271 Technische Forschung und Entwicklung	...	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	1%	0%	...
272 Techn. Zeichnen, Konstruktion, Modellbau	...	1%	2%	0%	1%	0%	2%	0%	1%	1%	2%	1%	1%	2%	...
273 Technische Produktionsplanung,-steuerung	...	8%	6%	4%	7%	5%	3%	1%	7%	7%	6%	6%	8%	9%	...
281 Textiltechnik und -produktion	...	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	...
282 Textilverarbeitung	...	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	...
283 Leder-, Pelzherstellung u. -verarbeitung	...	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	...
291 Getränkeherstellung	...	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	...
292 Lebensmittel- u. Genussmittelherstellung	...	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	...
293 Speisenzubereitung	...	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	...

Abbildung 5-9: Expositionsmatrix: EU-Taxonomie, Branchen und Berufe (Wendland 2022)

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Produktionsberufe für die Wertschöpfung in Taxonomie-relevanten Branchen von Bedeutung sind. Dies zeigt sich angesichts der hohen Beschäftigungsanteile in Taxonomie-relevanten Branchen im gesamtwirtschaftlichen Vergleich. Zudem zeigt sich eine hohe

Konzentration bestimmter Produktionsberufe in einigen Schlüsselbranchen, was auf potenzielle Wertschöpfungsabhängigkeiten zwischen Wirtschaftszweigen und Berufen hindeutet. Identifizierten Schlüsselberufen kommt bei der wirtschaftlichen Neuausrichtung eine besondere Rolle zu, die je nach Qualität der Veränderungen neue Chancen oder Risiken bedeutet. Die zur Veranschaulichung erstellte Expositionsmatrix bietet verschiedene Anknüpfungspunkte zur weiteren Analyse der gesamtwirtschaftlichen Herausforderungen der Dekarbonisierung.

Ziel einer weiteren Studie, „Beschäftigte im Bereich erneuerbare Energien: Renaissance der beruflichen Ausbildung?“ (Monsef und Wendland 2022), war es, die Tätigkeitsprofile von Beschäftigten in zentralen Bereichen der Energiewende zu untersuchen. Die Studie nutzt Ergebnisse der Erwerbstätigenbefragung des Bundesinstituts für Berufsbildung (BIBB) und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) aus dem Jahr 2018. Dabei zeigt sich:

- (1) Der Anteil von EE-Erwerbstätigen in Produktionsberufen, wie beispielsweise fertigungstechnischen Berufen, ist mit 73 Prozent fast drei Mal so hoch wie im Durchschnitt aller Erwerbstätigen.
- (2) Technische Fachkenntnisse sind unter EE-Erwerbstätigen in 71 Prozent (in MINT-typischen Bereichen in 46 Prozent) der Fälle erforderlich, mehr als doppelt so häufig wie bei anderen Tätigkeiten.
- (3) EE-Erwerbstätige arbeiten in einem Arbeitsumfeld, das in besonderem Maß von technologischen Neuerungen, wie dem Einsatz neuer Maschinen, Anlagen oder Produkten, gekennzeichnet ist.
- (4) Sowohl die Grundausbildung als auch Möglichkeiten der beruflichen Weiterentwicklung, zum Beispiel durch Lehrgänge und Kurse, sind für die Tätigkeit vieler EE-Erwerbstätigen besonders wichtig.

Diese Befunde führen zu zwei wesentlichen Erkenntnissen: Zunächst zeigt sich bei EE-Erwerbstätigen eine hohe Überschneidung mit Berufsprofilen des in Deutschland stark verankerten dualen Ausbildungs-systems. Zudem sticht hervor, dass das Arbeitsumfeld von EE-Erwerbstätigen im Vergleich zu anderen Erwerbstätigen in überdurchschnittlichen Maß von Wandel und einem allgemein hohen Anforderungsniveau geprägt ist.

5.4 Gesellschaft und Strukturwandel

In **Forschungsintervall 1** stand die Analyse von Strukturwandelprozessen und möglichen Ableitungen für die Industrietransformation in NRW im Vordergrund.

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 (Maier et al. 2020).

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 5-10: 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 einstehen kann.

Aus diesen Ergebnissen ließen sich eine Vielzahl offener Forschungsfragen ableiten, die mit den in IN4climate.NRW beteiligten Akteuren diskutiert wurden.

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 5-11: Auswahl offener Forschungsfragen für A 4.5 im 2. Forschungsintervall

In FI 2 wurden die Erkenntnisse des FI 1 auf das Governance-Format IN4climate.NRW und dessen Rolle bei der Begleitung des Transformationsprozesses der Grundstoffindustrie in NRW zur Klimaneutralität übertragen. Als Grundlage der empirischen Betrachtung wurden 25 Experteninterviews mit TeilnehmerInnen von IN4Climate.NRW aus Industrie, Wissenschaft und Politik durchgeführt.

IN4climate.NRW als „Intermediär“: Die empirische Betrachtung der Funktionen von IN4climate.NRW bei der Transformation zur Klimaneutralität der Industrie in Nordrhein-Westfalen wurde im Berichtszeitraum fertiggestellt und veröffentlicht (Fluchs et al. 2021). Der Fokus der Analyse lag auf den Ausprägungsformen der intermediären Wirkungsweise von IN4climate.NRW und deren Bedeutung für akteursübergreifende Innovations-, Lern- und Kooperationsprozesse im Rahmen der

Initiative. Grundlage der Bewertung waren semi-strukturierte qualitative Einzelinterviews sowie quantitative Selbsteinschätzungen, die mit 25 beteiligten Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik von IN4climate.NRW durchgeführt wurden. Die Ergebnisse wurden in der Innovationsteamsitzung präsentiert und diskutiert.

Aufbauend auf den bestehenden Veröffentlichungen zur Konzeptionalisierung des Phänomens **“Renewables Pull”** konnte zudem eine wissenschaftliche Veröffentlichung zu diesem Thema erstellt werden (Samadi et al. 2021b; Samadi et al. 2023). Darin werden die Funktionsweise aber auch die Auslöser möglicher industrieller Abwanderung aufgrund fehlender Verfügbarkeit oder unerschwinglicher Preise einer klimaneutralen Energieversorgung diskutiert. Zu diesem Zweck wurde ein Vergleich von Produktionskosten klimaneutraler Prozesse an unterschiedlichen Standorten durchgeführt. Zudem wurden die Ergebnisse einer Unternehmensbefragung genutzt, um die Bedeutung der Energieversorgung und der damit verbundenen Kosten als auch weiterer Standortfaktoren für die energieintensive Industrie einzuordnen.

Die Rolle von Kommunen bei der Industrietransformation wurde im 3. Forschungsintervall intensiv erforscht (Tholen et al. 2022). Vor dem Hintergrund der Dringlichkeit der Herausforderungen zum Schutz des Klimas ist nicht nur die EU und die nationale Ebene relevant, sondern auch kommunale Akteure und Aktivitäten. Auch wenn die Handlungsmöglichkeiten zur Förderung der Industrietransformation in der Kommune zunächst gering erscheint und der Fokus bei den kommunalen Aktivitäten in Bereichen gelegt wird, wo direkte Einflussmöglichkeiten vorhanden sind (wie öffentliche Gebäude, Verkehr), hat die Kommune eine wichtige Rolle zur Unterstützung von Klimaschutz in der Industrie. Diese Rollen, die auch in der folgenden Abbildung gezeigt werden, wurden im Bericht näher untersucht.



Abbildung 5-12: Die Rolle der Kommune bei der Industrietransformation (Tholen et al. 2022)

Eine theoretische Annäherung wurde ergänzt durch Fallstudien in den Regionen Erwitte-Geseke, Leverkusen und Duisburg. Die Städte zeichnen sich durch unterschiedliche Industriebranchen (Chemie, Zement, Stahl), Standorte und Einwohnerzahlen aus, sodass mit den Fallstudien ein differenziertes Bild der Einflussmöglichkeiten einer Kommune gezeichnet werden konnte. Die Analyse wurde ergänzt durch vier Experteninterviews mit Klimaschutzakteuren aus der jeweiligen Region. Durch die Interviews wurde bestätigt, dass die Handlungsmöglichkeiten zur Förderung der Industrietransformation begrenzt sind und Kommunen ihre Rolle insbesondere bei der Vernetzung von Akteuren, beim Anstoßen von Projekten und bei der Energieversorgung sehen.

In einer weiteren Veröffentlichung „**Einflussfaktoren der dezentralen Energiewende**“ (Beznoska et al. 2022) wurde im 3. Forschungsintervall untersucht, inwieweit kommunale Faktoren den dezentralen Ausbau der erneuerbaren Energien beeinflussen. Als Datengrundlage werden die Städte und Gemeinden in NRW zwischen 2010 und 2020 herangezogen. Beleuchtet werden die parteipolitische Orientierung der Verwaltungsspitze, die Finanzsituation und die Aktivität der Bauwirtschaft in der Stadt oder Gemeinde. Die Ergebnisse zeigen, dass Städte und Gemeinden, die bei der Kommunalwahl 2009/10 einen linken Bürgermeister wählten, die erneuerbaren Energien weniger stark ausbauten als Städte und Gemeinden mit konservativen Bürgermeistern. Wurde bei der Kommunalwahl 2014/15 ein linker Bürgermeister durch einen konservativen ersetzt, reduzierte sich der Ausbau erneuerbarer Energien weiter. Finanzielle Schwierigkeiten im öffentlichen Haushalt zu Beginn der Periode gingen mit einem schwachen Ausbau erneuerbarer Energien einher, während investitionsstarke Kommunen den Ausbau signifikant fördern konnten. Die Ergebnisse liefern Erkenntnisse über den Einflussgrad kommunaler Entwicklungen auf die Energiewende und unterstreichen die Notwendigkeit, nationale Ziele und dezentrale Anstrengungen zur Umsetzung der Klimaziele in Einklang zu bringen.



Abbildung 5-13: Eckpunkte zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren (IN4climate.NRW 2022a)

5.5 Beschleunigung von Genehmigungsverfahren

Unter der wissenschaftlichen Koordinierung der AG Genehmigungsverfahren von Seiten des Fraunhofer UMSICHT und des IW Köln ist in der AG Genehmigungsverfahren bei IN4climate.NRW ein **Eckpunktepapier** zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren für die Industrietransformation entstanden („9 Eckpunkte für eine Beschleunigung von Genehmigungsverfahren in der energieintensiven Grundstoffindustrie“, IN4climate.NRW 2022a). Das Eckpunktepapier skizziert mögliche Ansätze für Maßnahmen zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren in der Grundstoffindustrie (ohne, dass dadurch formal- oder materialrechtliche Anforderungen des Genehmigungsrechts aufgeweicht werden). Die Grundstoffindustrie in Deutschland steht einem gewaltigen Investitions- und Modernisierungsbedarf gegenüber, um Produktion und Prozesse mittelfristig klimapolitisch kompatibel auszurichten. Um die erforderliche Neuausrichtung von Maschinen und Anlagen umzusetzen, müssen genehmigungsrechtliche Entscheidungen künftig zügiger getroffen werden. Das Papier setzt Impulse, welche Bausteine einen wichtigen Beitrag leisten können, um das Koalitionsziel einer Halbierung der Verfahrenszeiten künftig zu erreichen.

5.6 Literaturverzeichnis inklusive Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW

In diesem Abschnitt sind alle Veröffentlichungen aus dem Themenfeld 4 (Rahmenbedingungen) von SCI4climate.NRW aufgelistet (blaue Schriftfarbe), zusammen mit weiteren Literaturquellen, die im Text zitiert sind (Standardschriftfarbe). Von SCI4climate.NRW herausgegebene Berichte sind durch ein vorangestelltes „[SCI4climate.NRW]“ gekennzeichnet, sie werden hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit unter Nennung der Autor*innen aufgelistet und auch entsprechend zitiert. Eine

Gesamtübersicht aller Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW findet sich in Abschnitt 1.4. Alle SCI4climate.NRW-Berichte sowie die meisten weiteren im Rahmen von SCI4climate.NRW entstandenen Veröffentlichungen sind auf der Webseite von NRW.Energy4climat/IN4climate.NRW verfügbar (<https://www.energy4climate.nrw/industrie-produktion/in4climatenrw/ergebnisse-des-thinktanks>).

- [SCI4climate.NRW] Adisorn, T., Fischer, A., Kiyar, D., Kube, R., Küper, M., Leipprand, A., Schaefer, T. & Tholen, L. (2021). Wasserstoffwirtschaft: den Einstieg schaffen, Bestehende Herausforderungen und Lösungsansätze. SCI4climate.NRW.
- Beznoska, M., Kauder, B. & Wendland, F. A. (2022). Ausbau der erneuerbaren Energien in Kommunen: Einflussfaktoren der dezentralen Energiewende (IW-Trends Nr. 4/22). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Egenolf-Jonkmanns, B., Glasner, C., Seifert, U., Küper, M., Schaefer, T., Merten, F., Scholz, A. & Taubitz, A. (2021). Wasserstoffimporte, Bewertung der Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030. SCI4climate.NRW.
- Europäische Kommission (2021). Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088.
- Eurostat (2016): Waste statistics. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics.
- Fischer, A. & Küper, M. (2021). Green Public Procurement: Potenziale einer nachhaltigen Beschaffung - Emissionsvermeidungspotenziale einer nachhaltigen öffentlichen Beschaffung am Beispiel klimafreundlicher Baumaterialien auf Basis von grünem Wasserstoff (IW-Policy Paper Nr. 23/21; Aktuelle politische Debattenbeiträge). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Fluchs, S. (2021). Fact Sheet: Einführung in die Circular Economy. Teil 1 der Fact Sheet-Reihe zur Kreislaufwirtschaft. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Fluchs, S. & Schleicher, C. (2021). Fact Sheet: Abfallhierarchie – Die Stufen der Kreislaufwirtschaft. Teil 2 der Fact Sheet-Reihe zur Kreislaufwirtschaft. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Fluchs, S., Wendland, F. A. & Espert, V. (2021). IN4climate.NRW als „Intermediär“, Eine empirische Betrachtung der Funktionen von IN4climate.NRW bei der Transformation zur Klimaneutralität der Industrie in Nordrhein-Westfalen. SCI4climate.NRW.
- Fluchs, S., Neligan, A., Schleicher, C. & Schmitz, E. (2022) Zirkuläre Geschäftsmodelle. Wie zirkulär sind Unternehmen? (IW-Report Nr. 27/22). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Fluchs, S. & Schleicher, C. (2022). Der materielle Stoffwechsel Nordrhein-Westfalens. Materialflüsse und ihre Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft (IW-Report, Nr. 68/22). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Friedrich, P. & Wendland, F. A. (2021). Ökologisch nachhaltig oder nicht? Die Einführung der EU Taxonomy for Sustainable Activities, Ein verbindliches Klassifikationssystem nachhaltiger Wirtschaftsaktivitäten in der EU (IW-Policy Paper Nr. 14/21; Aktuelle politische Debattenbeiträge). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- IN4climate.NRW. (2021b). Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy.
- IN4climate.NRW. (2022a). 9 Eckpunkte zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren in der energieintensiven Grundstoffindustrie. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Genehmigungsverfahren.

- Kube, R. & Wendland, F. A. (2021). Wie die EU die 2030-Klimaziele in den Sektoren Straßenverkehr und Gebäudewärme erreichen kann, Optionen einer konsistenten EU-weiten Regulierung im Verkehr und Gebäudesektor (IW-Policy Paper Nr. 13/21; Aktuelle politische Debattenbeiträge). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Küper, M. (2020). Fact Sheet: Grüner Wasserstoff, Bestandsaufnahme regulatorischer und infrastruktureller Rahmenbedingungen für die industrielle Transformation in Nordrhein-Westfalen. SCI4climate.NRW.
- Küper, M., Koppel, O. & Kohlisch, E. (2021). Grüne Innovationen der Grundstoffindustrie in NRW - Eine Analyse der Patentanmeldungen aus den Jahren 2010 bis 2018 unter Berücksichtigung von branchen- und technologiespezifischen Schwerpunkten (IW-Report Nr. 40/21; Wirtschaftliche Untersuchungen, Berichte und Sachverhalte) Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Küper, M. (2022). „Grüner Wasserstoff: Wie realistisch sind die Importpläne der Bundesregierung bis 2030? (Gastbeitrag) Stiftung Energie & Klimaschutz. Online verfügbar unter: <https://www.energie-klimaschutz.de/gruener-wasserstoff-wie-realistisch-sind-die-importplaene-der-bundesregierung-bis-2030/> [18.04.2023].
- [SCI4climate.NRW] Maier, S., Espert, V. & Theurich, S. (2020). Einflussfaktoren industrieller Strukturwandelprozesse. SCI4climate.NRW.
- [SCI4climate.NRW] Maier, S. & Küper, M. (2020). (Neue) Geschäftsmodelle für eine klimafreundliche Industrie - Herausforderungen und Beispiele aus der Unternehmenspraxis. SCI4climate.NRW.
- Material Economics (2019). Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.
- McKinsey (2008). Potenziale der öffentlichen Beschaffung für ökologische Industriepolitik und Klimaschutz, Studie von McKinsey & Company Inc., im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Monsef, R. & Wendland, F. A. (2022). Beschäftigte im Bereich erneuerbare Energien. Renaissance der beruflichen Ausbildung? Renaissance von Ausbildungsberufen infolge der Energiewende? (IW-Report, Nr. 57/22). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Neligan, A., Lichtenthäler, S., Schmitz, E. (2023) Produkte und Dienste für eine zirkuläre Wirtschaft. Ergebnisse aus dem IW-Zukunftspanel. (IW-Report Nr. 16/23). Institut der deutschen Wirtschaft; SCI4climate.NRW.
- Neuhoff, K., Stede, J., Zipperer, V., Haußner, M. & Ismer, R. (2016). Ergänzung des Emissionshandels: Anreize für einen klima- freundlicheren Verbrauch emissionsintensiver Grundstoffe, in DIW Wochenbericht Nr. 27. Berlin: DIW
- Samadi, S.; Fischer, A.; Lechtenböhrer, S. (2023): The Renewables Pull effect: How regional differences in renewable energy costs may influence future locations of industrial production, *Energy Research & Social Science* (im Review-Verfahren, Stand: April 2023).
- [SCI4climate.NRW] Samadi, S., Lechtenböhrer, S., Viebahn, P., & Fischer, A. (2021b). Konzeptualisierung des möglichen Renewables-Pull-Phänomens – Definition, Wirkmechanismen und Abgrenzung zu Carbon Leakage. SCI4climate.NRW.
- Statistisches Bundesamt (2020b): Abfallbilanz - 2018. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.html>.
- [SCI4climate.NRW] Tholen, L., Adisorn, T., & Kiyar, D. (2021a). Forschungslandschaft in NRW, Forschung und Innovation für die Industrietransformation. Wuppertal.

- Tholen, L., Leipprand, A., Kiyar, D., Maier, S., Küper, M., Adisorn, T., & Fischer, A. (2021b). The Green Hydrogen Puzzle: Towards a German Policy Framework for Industry. MDPI, 13(22). <https://doi.org/10.3390/su132212626>
- [SCI4climate.NRW] Tholen, L., Kiyar, D., Espert, V., & Adisorn, T. (2022). Die Industrietransformation als kommunale Aufgabe. Handlungsmöglichkeiten, Herausforderungen und Perspektiven. Ein Ergebnis des Themenfeld 4 – Rahmenbedingungen des Forschungsprojekts SCI4climate.NRW. Wuppertal Institut.
- UBA (2021a): Daten zur Umwelt. Umweltmonitor 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/daten-zur-umwelt_umweltmonitor-2020_webfassung_bf.pdf.
- Wendland, F. A. (2022). Identifikation von Schlüsselberufen der Transformation auf Basis der EU-Taxonomie (IW-Report, Nr. 22/22). Institut der deutschen Wirtschaft, SCI4climate.NRW.
- Wendland, F. A. & Seifert, U. (2022). 9 Eckpunkte zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren in der energieintensiven Grundstoffindustrie, Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Genehmigungsverfahren. IN4climate.NRW (Hrsg.).
- Wyns, T., Khandekar, G., Axelson, M., Sartor, O. & Neuhoff, K. (2019), Industrial Transformation 2050 – Towards an Industrial Strategy for a Climate Neutral Europe, IES. Available at ies.be.

6 Veranstaltungen und Vernetzung

6.1 Konferenzreihe „Wissenschaft trifft Wirtschaft“

Die SCI4climate.NRW-Statuskonferenzen am Ende jedes Forschungsintervalls dienten dazu, die zentralen Ergebnisse der vier Themenfelder der interessierten Fachöffentlichkeit vorzustellen, und mit den IN4climate.NRW-Partnerunternehmen den Forschungsplan für das jeweils nächste Forschungsintervall zu diskutieren. Mit den erfolgreichen SCI4climate.NRW-Statuskonferenzen wurde die erfolgreiche Konferenzreihe „Wissenschaft trifft Wirtschaft“ etabliert.

Aufgrund der Corona-Pandemie konnte die für Mai 2020 geplante erste Konferenz nicht wie beabsichtigt im KOMED im Mediapark in Köln stattfinden, sondern musste als Online-Veranstaltung durchgeführt werden (13.5.2020 und 4.12.2020). Auch die zweite Konferenz im Oktober 2021 war aufgrund der Beschränkungen nur im Online-Format möglich. Erst die dritte „Wissenschaft trifft Wirtschaft“-Konferenz im September 2022 konnte im thyssenkrupp-Hauptquartier in Essen in Präsenz stattfinden.

6.1.1 Wissenschaft trifft Wirtschaft I, 2020: Forschung für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Grundstoffindustrie

Die erste Statuskonferenz war ursprünglich als eine zweitägige Veranstaltung am 12. und 13. Mai 2020 geplant. Der erste Tag sah eine öffentliche Konferenz vor, bei der es darum ging, die Ergebnisse des Forschungsprojektes mit der interessierten Fachöffentlichkeit zu diskutieren und sich zudem mit anderen Forschenden zu Themen der Industrietransformation in NRW zu vernetzen. Der zweite Tag

war als interner Austausch zwischen Partnern und Mitwirkenden von IN4climate.NRW und SCI4climate.NRW geplant, bei dem es darum ging, den Forschungsplan zu diskutieren und das kommende Forschungsintervall aktiv mitzugestalten. Pandemiebedingt wurde die öffentliche Konferenz (Tag 1) zunächst auf unbestimmte Zeit verschoben und konnte schließlich am 4.12.2020 online nachgeholt werden; die Veranstaltung am 13. Mai 2020 (Tag 2) wurde online durchgeführt:



EINLADUNG

an die Partner und Mitwirkenden von IN4climate.NRW und
SCI4climate.NRW

Forschung für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Grundstoffindustrie:

Diskussion des Forschungsplans

13. Mai 2020, 09:00 - 14:45 Uhr

ONLINE WORKSHOP

An der Veranstaltung am 13.5.2020 nahmen über 60 Teilnehmer*innen teil. In einem plenaren Teil am Vormittag wurden das Projekt und der Entwurf des Forschungsplans vorgestellt. Am Nachmittag fanden themenfeldspezifische Fachforen unter Beteiligung der Unternehmen aus IN4climate.NRW zur Diskussion der Inhalte des 2. Forschungsintervalls statt.

Am 4.12.2020 fand mit rund 130 Teilnehmer*innen die öffentliche Konferenz „Wissenschaft trifft Wirtschaft: Forschung für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Grundstoffindustrie“ statt.

EINLADUNG

**Wissenschaft trifft Wirtschaft:
Forschung für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Grundstoffindustrie:**

04. Dezember 2020, 09:00 - 15:00 Uhr

Digitale Veranstaltung

SCI4climate.NRW, das wissenschaftliche Kompetenzzentrum von IN4climate.NRW lädt dazu ein, aktuelle Forschungsfragen zur klimaneutralen Industrie gemeinsam mit Forschenden, Industrievertreterinnen und -vertretern und politischen Entscheidungsträgern im Rahmen einer digitalen Veranstaltung zu diskutieren.

Die Veranstaltung findet statt

am 04. Dezember 2020, 09:00 - 15:00 Uhr

als Videokonferenz

Im Vorfeld der Konferenz gab es zum einen ein Screening der NRW-Hochschullandschaft und zum anderen einen Call for Presentations and Poster, der sich an Student*innen richtete: Neben der Präsentation der Forschungsergebnisse stand bei dieser Konferenz die Vernetzung mit der vielfältigen NRW-Wissenschaftslandschaft, mit Industrie, Hochschulen, Verbänden, Ministerien und Behörden im Mittelpunkt.

Es gab es drei parallele Foren, in denen Ergebnisse des Projektes sowie externe Beiträge, die durch den Call for Presentations and Poster ausgewählt wurden, vorgestellt wurden. In den drei Foren gab es zudem anregende Diskussionen mit den Teilnehmer*innen.

- Session 1: Politische Rahmenbedingungen & Strukturwandel, Beispiel Wasserstoff (Prof. Dr. Boris Braun, Universität zu Köln/ Dr. Thilo Schaefer, Institut der deutschen Wirtschaft)
- Session 2: Ressourceneffizienz und CE bei wichtigen Grundstoffen (Prof. Dr. Grit Walther, RWTH Aachen/ Prof. Dr. André Bardow, ETH Zürich)
- Session 3: THG-Minderung in industriellen Prozessen (Prof. Dr. Valentin Bertsch, Ruhr-Universität Bochum/ Prof. Dr. Görgo Deerberg, Fraunhofer UMSICHT)

In einer Paneldiskussion gingen die Diskutant*innen der Frage nach, wie sich Wissenschaft und Wirtschaft bei der anstehenden Herausforderung gegenseitig unterstützen können. Am Panel nahmen neben den beiden Professoren Braun und Bertsch, die bereits die Foren geleitet hatten, Professor Andreas Löschel aus Münster für die Wissenschaft sowie Sabine Augustin von Open Grid Europe und Dr. Hans-Jörn Weddige von thyssenkrupp für die Wirtschaft teil.

Michael Theben vom MWIDE behandelte abschließend in einem Ausblick die Rolle des Landes NRW in der industriellen Transformation zur klimaneutralen Industrie.

Die Konferenz schloss unmittelbar an den ersten Energieforschungskongress des Ministeriums MWIDE am 2. und 3. Dezember an.⁹ Bei diesem Kongress, an dem SCI4climate.NRW ebenfalls mit einer Vielzahl an Beiträgen und einem Fachforum zum Thema Wasserstoff beteiligt war, wurden bereits die fünf ausgewählten Poster der Konferenz „Wissenschaft trifft Wirtschaft“ mit einem Podcast und Chat-Möglichkeiten mit den Autor*innen vorgestellt. Die Themen waren dabei sehr breit gefächert:

- S.R. Foit: CO₂-Wertschöpfung in der Industrie: Mit Elektrolyse zu nachhaltigem Feedstock und Intermediat
- Niclas-Alexander Mauß: Industrieller Use-Case: Kreislaufwirtschaft bei der Lorenz GmbH & Co. KG
- Cathérine Momberger Rabea Bieckmann: Soziales Spannungsfeld Rheinisches Revier – Akzeptanz und Kommunikation
- Sophie Pathe: Energieversorgung und umweltfreundliche Transformation im Rheinischen Braunkohlerevier im Kontext des Kohleausstiegs
- Dario Zander: Deep Decarbonization: Potenzial von BECCS in der Zellstoffindustrie im europäischen Raum

6.1.2 Wissenschaft trifft Wirtschaft II, 2021: Forschung für eine klimaneutrale Zukunft

Die zweite Online-Konferenz „Wissenschaft trifft Wirtschaft: Forschung für eine klimaneutrale Zukunft“ am 28. Oktober 2021 knüpfte an den Erfolg der ersten Veranstaltung an. Im Mittelpunkt stand hier die Präsentation der Ergebnisse aus SCI4climate.NRW für Industrie und Öffentlichkeit und die vertiefte Diskussion in vier Fachforen.



PROGRAMM

Wissenschaft trifft Wirtschaft: Forschung für eine klimaneutrale Industriezukunft

28. Oktober 2021, 09:00 bis 16:30 Uhr, online

⁹ Siehe <https://www.energieforschung.nrw/neuigkeiten/energieforschungskongress2020>.

Minister Pinkwart eröffnete die Veranstaltung mit einer virtuellen Grußbotschaft. Aus wissenschaftlicher Sicht benannte Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer die zentralen Herausforderungen für eine klimaneutrale Industrie bis 2045; Dr. Marlene Arens von HeidelbergCement beleuchtete in ihrem Wirtschaftsimpuls-Vortrag die politischen, wirtschaftlichen wie gesellschaftlichen Anforderungen, die an emissionsintensive Unternehmen gerichtet werden.

In vier Workshops wurden aktuelle Themen rund um die Industrietransformation mit VertreterInnen aus Wissenschaft und Wirtschaft diskutiert.

Workshops (jeweils parallel)

10:15 Uhr **Workshop 1: „H₂ready?!“**

Workshop 2: „Forschung und Entwicklung – Innovationen für die Transformation“

- Mittagspause von 12:20 Uhr bis 13:05 Uhr -

13:05 Uhr **Workshop 3: „CO₂-neutrale Bauindustrie 2045 - Vision oder Wirklichkeit?“**

Workshop 4: „Renewables Pull in der Grundstoffindustrie – Kommt es zu Produktionsverlagerungen infolge abweichender Erneuerbaren-Bedingungen?“

Im Abschlusspanel stellten die Workshop-Leitenden die Ergebnisse und Diskussionen ihrer Workshops vor. Zudem wurde ein Ausblick auf das dritte Forschungsintervall gegeben.

Insgesamt nahmen rund 100 Teilnehmer*innen an der Veranstaltung teil.

6.1.3 Wissenschaft trifft Wirtschaft III, 2022: Industriewandel gestalten, Klimaneutralität beschleunigen

Die dritte und größte Konferenz der Reihe „Wissenschaft trifft Wirtschaft“, die auch die Abschlusskonferenz für SCI4climate.NRW 2018-2022 darstellte, fand am 15. und 16. September unter dem Titel „Wissenschaft trifft Wirtschaft: Industriewandel gestalten, Klimaneutralität beschleunigen“ im thyssenkrupp-Hauptquartier in Essen statt. Bei dieser Konferenz ging es vor allem darum, die Arbeit von SCI4climate.NRW und von IN4climate.NRW national sichtbar zu machen, und sich mit denjenigen, die sich in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik mit dem Thema Industrietransformation beschäftigen, zu vernetzen. Der formale Abschluss des Projekts SCI4climate.NRW diente als Meilenstein zudem dazu, die zentralen Herausforderungen für die nächste Etappe zu identifizieren und zu diskutieren.

An der Konferenz nahmen etwa 200 Personen teil. Eine Dokumentation der Konferenz findet sich auf der Webseite der NRW.Energy4climate: <https://www.energy4climate.nrw/waerme-gebaeude/events-1/wissenschaft-trifft-wirtschaft-15-16092022>

EINLADUNG
15. UND 16. SEPTEMBER
2022
THYSSENKRUPP
QUARTIER ESSEN



Diskutiert wurde in drei Panels sowie neun Foren, von denen jeweils drei parallel abgehalten wurden.

Panels

Panel 1: Industrietransformation gestalten in Zeiten der Krise



Panel 2: Die Rolle der Akteure in der Industrietransformation



Panel 3: The role of industrial transformation for development, global trade flows and green markets



Wie die Industrietransformation trotz der Krise vorangebracht werden kann, diskutierten auf dem ersten Panel Malte Bornkamm (Referatsleiter im BMWK), Markus Exenberger (Vorstand H2Global-Stiftung), Dr. Joachim Hein (Referent für Klimapolitik beim Bundesverband der Deutschen Industrie) und Wido Witecka (Projektmanager Industrie bei Agora Energiewende). Das zweite Panel am Donnerstagnachmittag ging der Frage nach, wie die verschiedenen Akteure zur Industrietransformation, verstanden als gesamtgesellschaftliche Aufgabe, beitragen. Moderiert von Dr. Thilo Schaefer vom IW Köln diskutierten hier vier GesprächsteilnehmerInnen: Mona Neubaur, Ministerin des Landes NRW (MWIKE), Julia Wischnewski von Fridays for Future, Dr. Christoph Sievering von Covestro und Dr. Sophia Schönborn von der IGBCE.

Das dritte Panel am Freitagvormittag widmete sich dem globalen Kontext der industriellen Transformation und diskutierte Herausforderungen und Chancen für Handel, Entwicklung und Wettbewerbsfähigkeit. Moderiert von Prof. Dr. Görges Deerberg (Fraunhofer UMSICHT) nahmen an der Sitzung fünf internationale ExpertInnen teil: Tiffany Vass, leitende Energieanalytikerin in der Abteilung für

Energietechnologiepolitik der Internationalen Energieagentur (IEA), Rana Ghoneim, Leiterin der UNIDO-Abteilung für Energiesysteme und -infrastrukturen, Prof. Sebastian Oberthür von der Vrije Universiteit Brüssel, Hilton Trollip von der Universität Kapstadt und Dr. Markus Oles, Leiter des Carbon2Chem Center of Decarbonization bei thyssenkrupp Steel Europe.

Die neun Foren deckten eine Vielzahl der Themen ab, die im ersten SCI4climate.NRW-Projekt behandelt wurden und die auch eine wichtige Rolle in der Forschungsagenda von SCI4climate.NRW 2022-2025 einnehmen. Die Foren waren getreu dem Leitbild der Konferenz als Austausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft angelegt und regten zum Austausch zwischen Forschung und Praxis aus Industrie und Politik an.

Foren	
Forum 1: Szenarien zur Industrietransformation im Dialog – Diskussion offener Fragen	+
Forum 2: Herausforderungen für den Industriestandort und Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt	+
Forum 3: Kreislaufwirtschaft konkret I: Beispiel Kunststoffe	+
Forum 4: Wasserstoffwirtschaft als zentrale Voraussetzung für eine klimaverträgliche Industrie –die richtige Mischung aus Importen und heimischer Erzeugung	+
Forum 5: Unvermeidbare CO ₂ -Mengen aus der Industrie und ihre Infrastrukturen	+
Forum 6: Gemeinsame Narrative als Voraussetzungen für die gesellschaftliche Akzeptanz der Industrietransformation und des Strukturwandels vor Ort	+
Forum 7: Kann sich die Industrietransformation selbst finanzieren? Die Rolle grüner Märkte im Instrumentenmix	+
Forum 8: Kreislaufwirtschaft konkret II: Stoffströme und Sekundärrohstoffe in der Baustoffindustrie	+
Forum 9: Regionale Transformation – Erfahrungsaustausch und lessons learned	+

6.2 Projektübergreifender Workshop zum Thema CO₂-Infrastruktur in NRW

Am 22. August 2019 richtete der VDZ im Rahmen der Projekte SCI4climate.NRW und IN4climate.NRW in Düsseldorf den Workshop „CO₂-Infrastruktur in NRW“ aus. Mehr als 90 Teilnehmende aus Industrie, Forschung, Politik und Gesellschaft kamen zusammen, um im Kontext des Klimaschutzes über die Perspektiven einer CO₂-Infrastruktur in NRW zu diskutieren.

Die Veranstaltung brachte die Expertise verschiedener Fachbereiche und Akteure zusammen. Im Fokus der veröffentlichten Präsentationen (Ruppert et al. 2019) standen folgende Schwerpunkte:

- Im Themenblock „CO₂-Quellen und -Senken“ wurden CO₂-Minderungstechnologien bei der Zement- und Stahlherstellung sowie regionale und internationale Perspektiven für ein CO₂-Management in NRW vorgestellt.
- Anschließend standen Erfahrungen mit „CO₂-Storage und Transport / Infrastruktur“ in Deutschland sowie
- „Planerische und rechtliche Rahmenbedingungen“ im Vordergrund.
- Im vierten Themenblock „Gesellschaftliches Bewusstsein und Voraussetzungen“ ging es schließlich um die wichtige Frage der gesellschaftlichen Akzeptanz des CO₂-Transports und der CO₂-Speicherung.

Die Ergebnisse der Diskussion bildeten eine Grundlage für weiterführenden Arbeiten, insbesondere in der AG Kohlendioxidwirtschaft von IN4climate.NRW, die ihrerseits wichtige Diskussionsgrundlagen (siehe Tabelle 1-2) für die Erstellung einer umfassenden Carbon Management Strategie NRW durch das (MWIDE 2021) beitragen konnte.

6.3 Internes Austauschformat „Scientific Academy“

Das Ziel der „Scientific Academy“ war der themenfeldübergreifende wissenschaftliche Austausch zwischen den vielen Projektmitarbeitenden der verschiedenen Forschungsinstitute. Die strukturelle Verankerung dieses Austausches in einem eigenen Format stellte die regelmäßige wechselseitige Information zu und Diskussion von aktuellen Fachthemen sowie die gemeinsame Arbeit an konkreten Inhalten sicher. Durch die Teilnahme vertieften die Mitarbeitenden ihr Hintergrundwissen zu verschiedensten Forschungsthemen. Die Vortragenden erhielten wertvolle Rückmeldung im Rahmen interdisziplinärer Diskussionen. Zusammen identifizierten die Teilnehmenden weitere Forschungsbedarfe und mögliche Forschungsfragen zur gemeinsamen Bearbeitung.

Der themenfeldübergreifende Austausch der Mitarbeitenden im Rahmen von „Scientific Academies“ erfolgte über die gesamte Projektlaufzeit hinweg in 13 Workshops. Zunächst fanden diese in Präsenz statt, bevor Kontaktbeschränkungen im Rahmen der einsetzenden Corona-Pandemie dies nicht mehr zuließen. Aufgrund der fortwährenden Restriktionen wurde erfolgreich ein Online-Format etabliert, das die wichtige gemeinsame Betrachtung und Diskussion wissenschaftlicher Inhalte für den Rest der Projektlaufzeit sicherstellte.

Die folgende Tabelle bietet einen Überblick über die Eckdaten der 13 im Projektverlauf durchgeführten „Scientific Academies“:

Datum	Ort	Thema der Scientific Academy
08.07.2019	Köln	Kontextszenarien als Instrument zur Untersuchung verschiedener möglicher geopolitischer Zukünfte
13.11.2019	Leverkusen	Wissenschaftskommunikation - Wie kommen unsere Inhalte ans Ziel?
13.11.2019	Leverkusen	Wissenschaftliche Strategieberatung für Akteure aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft
14.11.2019	Leverkusen	Die zukünftige Rolle von Wasserstoff in einer klimaneutralen Zukunft
09.03.2020	Wuppertal	Standortbestimmung CCS/ CCU
04.03.2021	Online	Renewables Pull als Phänomen der Verlagerung industrieller Produktion als Folge unterschiedlicher Kosten erneuerbarer Energien
29.11.2021	Online	Carbon Management Strategie NRW: Inhalt und Forschungsfragen
13.02.2022	Online	Wasserstoffimporte nach Deutschland bis 2030: Exportländer und Transportoptionen
03.03.2022	Online	Die Rolle des (Industrie-)Designs für eine "grüne" Wirtschaft
28.04.2022	Online	Flüssige Kohlenwasserstoffe und der Standort NRW: Welche Transformation ist zielführend?
09.05.2022	Online	The role of CCUS for a climate-neutral industry in NRW: current SCI4climate work and future tasks
23.05.2022	Online	SCI4climate.NRW Szenario Klimaneutralität
25.11.2022	Online	Zirkuläre Wertschöpfung in NRW – Status quo und Vision für 2030

6.4 Promotionsvorhaben in SCI4climate.NRW und Promotionskolleg

Zur institutsübergreifenden Vernetzung der SCI4climate-Doktorand*innen wurde ein Promotionskolleg unter der Leitung von PD Dr. Peter Viebahn (Wuppertal Institut) und Prof. Dr. Grit Walther (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Operations Management) ins Leben gerufen. Vier Projektmitarbeitende der RWTH Aachen und des Wuppertal Instituts, die im oder angelehnt an das Projekt promovieren, präsentierten den Stand ihrer Arbeiten im Rahmen eines jeweils ca. 1,5-stündigen virtuellen Termins. Die Dissertationen wurden zunächst von den Promovierenden vorgestellt und anschließend mit den weiteren Mitarbeiter*innen in SCI4climate.NRW diskutiert, um hilfreiche Rückmeldungen für die weitere Forschungsarbeit zu erhalten. Für die Teilnehmenden boten die Veranstaltungen die Möglichkeit, sich über aktuelle Forschungsthemen zu informieren und fachlichen Input zu erhalten. Es wurde damit sowohl für die Promovierenden als auch für die weiteren Projektmitarbeiter*innen ein Mehrwert durch den Austausch und die Vernetzung innerhalb des Projektes geschaffen.

In den folgenden Abschnitten wird der aktuelle Stand der Dissertationsarbeiten (Redaktionsschluss Ende 2022) kurz vorgestellt:

Julia Schleier (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Operations Management): Strategische Planung und Bewertung von Recyclingnetzwerken zur Schließung von Kunststoffkreisläufen vor dem Hintergrund

der Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft: Dargestellt für expandiertes Polystyrol (EPS) aus Wärmedämmverbundsystemen (WDVS)

Der aktuelle Verbrauch von Primärressourcen zur Herstellung neuer Produkte ist in vielerlei Hinsicht nicht nachhaltig. Gleichzeitig trägt das derzeitige Abfallmanagement, insbesondere von Kunststoffen, zur Umweltverschmutzung und zum Klimawandel bei. Durch die Schließung von Stoffkreisläufen und die Verwertung von Altprodukten als Sekundärrohstoffe können nicht-erneuerbare Ressourcen eingespart und Treibhausgasemissionen reduziert werden. Die Transformation der linearen Wirtschaftsweise zu einer Kreislaufwirtschaft wird daher als eine der Schlüsselstrategien zur Reduktion negativer Umwelteinflüsse angeführt.

Das Potenzial der Schließung von Stoffkreisläufen bleibt jedoch oftmals ungenutzt. Insbesondere für neuartige Produkte und darin gebundene Materialien sind geeignete Verwertungsstrategien häufig nicht etabliert, wenn sie beginnen vermehrt als End-of-Life (EoL) Stoffströme aufzutreten. Die hochwertige Verwertung wird dabei durch geringe Technologiereifegrade, mangelnde ökonomische Tragfähigkeit, fehlende Sekundärmärkte, mangelnde Inputströme in Quantität und Qualität oder fehlende Rückführlogistiksysteme erschwert. Zur erfolgreichen Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft ist es daher unerlässlich, diese EoL-Stoffströme und die entsprechenden Verwertungsoptionen schon vor dem verstärkten Auftreten eingehend zu analysieren.

Im Rahmen der Dissertation wird das Potenzial der Schließung von Kunststoffkreisläufen analysiert. Die Zielsetzung hierbei ist die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems für die strategische Gestaltung zukünftiger Verwertungsnetzwerke auf systematischer Ebene zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft. Für den zukünftig stark zunehmenden EoL-Stoffstrom aus verbauten EPS-basierten WDVS besteht in Deutschland eine akute Verwertungsproblematik, die durch die Erschließung geeigneter Verwertungswege und die Etablierung der benötigten Infrastrukturen überwunden werden könnte. Daher wird der generische Analyseansatz auf diesen spezifischen Anwendungsfall übertragen.

Dazu wird im Rahmen der Dissertation zunächst eine Methodik für eine regional und zeitlich hochauflösende Quantifizierung der EPS-basierten WDVS EoL-Stoffströme in Deutschland entwickelt und angewendet. Daneben erfolgt die Identifikation geeigneter zukünftiger Verwertungspfade inkl. aller Prozessschritte und Transporte. Darauf aufbauend wird ein mathematisches Optimierungsmodell für die ökonomische und ökologische Bewertung des Verwertungsnetzwerks entwickelt, welches strategische Investitionsentscheidungen bezüglich der Standort- und Kapazitätswahl alternativer Prozesstechnologien sowie taktische Entscheidungen hinsichtlich der Transformation und des Transports der Materialien innerhalb eines Verwertungsnetzwerkes abbildet. Das Modell dient der Identifikation optimaler Verwertungswege aus ökonomischer und ökologischer Perspektive, der Analyse von Trade-offs zwischen den Bewertungsperspektiven sowie des Einflusses regulatorischer Maßnahmen (z.B. Recyclingquoten) auf die Gestaltung des Recyclingnetzwerks und die ökonomische Effizienz der Maßnahmen im Hinblick auf die ökologische Zielsetzung. Abschließend werden

Handlungsempfehlungen für die beteiligten politischen und privat-wirtschaftlichen Stakeholder des Recyclingnetzwerkes hergeleitet.

Christiane Reinert (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik): “Optimierung und Ökobilanzierung von industriellen und nationalen Transitionspfaden hin zu emissionsarmen Energiesystemen”

Energiesystemmodelle können Entscheidungsträger dabei unterstützen, die Transition von Energiesystemen langfristig und kosteneffizient zu planen. Um optimale emissionsarme Energiesysteme identifizieren zu können, müssen Modelle zeitlich und örtlich variable Stromerzeugungskapazität, Sektorenkopplung, und die ökologischen Auswirkungen von Energiewandlern über ihren gesamten Lebenszyklus berücksichtigen.

Um den Modellierungsaufwand solcher Systeme zu reduzieren, wurde das Softwareframework SecMOD entwickelt, welches die multisektorielle Optimierung und vollständig integrierte Ökobilanzierung von Energiesystemmodellen ermöglicht. SecMOD kann durch Modifikation der Eingangsdaten flexibel zur Optimierung verschiedener Probleme verwendet werden und somit verschiedene Energiesysteme von industrieller bis hin zu nationaler Ebene abbilden. Am Beispiel eines nationalen Energiesystemmodells und zweier industrieller Energieversorgungssysteme wird die flexible Anwendbarkeit demonstriert. Zudem werden zwei methodische Aspekte der Energiesystemoptimierung unter Berücksichtigung von Ökobilanzen diskutiert. Zunächst wird der Einfluss emissionsarmer Lieferketten auf das kostenoptimale Design und die ökologische Bewertung von Energiesystemmodellen analysiert. Die Transition zu emissionsarmen Energiesystemen erfordert eine Modellierung bei hinreichender räumlicher Auflösung, um räumliche Diskrepanzen zwischen Energiebedarfen und Energieversorgung abbilden zu können. Da eine hohe räumliche Auflösung die Problemkomplexität von Energiesystemen stark erhöht, wird abschließend eine Methode vorgestellt, um die rechnerisch mögliche räumliche Auflösung von sektorengesetzten Energiesystemen zu erhöhen.

Clemens Schneider (Wuppertal Institut): “Scenario based explorative and normative transition pathways to electrification for the European basic industries and particular clusters”

Die Dekarbonisierung der Grundstoffindustrie ist ein aufstrebendes Thema in der Forschung. Energie- und Materialeffizienz, Umstellung auf andere Brennstoffe und Recycling sind wichtige Strategien, die weitreichend erörtert wurden. Die Kosten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sind in den letzten Jahren erheblich gesunken. Gleichzeitig sind die Ambitionen in der Klimapolitik (Pariser Abkommen) gestiegen. Um das ehrgeizige Pariser Ziel zu erreichen, scheint die Elektrifizierung industrieller Prozesse eine zusätzliche wesentliche Strategie zu sein, um sie bis zur Mitte des Jahrhunderts zu dekarbonisieren.

Während andere Dekarbonisierungsstrategien in bestehenden Industrieclustern intelligent umgesetzt werden können, könnte die Elektrifizierung (insbesondere im Zusammenspiel mit der Digitalisierung)

die gesamte industrielle Wertschöpfungskette verändern. Es werden wahrscheinlich neue Akteure auftreten, die bestehende Geschäftsmodelle und Industriecluster bedrohen.

Greenfield-Investitionen in Schwellenländern mit hohen Wachstumsraten und hoher Infrastruktur und damit hoher Materialnachfrage, könnten den bestehenden europäischen Bestand verdrängen - insbesondere in Zeiten der wirtschaftlichen Rezession. Dies könnte eine Verlagerung von CO₂-Emissionen sein oder auf eine bessere Verfügbarkeit erneuerbarer Energie in anderen Regionen (wie z.B. MENA) zurückzuführen sein.

Es scheint jedoch vernünftig, davon auszugehen, dass die Grundstoffindustrie auch in Zukunft in Europa präsent sein wird. Transportkosten, gebündelte Wertschöpfungsketten sowie industriepolitische Gründe sind nur einige Argumente. Allerdings kann es zu Verlagerungen der Industrie nicht nur von Europa ins Ausland, sondern auch innerhalb Europas kommen.

Die Dissertation spiegelt die aktuelle Forschung zur Elektrifizierung wider und versucht herauszufinden, wie eine elektrifizierte Massenindustrie in Europa (d.h. insbesondere die Stahl- und Chemieindustrie) der Zukunft aussehen könnte. Der Schwerpunkt der Forschung liegt dabei nicht auf Nischen und Early Adopters, sondern auf der mittel- und langfristigen Elektrifizierung der Schüttgutproduktion. Die Arbeit liefert Szenarien für eine elektrifizierte europäische Schwerindustrie, die einerseits normativ sind, indem sie kontinuierliches politisches Handeln und einen klaren regulatorischen Rahmen in Richtung einer CO₂-neutralen Wirtschaft bis 2050 voraussetzen. Andererseits sind sie explorativ, indem sie Pfade auf einer Zeitskala mit zu tätigen Investitionen, abzuschreibenden Vermögenswerten und möglichen Gewinner- und Verliererregionen innerhalb der EU sowie das Zusammenspiel mit möglichen anderen Strategien wie Recycling oder CCS aufzeigen.

Ziel der Doktorarbeit ist es, robuste Szenarien für die EU als Ganzes abzuleiten und "Fallstudien" für Regionen/Industriecluster wie Rotterdam oder Rhein-Ruhr zu veranschaulichen.

Christian Zibunas (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik): "Life cycle optimization towards economically and environmentally sustainable chemicals & plastics"

Zur Produktion von Basischemikalien und Kunststoffen werden aktuell vorrangig fossile Ressourcen genutzt. Die sowohl stoffliche als auch energetische Nutzung in Kombination mit einer steigenden Nachfrage intensiviert die globalen Treibhausgasemissionen. Eine Reduktion der Treibhausgas-Emissionen bildet somit einen essenziellen Pfeiler für eine umweltfreundliche Chemieindustrie. Diese Dissertation behandelt die Transformation der Chemieindustrie zu mehr Nachhaltigkeit mit Fokus auf ökologische und ökonomische Aspekte.

Eine erste Studie untersucht die kostenoptimale Transformation der Chemieindustrie zu Netto-Null Treibhausgasemissionen. Auf diese Weise werden ökologische und ökonomische Aspekte von Nachhaltigkeit gemeinsam analysiert.

Eine zweite Studie vergleicht vorausschauende mit kurzfristiger Investitionsplanung und deren Einfluss auf die Kosten und Treibhausgasemissionen. Diese Studie fokussiert somit den Einfluss des zeitlichen Planungshorizonts auf ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit.

Eine dritte abschließende Studie fokussiert die absolute ökologische Nachhaltigkeit. Zu diesem Zweck werden Treibhausgasreduktionen und die Problemverschiebung zu anderen Umweltwirkungen in den Kontext planetarer Grenzen gesetzt. Diese planetaren Grenzen werden mit Hilfe von Nützlichkeitsprinzipien auf Nachhaltigkeitsgrenzen für die Chemieindustrie herunterskaliert. Die Nützlichkeit chemischer Güter für die Weltbevölkerung wird über ökonomische Indikatoren angenähert. Somit vereint speziell die Skalierung der planetaren Grenzen die drei Pfeiler der Nachhaltigkeit, Ökologie, Ökonomie und Soziales.

6.5 Lehrveranstaltungen

6.5.1 Projektmodul „Carbon Management Consulting: Entwicklung eines Konzepts für regionale Klimaneutralität“ an der RWTH Aachen

Wissenschaftler*innen von der RWTH Aachen und vom VDZ sowie Industriepartner aus IN4climate.NRW trugen zur Gestaltung des Projektmoduls „Carbon Management Consulting: Entwicklung eines Konzepts für regionale Klimaneutralität“ an der RWTH Aachen im Sommersemester 2022 bei.

In diesem Projektmodul, das sich an Masterstudierende verschiedener Studiengänge richtete, wurde ein Konzept für eine konkrete Region in Nordrhein-Westfalen entwickelt. Notwendig hierfür war die Analyse und Bewertung der regionalen Rahmenbedingungen, zum Beispiel in Form des Potenzials erneuerbarer Energien, der aktuellen CO₂-Quellen und vorhandener bzw. erweiterbarer (Pipeline-) Infrastrukturen. Darauf aufbauend erfolgte die Konzeptentwicklung und kapazitative Auslegung konkreter Minderungs- und CCU/CCS-Maßnahmen für die regionalen CO₂-Quellen. Die Konzepte und Szenarien wurden im Dialog mit den Entscheidungsträgern vor Ort entwickelt. Als Ergebnis dieses Projektmoduls sollten konkrete Aussagen zum Einsatz von Technologien für die Nutzung erneuerbarer Energien, zur Minderung von CO₂-Emissionen mit entsprechenden Kapazitäten sowie zu potenziellen H₂-/CO₂-Infrastrukturen für die Region erarbeitet werden. Außerdem sollten Strategien für die Transformation zur Klimaneutralität für die Region und für die optimale Auslegung von Klimaschutzmaßnahmen abgeleitet werden.

Details zum Projektmodul sind auf der Webseite der RWTH Aachen zu finden (<https://www.om.rwth-aachen.de/projektmodule/entwicklung-eines-regionalen-konzepts-zur-klimaneutralitaet-konzeption-und-planung-fur-einen-landkreis-in-nordrhein-westfalen/>).

6.5.2 Leonardo-Vorlesung „Transformation zu einer klimaneutralen Industrie“ an der RWTH Aachen

Im Wintersemester 2022/2023 fand die Leonardo-Vorlesungsreihe zum Thema „Transformation zu einer klimaneutralen Industrie“ an der RWTH Aachen statt. In dieser Vorlesung wurden Herausforderungen und Lösungsansätze für eine zukunftsfähige klimaneutrale und wettbewerbsfähige Grundstoffindustrie in Nordrhein-Westfalen und Deutschland bis 2045 aufgezeigt. Vorgestellt wurden Ergebnisse aus SCI4climate.NRW durch Beiträge aller am Projekt beteiligten Wissenschaftspartner. Konzeption, Ablauf und einzelne Beiträge sind auf der Webseite der RWTH Aachen zu finden (<https://www.leonardo.rwth-aachen.de/de/module/wise-2022/transformation-zu-einer-klimaneutralen-industrie/>).

Der Klimawandel ist eine der zentralen Herausforderungen der nächsten Jahre und Jahrzehnte. Die Reduktion der Treibhausgasemissionen erfordert einen tiefgreifenden Wandel unserer Wirtschaftssysteme. Dies gilt insbesondere für die energieintensive Grundstoffindustrie, wie z.B. die Stahl-, Zement-, Chemie-, Aluminium- und Papierherstellung. Die Studierenden lernten, die Bedeutung der energieintensiven Industrie für den Übergang in eine klimaneutrale Gesellschaft einzuordnen, inklusive der damit verbundenen Chancen und Herausforderungen innovative Technologien zur Treibhausgasreduktion in der energieintensiven Industrie zu identifizieren und zu bewerten sowie Technologie- und Innovationsroadmaps abzuleiten. Außerdem wurden Sie dazu befähigt, Infrastrukturbedarfe, z.B. in Hinblick auf Pipelines für Wasserstoff und CO₂ sowie Speichertechnologien zu bewerten und politische bzw. gesetzliche Rahmenbedingungen einer Transformation zur klimaneutralen Industrie zu erläutern und kritisch zu reflektieren.

6.6 Literaturverzeichnis inklusive Vorträge und Veröffentlichungen aus SCI4climate.NRW

- Ruppert, J., et al. (2019). CO₂-Infrastruktur in NRW. Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Workshop am 22. August 2019 in Düsseldorf. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/veranstaltungen/co2-infrastruktur-in-nrw>
- MWIDE, Hrsg. (2021). Kohlenstoff kann Klimaschutz, Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf. Verfügbar unter: <https://www.wirtschaft.nrw/carbon-management-strategie-nrw>